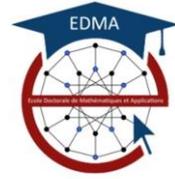




UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

---

ECOLE DOCTORALE DE  
MATHÉMATIQUES ET APPLICATIONS



## THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

**Domaine** : Sciences et Technologies  
**Mention** : Mathématiques et Informatique  
**Discipline** : Informatique

# MODELISER LES INSTITUTIONS DANS LES SOCIO-ECOSYSTEMES - APPLICATION A LA GESTION FORESTIERE A MADAGASCAR

Présentée et soutenue par **RAHARIVELO Sitraka Oliva**

Le 27 Novembre 2023

**Président du jury** : Princy RANDRIAMBOLOLONDRAntomalala

Professeur Titulaire, Université d'Antananarivo

**Co-directeurs** : Arthur RANDRIANARIVONY

Professeur Titulaire, Université d'Antananarivo

Jean-Pierre MÜLLER

Cadre scientifique, CIRAD-ES-GREEN, Montpellier

**Rapporteur interne** : Michel Martin RAJOELINA

Professeur Titulaire, Université d'Antananarivo

**Rapporteur externe** : Laurent VERCOUTER

Professeur en Informatique, INSA Rouen Normandie

**Examineur** : Tahiry ANDRIAMARozakaniaina

Maître de Conférences, Université d'Antananarivo



## Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à tous ceux qui m'ont aidée et soutenue à contribuer à la réalisation de cette thèse, entre autres :

- Monsieur Arthur RANDRIANARIVONY, Co-Directeur de Thèse. Il m'a conseillée, m'a encouragée et m'a soutenue dans toutes les procédures de déroulement de cette thèse. En effet, outre les enseignements qu'il m'a donnés durant mes précédentes années universitaires et qui m'ont permis d'arriver à ce stade, ses conseils précieux durant cette thèse m'ont permise d'améliorer ce travail.
- Monsieur Jean-Pierre MÜLLER, Co-Directeur de Thèse. C'est lui qui m'a initiée à l'Intelligence Artificielle et aux Systèmes Multi-Agents durant mes années de formation en DEA. Par sa bienveillance, il n'a pas hésité à accepter de m'encadrer dans cette thèse, malgré les conditions difficiles qui existaient, notamment la distance qui nous séparait et le manque d'infrastructures permettant de faciliter les recherches. Il n'a cessé de m'encourager durant mes années de thèse, et ses précieux conseils et enseignements sont pour moi les bases sur lesquelles je partirai pour continuer les recherches dans le futur.
- Monsieur Princy RANDRIAMBOLOLONDRA TOMALALA d'avoir fait l'honneur de présider cette soutenance.
- Monsieur Michel Martin RAJOELINA et Monsieur Laurent VERCOUTER d'avoir bien voulu accepter d'être rapporteurs pour ce travail malgré leurs diverses occupations.
- Monsieur Tahiry ANDRIAMAROZAKANIAINA d'avoir bien voulu accepter de consacrer son précieux temps pour examiner ce travail.
- Les personnalités de l'université de Tana de m'avoir conseillé et soutenu dans les procédures de déroulement de cette thèse et de bien vouloir honorer de leur présence la présentation de cette thèse.
- L'équipe Green au CIRAD Montpellier, en particulier Madame Sigrid AUBERT de m'avoir prodigué ses nombreux conseils qui m'ont beaucoup aidée dans la formalisation de mon méta-modèle, Monsieur Hasina Lalaina RAKOTONIRAINY pour tous les conseils qu'il m'a donnés sur la réalisation de ce travail de recherche, Monsieur Paulo PIMENTA de m'avoir partagé ses expériences pour l'utilisation des outils logiciels nécessaires à l'implémentation du modèle.
- L'UR Green CIRAD et l'équipe du DP "Forêts et Biodiversité" à Madagascar de m'avoir bien accueillie au sein de leur unité, pour tous leurs conseils et pour tous les échanges qu'on a faits en vue d'améliorer ce travail, ainsi que pour leur aide matériel qui m'a permis d'effectuer cette recherche dans de bonnes conditions.
- Le gouvernement français de m'avoir attribué des bourses qui ont amélioré les conditions dans lesquelles j'ai effectué ce travail, principalement l'interaction directe avec mon directeur de thèse et d'autres chercheurs compétents dans le domaine et la participation à des formations.
- Ma famille qui m'a toujours soutenue tout au long de mes années d'études
- Enfin, tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration et la réalisation de cette thèse

## Liste de Figures

Figure 1 - Méta-modèle d'institution .....	9
Figure 2 - Un méta-modèle de SMA institutionnel .....	9
Figure 3 - Un méta-modèle sur le raisonnement sur les multiples institutions.....	10
Figure 4 - Vue compréhensive des organisations dans le SMA (Boissier, Hübner, et Sichman 2006).....	12
Figure 5 - Structure du modèle Aalaadin.....	13
Figure 6 - Méta-modèle de l'architecture de MAO.....	14
Figure 7 - Méta-modèle Moïse + .....	15
Figure 8 - Structure de MOCA .....	16
Figure 9 - Méta-modèle de OPERA .....	17
Figure 10 - Méta-modèle de Harmonia .....	18
Figure 11 - Méta-modèle de OMNI.....	19
Figure 12 - Méta-modèle de SMA normatif proposé dans (y López, Luck, et d'Inverno 2006).....	21
Figure 13 - Méta-modèle du SMA normatif proposé dans (Boella et van der Torre 2004).....	22
Figure 14 - Implémentation des normes dans les Institutions Electroniques .....	23
Figure 15 - Modèle de SMA normatif décrivant l'infection positive .....	23
Figure 16 - Méta-modèle d'application de norme dans (Fornara et Colombetti 2008).....	24
Figure 17 - Méta-modèle de norme dans (Vázquez-Salceda, Aldewereld, et Dignum 2005) .....	25
Figure 18 - Méta-modèle de norme dans (Savarimuthu et al. 2007) .....	26
Figure 19 - Relations entre rôles et norme dans (Demolombe et Louis 2006).....	26
Figure 20 - Le cycle de changement de norme (Sandholtz 2008) .....	27
Figure 21 - Interprétation opérationnelle des normes (Criado, Argente, et Botti 2011) .....	28
Figure 22 - Pyramide de modélisation de l'OMG (Bézivin 2003) .....	38
Figure 23 - Les relations entre modèles, méta-modèles et systèmes (2010) .....	39
Figure 24 - Composantes d'un langage (Combemale 2008) .....	40
Figure 25 - Types de transformation et leurs principales utilisations (Combemale 2008) .....	40
Figure 26 - Concepts principaux de métamodélisation (EMOF 2.0).....	41
Figure 27 - Les simples relations entre points (Vilain, Kautz, et Van Beek 1990).....	54
Figure 28 - Un point orienté et ses directions relatives qualitatives spatiales (Moratz, Dylla, et Frommberger 2005).....	55
Figure 29 - Les différentes relations dans le RCC-8 .....	56
Figure 30 - Méta-modèle de l'objet .....	59
Figure 31 - Méta-modèle de l'agent.....	59
Figure 32 - Eléments constitutifs d'une institution .....	60
Figure 33 - Méta-modèle du concept.....	64
Figure 34 - Méta-modèle de l'assertion.....	65

Figure 35 - Méta-modèle de la norme constitutive.....	66
Figure 36 - Illustration de la correspondance entre cadre institutionnel et monde réel.....	67
Figure 37 - Monde institutionnel et Monde brut utilisés dans les normes constitutives.....	68
Figure 38 - Méta-modèle de la norme .....	72
Figure 39 - Méta-modèle de l'expression.....	74
Figure 40 – Méta-modèle de l'expression temporelle.....	75
Figure 41 - Méta-modèle de l'expression spatiale.....	76
Figure 42 - Méta-modèle de l'expression factuelle.....	76
Figure 43 - Méta-modèle de l'expression de l'action .....	77
Figure 44 - Méta-modèle de l'organisation.....	82
Figure 45 - Extrait de représentation des données avant notre proposition de modèle de SMA institutionnel	84
Figure 46 - Description des objets représentant des URI de méthode correspondant à des actions.....	85
Figure 47 - Extrait de la liste des institutions et des organisations dans le modèle de la gestion forestière à Madagascar.....	85
Figure 48 - Modèle d'institution mère de toutes les institutions dans le cas de la gestion forestière à Madagascar.....	85
Figure 49 - Extrait des normes dans l'institution Voi.....	86
Figure 50 - Des normes constitutives dans une organisation Voi .....	86
Figure 51 - Organisations "marché légal" et "marché illégal" .....	87
Figure 52 - Structure de l'institution "écologie" .....	87
Figure 53 - Normes constitutives montrant les correspondances entre concepts de différentes institutions...	88
Figure 54 - Les normes dans l'institution "foyer" .....	89
Figure 55 - Description des organisations "commune" et "AdmForestiere" .....	89
Figure 56 - Les normes dans l'institution "coutumière" .....	89
Figure 57 - Description d'organisations relatives aux institutions coutumière et foyer.....	90
Figure 58 - Structure générale du fichier de description d'un exemple de système multi-agent institutionnel	92
Figure 59 - Paramètres pour le calcul des normes applicables.....	93
Figure 60 - Description de l'institution "commune" .....	94
Figure 61 - Description des institutions «foyer» et «parc».....	94
Figure 62 - Description des organisations .....	95
Figure 63 - Contrainte OCL pour l'expression de temps .....	96
Figure 64 - Algorithme d'obtention de la liste des normes applicables à un agent.....	98
Figure 65 - Exemple d'obtention de liste de normes applicables.....	99
Figure 66 - Syntaxe abstraite de l'exemple .....	99

## Liste des tableaux

Table 1 - Tableau récapitulatif des architectures de SMA normatifs et institutionnels.....	34
Table 2 - Notations dans EBNF et Xtext (Yue 2014) .....	43
Table 3 - Les 13 relations possibles dans l'algèbre de Allen.....	53
Table 4 -Les 11 relations entre semi-intervalles (Freksa 1992).....	54

## Acronymes

<b>ADICO</b>	Attribute Deontic aIm Condition Otherwise
<b>AL</b>	Attributive Language
<b>ATN</b>	Augmented Transition Network
<b>CORBA</b>	Common Object Request Broker Architecture
<b>CTL</b>	Computation Tree Logic
<b>DL</b>	Description Logic
<b>DSM</b>	Domain-Specific Model
<b>DSML</b>	Domain-Specific Modeling Language
<b>DTD</b>	Document Type Definition
<b>EAC</b>	Evènement-Condition-Action
<b>EMF</b>	Eclipse Modeling Framework
<b>GEMS</b>	Generic Eclipse Modeling System
<b>GME</b>	Generic Modeling Environment
<b>GMF</b>	Generic Modeling Framework
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>IDM</b>	Ingénierie Dirigée par les Modèles
<b>ITL</b>	Interval Temporal Logic
<b>Kermata</b>	Kernel Metamodeling
<b>KMA</b>	Knowledge Management Agent
<b>KM3</b>	Kernel MetaMetaModel
<b>LHS</b>	Left Hand Side
<b>LPA</b>	Learning and Planning Agent
<b>LTL</b>	Linear Temporal Logic
<b>MAO</b>	Multi-Agent Organizational
<b>MDA</b>	Model Driven Architecture
<b>MGC</b>	Module de Gestion des Composants
<b>MOCA</b>	Modèle Organisationnel et Componentiel pour les systèmes multi-Agents
<b>MOF</b>	Meta-Object Facility
<b>OcEAN</b>	Ontology, Commitments, Authorizations, Norms
<b>OCL</b>	Object Constraint Language
<b>OMA</b>	Organization Manager Agent
<b>OMNI</b>	Organizational Model for Normative Institutions
<b>OMG</b>	Object Management Group
<b>OperA</b>	Organizations per Agents
<b>ORB</b>	Object Request Broker
<b>OWL</b>	Web Ontology Language
<b>PIM</b>	Platform Independant Model
<b>PSM</b>	Platform Specific Model
<b>PSTL</b>	Propositional Spatio-Temporal Logic
<b>QVT</b>	Query / View / Transformation

<b>RHS</b>	Right Hand Side
<b>RCC</b>	Region-Connection-Calculus
<b>SIMAS</b>	Spatialized Institutional Multi-Agent System
<b>SMA</b>	Systèmes Multi-Agents
<b>STCC</b>	SpatioTemporal Constraint Calculus
<b>TOPCASED</b>	Toolkit in Open Source for Critical Applications & Systems Development
<b>UML</b>	Unified Modeling Language
<b>URI</b>	Uniform Resource Identifier
<b>VOI</b>	Vondron'Olona Ifotony
<b>XMI</b>	XML Metadata Interchange
<b>XML</b>	eXtensible Markup Language

# Sommaire

<b>Remerciements.....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste de Figures.....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>vi</b>
<b>Acronymes.....</b>	<b>vii</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>ix</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1. La problématique de la gestion des ressources.....	1
2. Usage de la simulation SMA.....	1
3. Problématique et contribution .....	3
4. Plan de la thèse.....	4
<b>Chapitre 1 ETAT DE L'ART ET SYNTHESE .....</b>	<b>5</b>
1.1 Méthodologie de comparaison.....	5
1.2 SMA institutionnels .....	5
1.2.1 L'institution selon les sciences sociales .....	5
1.2.2 L'institution selon les SMA.....	7
1.2.3 Quelques SMA institutionnels.....	8
1.2.4 Synthèse .....	11
1.3 SMA organisationnels.....	11
1.3.1 L'organisation selon les sciences sociales.....	11
1.3.2 L'organisation selon les SMA .....	11
1.3.3 Quelques SMA organisationnels .....	13
1.3.4 Synthèse .....	20
1.4 SMA normatifs .....	20
1.4.1 Les SMA normatifs dans la littérature .....	20
1.4.2 Synthèse .....	28
1.5 Norme .....	29
1.5.1 La norme selon les sciences sociales .....	29
1.5.2 La norme selon les SMA.....	29
1.5.3 Typologie des normes et leurs structures .....	30
1.5.3.1 Norme régulatrice .....	30
1.5.3.2 Norme constitutive.....	32
1.5.4 Synthèse .....	33
1.6 Conclusion.....	33
<b>Chapitre 2 OUTILS ET METHODE .....</b>	<b>37</b>
2.1 Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) .....	37
2.1.1 Syntaxe abstraite .....	41
2.1.2 Syntaxe concrète .....	42
2.1.3 Sémantique.....	43
2.2 Logique de description .....	44
2.2.1 Définition .....	45

2.2.2	Syntaxe et sémantique.....	45
2.2.2.1	La description de concepts.....	46
2.2.2.2	La terminologie (TBox).....	47
2.2.2.3	La description du monde (ABox).....	47
2.2.3	Synthèse.....	48
2.3	Logique et algèbre temporelles.....	48
2.3.1	Linear Temporal Logic (LTL).....	49
2.3.2	Computation Tree Logic (CTL).....	49
2.3.3	CTL*.....	50
2.3.4	Interval Temporal Logic (ITL).....	51
2.3.5	L'algèbre des intervalles.....	53
2.3.6	Le raisonnement temporel basé sur le semi-intervalle.....	53
2.3.7	Algèbre temporelle basée sur les instants.....	54
2.3.8	Synthèse.....	54
2.4	Logique et algèbre spatiales.....	55
2.4.1	Le Oriented Point Relation Algebra (OPRAM).....	55
2.4.2	Le Region-Connection-Calculus RCC-8.....	55
2.4.3	Spatiotemporal Constraint Calculus (STCC).....	56
2.4.4	Propositional Spatio-Temporal Logic (PSTL).....	56
2.4.5	Synthèse.....	57
2.5	Conclusion.....	57
<b>Chapitre 3</b>	<b>PROPOSITION DE MODELE D'INSTITUTION.....</b>	<b>58</b>
3.1	Les objets.....	58
3.2	Les institutions.....	60
3.2.1	Les méta-concepts.....	61
3.2.2	La logique de description (DL).....	61
3.2.2.1	Les concepts.....	62
3.2.2.2	Les assertions.....	65
3.2.2.2.1	Les assertions de la TBox.....	65
3.2.2.2.2	Les assertions de l'ABox.....	65
3.2.2.2.3	Les normes constitutives.....	66
3.2.2.3	La sémantique de la logique de description proposée.....	68
3.2.3	Les normes.....	71
3.2.3.1	Forme générale.....	71
3.2.3.2	Les conditions.....	72
3.2.3.2.1	Méthodologie utilisée : langage du premier ordre.....	72
3.2.3.2.2	Le méta-modèle des conditions.....	73
3.2.3.3	La sémantique des conditions.....	79
3.3	Les organisations.....	82
3.4	Conclusion.....	83
<b>Chapitre 4</b>	<b>IMPLEMENTATION.....</b>	<b>84</b>
4.1	Cas d'étude : gestion forestière à Madagascar.....	84
4.2	Syntaxe concrète.....	91

4.2.1	Le domaine de discours.....	91
4.2.2	Les institutions .....	93
4.2.3	Les organisations.....	94
4.2.4	Les méta-concepts et les concepts.....	96
4.2.5	Les normes constitutives .....	96
4.2.6	Les normes .....	97
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>		<b>101</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>103</b>
<b>Glossaire .....</b>		<b>108</b>
<b>Annexes.....</b>		<b>109</b>

# INTRODUCTION

## 1. La problématique de la gestion des ressources

Le socio-écosystème consiste en un système humain en interaction avec un écosystème qui est l'environnement dans lequel il se trouve. Cet écosystème comprend toutes les ressources végétales et animales existant dans les différentes structures de gestion dans lesquelles interagissent les gens dans une société. Le socio-écosystème implique par conséquent plusieurs acteurs interconnectés. La mise en relation des acteurs peut et doit avoir lieu à différentes échelles : locales, régionales, nationales et même internationales, impliquant des interactions « horizontales » et « verticales » entre institutions et organisations (Couvet et Teyssèdre 2013). Le plan de gestion adapté à un tel système se doit ainsi de gérer cette insertion des gens dans de multiples organisations, sachant que chaque action effectuée dans le système peut avoir des impacts écologiques, économiques et sociales.

## 2. Usage de la simulation SMA

La contribution appartient au domaine des Systèmes Multi-Agents (SMA) qui constituent une branche très prometteuse de l'Intelligence Artificielle, plus particulièrement de l'Intelligence Artificielle Distribuée, et qui sont des systèmes composés d'entités intelligentes et autonomes appelés agents capables d'interagir entre eux, et possiblement avec un environnement. Les règles qui régissent les comportements de ces entités sont les normes, qui sont définies dans les institutions, lesquelles seront modélisées dans cette thèse.

Les SMA permettent ainsi de représenter cette dynamique multi-institutionnelle dans le socio-écosystème, et d'évaluer l'impact des plans de gestion. En particulier, les SMA organisationnels sont utilisés lorsque les agents sont conçus pour se conformer à des organisations, les SMA institutionnels sont utilisés lorsque les agents sont conçus pour se conformer à des institutions, et les SMA normatifs sont utilisés lorsque les agents sont conçus pour se conformer à des normes.

En prenant le cas de Madagascar, la gestion forestière décentralisée demande de pouvoir apprécier l'impact de nouveaux plans de gestion sur la durabilité du développement des communautés locales concernées dans le contexte d'un ensemble de réglementations formelles et informelles déjà existantes. Pour ce faire, différents modèles ont été développés pour explorer le comportement de communautés à différentes échelles, soumis à une variété de contextes réglementaires. Ces modèles ont été l'occasion de concevoir une première architecture de représentation et de simulation des dynamiques sociales introduisant les notions d'institution, d'organisation, d'individu, d'activité et de ressource (physique et spatiale). Pour réaliser des modèles sur le transfert de gestion aux communautés locales aux échelles villageoises et communales, une architecture appelée Faritra a été développée utilisant les concepts de territoires, de normes et d'institutions dont nous partirons. On admet par hypothèse que l'institution inclut les normes. Le territoire dans Faritra définit la zone géographique soumise aux normes constitutives d'une institution particulière. Chaque individu est ainsi soumis aux normes de l'institution à laquelle il appartient, et à celles des institutions liées aux territoires dans lesquels il agit. D'un côté l'architecture Faritra n'a pas été entièrement formalisée et ne

couvre pas l'ensemble des normes qui nous intéressent pour les applications à la gestion durable des ressources. De l'autre côté, les Systèmes Multi-Agents (SMA) proposent souvent des outils théoriques qui ont été rarement appliqués sur des problématiques concrètes et qui attendent d'être validés, voire adaptés.

Le modèle MIRANA (Aubert, Müller, et Ralihalizara 2010) et le modèle HINA sont basés sur Faritra. MIRANA décrit à l'échelle de la communauté locale les acteurs, les objets sur lesquels ils agissent, les actions, et les régulations sachant qu'une norme est constituée du rôle de l'objet, de celui du sujet et des permissions / obligations / interdictions pour le sujet de faire quelque chose sur l'objet. HINA décrit cette structure à l'échelle communale.

Les notions suivantes constituent les principaux concepts de base utilisés dans Faritra :

- **L'institution et l'organisation :** Dans Faritra, une institution est un ensemble de normes constitutives et de normes régulatrices. Une organisation est un groupe de personnes ou une personne morale auquel s'appliquent les normes. Les normes constitutives définissent les significations des mots utilisées dans les normes régulatrices. Les normes sont matérialisées par les règles. Dans une institution, une norme établit la relation entre deux rôles qui peuvent être attribués aux sujets des ordres normatifs (parties prenantes) ou aux objets des ordres normatifs (ressources). Une institution contrôlée par une personne morale fournit non seulement sa structure, mais aussi les moyens pour les assurer. Les institutions considérées dans le modèle conceptuel sont l'administration forestière, l'administration du parc, la commune, le VOI (Vondron'Oloha Ifotony), les communautés traditionnelles, l'écosystème qui guide les actions des participants, l'utilisation des contrats (institution temporaire) et le marché illégal (institution empirique).
- **Le territoire :** définit la zone géographique soumise aux normes constitutives d'une institution particulière. On distingue le territoire administratif, le territoire de l'état et le territoire coutumier. Un participant peut participer simultanément à plusieurs institutions, et peut être localisé sur plusieurs territoires en même temps.
- **Les ressources :** sont des objets matériels ou des atouts intangibles. Les normes constitutives des institutions et les ontologies des participants définissent les rôles pouvant être attribués aux ressources. Les ressources peuvent être créées, détruites, elles peuvent se reproduire, disparaître, augmenter, selon leurs rôles et leur connexion à la perspective écologique. Les ressources sont classées en deux catégories dans Faritra : les ressources matérielles (situées dans l'espace) et les ressources immatérielles (associées aux parties prenantes).
- **Les agents :** Dans Faritra, les agents sont des humains, actifs, individuels ou collectifs, et agissent pour satisfaire leurs besoins, pour tirer profit, ou pour gérer les ressources naturelles renouvelables. Les entités considérées sont : les foyers, les associations communautaires locales (VOI), l'administration de forêt, la commune (administration territoriale) et l'administration du parc. Un agent peut participer simultanément à plusieurs institutions, et peut être localisé sur plusieurs territoires en même temps. Chaque individu est ainsi soumis aux normes de l'institution à laquelle il appartient, et à celles des institutions liées aux territoires dans lesquels l'individu agit.

L'architecture Faritra a été appliquée à l'échelle communale à travers le modèle HINA, qui repose donc sur les mêmes concepts mais à une échelle différente.

### 3. Problématique et contribution

Étant donnée la structure réelle des règlements dans la gestion forestière faisant intervenir plusieurs facteurs tels que leur période de validité, les lieux impliqués, etc., le modèle de norme dans Faritra ne peut pas les décrire entièrement et est limité aux descriptions du rôle de l'objet et du rôle du sujet sous la forme d'une permission, obligation ou interdiction pour le sujet de faire une action sur l'objet.

C'est dans cette optique que cette thèse propose un modèle d'institution capable de gérer les normes applicables à un agent compte tenu de sa position sociale, sa position temporelle et sa position spatiale. En effet, la gestion du socio-écosystème nécessite de prendre en compte la dimension spatio-temporelle à travers les normes. Le modèle formel de SMA institutionnels proposé vise à représenter la structure et le fonctionnement des institutions dans les socio-écosystèmes en général, notamment les normes dans les institutions avec leur dimension spatio-temporelle.

Pour cela, cette étude doit faire la synthèse des travaux effectués concernant la modélisation institutionnelle (représentation du vocabulaire et des normes), organisationnelle (structuration institutionnelle des groupes d'individus) et normative (structure des normes elles-mêmes) dans le domaine des SMA : les faits institutionnels (ce que des institutions considèrent comme vrais), les types de normes existantes (régulatrices, institutionnelles, etc.), les conditions applicables sur les normes, les relations entre les normes et les faits institutionnels.

Nous allons donc chercher à formaliser et à étendre les propositions existantes de modèles sur la structure des institutions, des organisations et des normes dans les SMA pour intégrer la dimension spatio-temporelle. Il est par conséquent attendu que la formalisation de Faritra sera systématisée étant donné que le domaine d'application du projet est étendu.

Notre proposition de modèle de SMA institutionnel et de norme avec une dimension spatio-temporelle sera validée par un outil permettant de rendre compte de ce qui s'impose à un individu en termes d'obligations, opportunités et contraintes en fonction de sa situation géographique, temporelle et sociale. Ainsi un décideur pourra décrire l'ensemble des institutions et organisations structurant les obligations, opportunités et contraintes sur le territoire, dans le temps et en fonction des rôles sociaux. Il sera ainsi possible de savoir quelles normes s'appliquent à un individu en fonction de son contexte spatial, temporel et social. Le résultat attendu est ainsi un modèle conceptuel intégratif des systèmes socio-environnementaux multi-institutionnels. Ce modèle conceptuel permettra de rendre compte de toute la complexité des jeux institutionnels et de fournir un outil aux décideurs pour explorer les conséquences multi-scalaires des nouvelles réglementations mises en œuvre dans un contexte multi-institutionnel. Le logiciel qui concrétisera ce modèle sera développé avec le langage orienté objet Java qui est multiplateforme et open-source. On modélisera en application le système de la gestion forestière à Madagascar afin de permettre aux décideurs d'analyser de manière précise les problèmes des socio-écosystèmes et de simuler divers scénarios de plans de gestion pour en trouver les meilleures solutions.

La stratégie de recherche consiste à décrire, à décomposer et à formaliser les normes régulatrices et les normes constitutives. Ces descriptions peuvent nécessiter d'autres facteurs comme les conditions dans lesquelles les normes sont établies, selon l'analyse des situations réelles qui devrait être effectuée au préalable. Ce travail se basera d'une part sur les formalisations proposées dans le domaine des SMA institutionnels, et d'autre part sur les besoins de modélisation de systèmes institutionnels décrits, par exemple, par les juristes.

## **4. Plan de la thèse**

Dans le premier chapitre, nous allons établir l'état de l'art sur l'institution, l'organisation et les normes, pour pouvoir tenir compte des différents concepts proposés dans les SMA institutionnels, organisationnels ou normatifs, et pour pouvoir choisir la terminologie utilisée dans la thèse. Dans le chapitre 2, nous allons décrire les outils et les méthodes utilisés pour établir le modèle voulu et pour pouvoir l'implémenter. La proposition ainsi obtenue sera détaillée dans le chapitre 3, notamment la syntaxe abstraite du langage dédié basée sur notre proposition de logique ainsi que sa sémantique. L'implémentation de la syntaxe concrète de ce langage dédié et le prototype obtenu seront décrits dans la partie 4 avant de conclure et de donner les perspectives envisageables.

# Chapitre 1

## ETAT DE L'ART ET SYNTHÈSE

### 1.1 Méthodologie de comparaison

Afin de pouvoir comparer les différentes structures dans la littérature sur les institutions, les organisations et les normes, nous avons choisi d'illustrer les différentes propositions par des méta-modèles utilisant des diagrammes de classes, décrivant les concepts mis en relief et leurs relations selon les propositions. En effet, on remarque que différents formalismes ont été utilisés pour décrire les SMA dans la littérature, tels que la logique formelle, l'object-Z, les ontologies, etc. d'où le besoin d'adopter un formalisme uniforme pour mieux comparer.

Selon les structures des agents qu'il contient, un SMA est qualifié de SMA institutionnel lorsque les agents ont été conçus pour se conformer à une institution. Le SMA organisationnel est un système où les agents ont été conçus pour jouer des rôles dans une organisation, et le SMA est dit normatif lorsque les agents ont été conçus pour se conformer aux normes.

Afin de pouvoir proposer notre modèle de SMA institutionnel capable de représenter un socio-écosystème, nous avons besoin d'étudier la bibliographie sur les SMA institutionnels afin de dégager une vue détaillée sur la structure des institutions en général et leur fonctionnement, l'état de l'art sur les SMA organisationnels permettra ensuite d'établir le possible lien entre institution et organisation, et l'étude bibliographique sur les SMA normatifs et les normes permettra d'avoir une vue globale sur la structure et l'utilisation des normes en général et des éléments nécessaires pour qu'une norme puisse être adaptée au socio-écosystème.

### 1.2 SMA institutionnels

#### 1.2.1 L'institution selon les sciences sociales

La notion d'institution a été utilisée depuis longtemps dans les sciences sociales. Il y a d'abord la définition de l'institution relativement à un système social, par l'ensemble des règles de comportements qui régissent les membres de ce système.

(Therborn 2002) définit l'institution par un complexe délimité de normes, distingué en deux types selon la régulation de leurs actions :

- soit les membres sont libres d'adopter leurs stratégies et d'agir en fonction de ces stratégies : on parle de jeux compétitifs ou structures normatives de maximisation (ex : la société civile, le marché, etc.)
- soit ils sont contraints de respecter les séquences d'action prescrits par les normes : on parle dans ce cas de jeu de rôles (ex : la famille, le monde du travail, les représentations organisées comme l'association, le gouvernement dont les membres agissent selon ce qui est prescrit par les constitutions et les statuts prédéfinis).

Si (Mehta et al. 1999) décrit l'institution comme l'action de conférer des pouvoirs et de contraindre, (North 1991) la décrit comme les règles de jeu dans une société, ou encore les contraintes qui forment l'interaction humaine dont les contraintes informelles ou les règles formelles, conçues pour structurer les interactions politiques, économiques et sociales. Ainsi, l'état du système est dirigé par la structure et l'évolution des institutions. Elles visent à créer l'ordre et à réduire l'incertitude dans les échanges. En matière d'économie, elles déterminent les coûts de production et des transactions et les faisabilités concernant les engagements dans des activités économiques. Les institutions fournissent la structure de l'économie et leurs évolutions dirigent celle de l'économie. L'évolution institutionnelle peut entraîner non seulement l'augmentation de la productivité mais peut aussi améliorer la protection et la mise en pratique des droits de propriété par l'état. La structure des institutions imposée par l'état est donc la base de l'évolution de l'économie d'un pays, elle peut entraîner des crises selon la réussite de l'institution.

Les règles de l'institution ont été conçues en vue de maintenir l'ordre dans ce système et de contribuer au respect des buts collectifs. (Uphoff 1986) décrit l'institution comme un ensemble de normes et de comportements contribuant au respect des buts collectifs. (Crawford et Ostrom 1995) introduit la notion de déclaration institutionnelle pour définir une contrainte linguistique partagée décrivant les actions permises. Il s'agit de déclaration orale, écrite ou comprise par les acteurs, interprétant ainsi les contraintes. Cette proposition de grammaire des institutions distingue les stratégies, les règles et les normes comme composants principaux d'une institution. Ce formalisme décrit les caractéristiques relatives à l'action citée dans la déclaration institutionnelle et tient compte des actions déontologiques, des conditions relatives aux actions et des sanctions relatives aux violations.

(Searle 1995) définit une institution par l'ensemble des règles établies dans un système ou normes régulatrices, et des règles qui définissent les activités dans le système ou normes constitutives. Dans l'usage classique, l'Encyclopédie Universalis définit une institution par l'ensemble des lois qui régissent une cité : la manière dont les pouvoirs publics et privés s'y trouvent répartis, les sanctions et les ressorts qui mettent en œuvre leur exercice régulier. Les sociologues durkheimiens affirment que les institutions doivent être traitées comme des "choses", et une institution se reconnaît à son caractère contraignant. Le fondement moral de la contrainte institutionnelle revêt deux formes principales : le respect et l'autonomie.

Les institutions mentionnées dans (Pahl-Wostl 2009) sont utilisées dans la modélisation de modes de gouvernance et représentent les règles de comportement des acteurs. Elles peuvent être formelles ou informelles selon la nature des processus de développement, la communication et la mise en pratique. Les institutions formelles sont liées aux chaînes de bureaucraties gouvernementales. Elles sont mises en pratique par des procédures légales. Les institutions informelles sont les règles sociales partagées, comme les normes sociales ou culturelles. Souvent, elles ne sont pas écrites. Les institutions formelles peuvent être efficaces ou non, un exemple de mesure du degré d'efficacité est l'importance de la corruption. Les buts des institutions formelles et informelles peuvent être compatibles ou en conflit. Dans le cas idéal, les institutions formelles sont efficaces et les buts des institutions formelles et informelles sont compatibles. Dans d'autres cas, les institutions formelles sont inefficaces, et leurs buts sont en conflit avec les institutions informelles. Une telle gouvernance possède un degré élevé de corruption et les structures de force établies dominent. Scott (Scott 2013) a classé les institutions selon 3 types : régulatrices (ce qui est formellement permis et ce qui ne l'est pas), normatives (ce qui est correct et ce qui est incorrect selon les standards admis dans la société), et culturel-cognitives (ce qui est pensable et ce qui ne l'est pas). Les institutions régulatrices sont identifiées par des structures et des règles légales formelles. Les institutions normatives sont identifiées par des normes informelles dans la société, reconnues mais qui ne sont pas contenues dans des règles. Contrairement aux

institutions régulatrices, le changement des institutions n'est pas basé sur les négociations ni sur les accords formels, mais sont plus graduels et émergents. Les institutions culturel-cognitives sont identifiées par des paradigmes, des modèles mentaux qui influencent la compréhension du système. L'espace de recherche des solutions est déterminé. Le changement des institutions se manifeste par des pratiques communes. Dans les régimes gouvernementaux, les acteurs liés ou non à l'état participent à la modélisation des institutions qui gouvernent leur comportement. Ceci réduit la distinction entre les institutions formelles et informelles. Une telle communauté est capable d'auto-organisation et d'auto-gouvernance. L'inclusion d'acteurs dans la modélisation des institutions formelles peut augmenter l'efficacité et la conformité, mais peut par contre réduire l'efficacité si les processus consomment trop de ressources.

## 1.2.2 L'institution selon les SMA

Dans les SMA, on distingue la notion d'institution et celle d'institution électronique. Ce sont deux notions différentes dont la différence est établie ci-après.

L'institution en général définit :

- soit une entité : une entité délibérément conçue pour définir des règles explicites, des procédures et peut-être des obligations à exécuter par des agents rationnels, appliquer des obligations aux moyens des encouragements et sanctions, et contrôler leur exécution (Conte 2001);
- soit un groupe social organisé dans un but commun (Demolombe et Louis 2006) ;
- soit un ensemble de normes : un ensemble de normes qui doivent être appliquées par un ensemble d'agents internes (Aldewereld et al. 2007), ou un ensemble de fonctions statuts, ces derniers étant des positions déontiques exprimant des autorisations et des obligations, imposés à un agent et reconnus par un ensemble d'agents (Viganò et Colombetti 2007) ;
- soit un ensemble de concepts partagés et de règles (Fornara, Viganò, et Colombetti 2004): l'institution est constituée d'une ontologie définissant les principaux concepts qu'elle utilise, de l'ensemble des autorisations des agents à effectuer des actions institutionnelles, et de l'ensemble des normes auxquelles sont soumis les agents dans le système. On parle dans ce cas de structures et de mécanismes d'ordre social et de coopération qui dicte le comportement des agents (Criado, Argente, et Botti 2011).

L'institution électronique en particulier représente un système d'organisation d'agents dans lequel les activités sont des activités dialogiques, définissant les normes auxquelles sont soumis les agents à travers la structure de son organisation. En effet, l'institution électronique (Esteva 2003) modélise une organisation d'agents et définit les règles du jeu dans une société d'agents par les actions permises aux agents et leurs conséquences. Elle se caractérise par le fait que les activités dans l'institution sont structurées par des conversations que peuvent avoir les agents et le contexte d'interprétation de l'information. L'institution électronique est décrite par les 4 éléments basiques suivants :

- La structure de dialogue qui définit les rôles participants à l'institution et les relations entre eux. L'ensemble de plusieurs activités dialogiques distinctes forment les activités qui peuvent inclure plusieurs groupes d'agents jouant plusieurs rôles ;
- Les scènes : les interactions entre agents, modélisés par les interactions entre les rôles se font dans des réunions de groupes d'agents appelés scènes. L'entrée / la sortie dans une scène à tout moment dépend du rôle de l'agent ;

- Les structures performatives : une activité représentée par une structure performative est une collection de multiples scènes concurrentes. Un agent passe d'une scène à l'autre, et est soumis aux règles gérant les relations entre ces scènes, il peut participer à plusieurs scènes simultanément. Les scènes qui servent de routeurs entre 2 scènes consécutives sont nommées transitions. Les structures performatives définissent les contraintes inter-scènes : représentent des réseaux de scènes et définissent quelles sont les scènes qui peuvent être atteintes par un ou plusieurs rôles ; et intra-scènes : les rôles déterminent les engagements, les obligations et les droits des agents participants ;
- Les normes : définissent soit des obligations (de faire certaines actions) que les agents doivent respecter suite à l'exécution de certaines actions, soit le chemin que l'agent peut suivre suite aux actions qu'il a effectuées. La norme est donc définie principalement par l'action qui peut l'activer, les obligations de l'agent, et les actions que l'agent doit effectuer.

### 1.2.3 Quelques SMA institutionnels

Rappelons qu'on qualifie de SMA institutionnel un SMA dont les agents sont conçus pour se conformer et agir dans des institutions.

- SIMAS (Muller et Aubert 2012) est un SMA institutionnel spatialisé qui se distingue par sa capacité à représenter les institutions du modèle MIRANA (Aubert, Müller, et Ralihalizara 2010), qui contient les éléments constitutifs d'un écosystème. La formalisation est décrite dans un point de vue institutionnel, et propose l'attribution des rôles à des objets, et la notion de territoire. En effet, cette proposition suppose qu'avoir un rôle est équivalent à être contextuellement catégorisé comme tel. L'institution est définie par une ontologie et un ensemble de normes régulatrices. La norme régulatrice est définie par une modalité déontique : permission, interdiction ou obligation, pour un agent jouant un certain rôle d'agent de faire une action sur une quantité d'objets jouant un certain rôle d'objet, dans un lieu jouant un certain rôle. SIMAS se distingue surtout par cette prise en compte de la dimension spatiale dans la formalisation de la norme.
- Le méta-modèle d'institution proposé par (Viganò et Colombetti 2007) dans la figure 1 se base sur la notion de fonction statut d'agent et décrit les événements institutionnels qui déterminent l'état de l'institution. La fonction statut d'agent désigne ici un ensemble de positions déontiques attribuées à un agent, dont les autorisations et les obligations. Une obligation est déclenchée par l'imposition d'une fonction statut, et possède un état qui détermine si ses conditions sont satisfaites ou si l'état final est atteint (accompli, violé, ou abandonné), selon les véracités de ses expressions (whenever, start, fulfillment, violation). L'entité institutionnelle possède un ensemble de fonctions statuts interdépendants, et les soumet à des contraintes. Les événements bas-niveau désignent les moindres changements dans le monde physique comme l'évènement temporel et l'échange de message qui représente la principale action dans les SMA. Ces événements bas-niveau déclenchent sous certaines conditions les événements institutionnels qui sont reconnus par un groupe d'agents. Une action est dite institutionnelle s'il y a une convention qui le déclare comme action institutionnelle, si les préconditions relatives à cette action sont vérifiées dans le système, et si l'agent est autorisé à effectuer cette action.

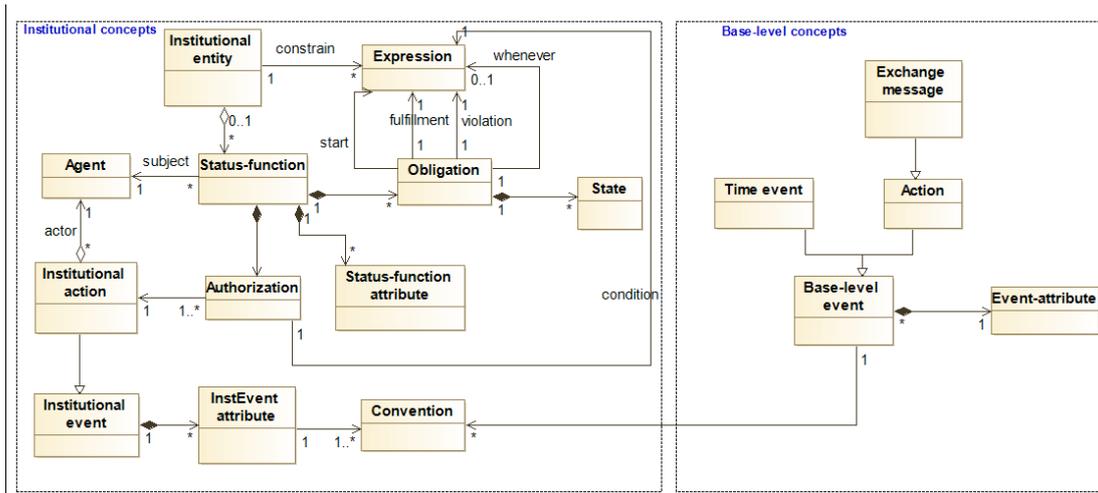


Figure 1 - Méta-modèle d'institution

- La figure 2 illustre le modèle de SMA institutionnel décrit dans (Aldewereld et al. 2010) qui met en relief l'existence de différents contextes dans les SMA : le contexte normatif et le contexte institutionnel.

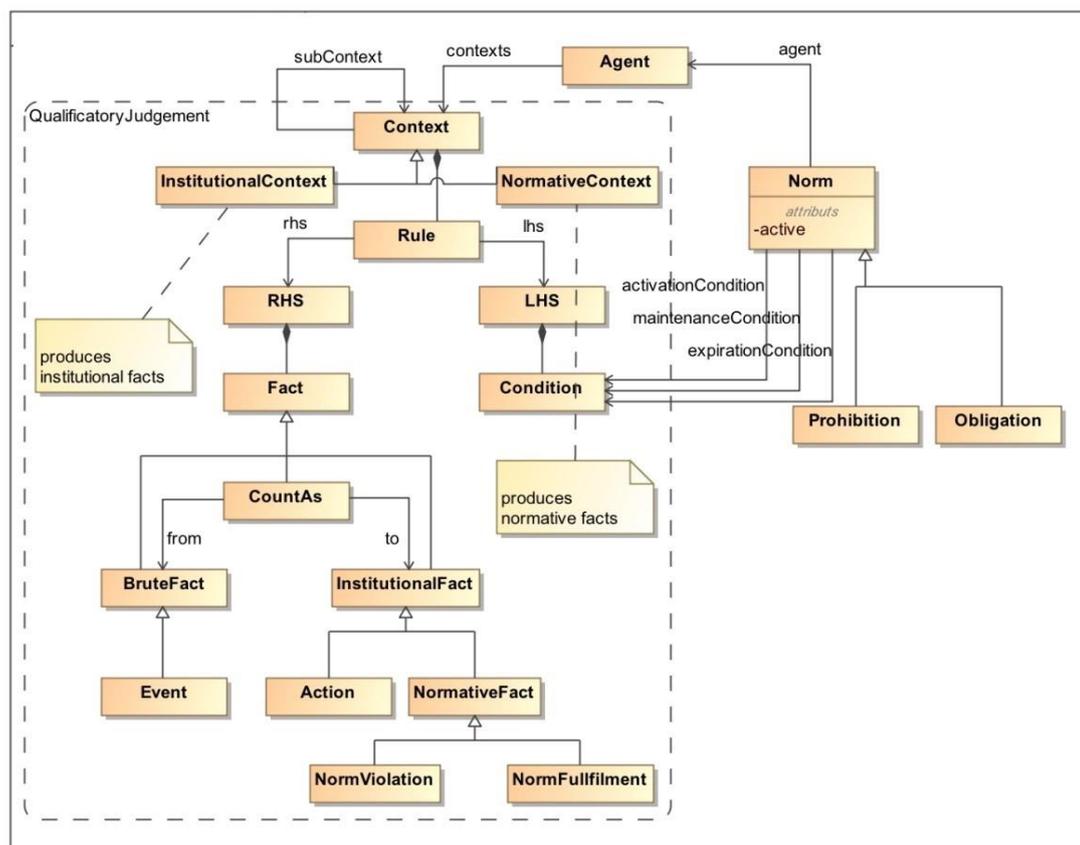


Figure 2 - Un méta-modèle de SMA institutionnel

Le contexte normatif détermine les actions correctes et par conséquent les normes applicables, tandis

que le contexte institutionnel détermine les événements institutionnels correspondant aux actions. Un contexte est constitué d'un ensemble de règles. Les normes applicables sont dépendantes des contextes dans lesquels se trouve un agent, et la relation « compter-comme » définit la correspondance entre les faits bruts qui représentent la réalité et les faits institutionnels, ainsi que les faits institutionnels aux faits normatifs. Toutefois, un contexte peut en contenir un autre et deux contextes différents peuvent se chevaucher. Le raisonnement normatif présenté ici se base sur un système de production ayant un ensemble initial de règles, de la forme *if LHS then RHS*, le *LHS* représente la condition de la norme, et le *RHS* la description de la norme qui est constituée de faits dont les faits bruts, les faits institutionnels ou les relations compter-comme. Le fait normatif et l'action sont des faits institutionnels car ils n'ont de sens que dans une institution précise. Une norme peut avoir des conditions d'activation, des conditions d'expiration et des conditions de maintenance.

- (Cliffe, De Vos, et Padget 2007) propose un méta-modèle (figure 3) de spécification des institutions de façon individuelle ou collective. L'institution est constituée d'un ensemble d'états institutionnels évoluant selon les événements institutionnels, chaque état étant constitué d'un ensemble d'« occurrences » institutionnelles pouvant être vraies à un certain instant et qui sont des occurrences du domaine ou des occurrences normatives (pouvoirs institutionnels, permission ou obligation).

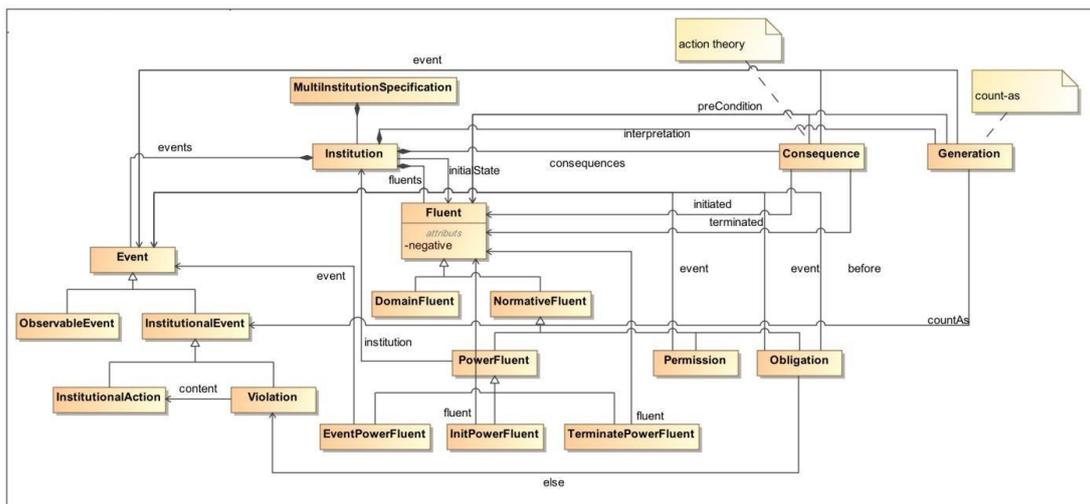


Figure 3 - Un méta-modèle sur le raisonnement sur les multiples institutions

Les événements observables traduisent ceux du monde physique et les événements institutionnels sont les événements rattachés à un contexte social. Dans le contexte de multi-institutions, on note l'existence de deux pouvoirs institutionnels : l'initialisation et la terminaison d'« occurrences », ces deux pouvoirs vont déterminer l'état prochain d'une institution par une autre institution. Les événements peuvent être observables lorsqu'ils sont déclenchés indépendamment de l'institution, ou institutionnels lorsqu'ils sont déclenchés dans le cadre de l'institution, à savoir la violation ou l'action institutionnelle. Des règles de génération associent la satisfaction de conditions à un événement et à l'événement institutionnel généré ; et des règles de conséquence associent la satisfaction de conditions et un événement, aux changements déclenchés à l'état suivant de l'institution. Les pouvoirs d'autorisation d'initialiser et de terminer les occurrences sont introduites pour permettre aux institutions de déterminer leurs états futurs.

## 1.2.4 Synthèse

En conclusion, les Sciences Sociales considèrent l'institution comme un moyen de maintenir l'ordre dans une société, à travers des contraintes concrétisées par des règles de comportements ou des lois. Dans ce sens, l'institution est un mode de gouvernance, représenté par une entité sociale qui délivre des règles auxquelles sont soumis ses membres. De même, les SMA admettent que l'institution est une entité composée de normes, qui sont des règles de comportements auxquelles sont soumis les agents membres.

Les différentes propositions de SMA institutionnel montrent que les événements qui se passent dans l'institution comme l'envoi de message entre agents, l'acquisition de rôle par un agent, etc. ou toute autre action institutionnelle déclenchent l'activation des normes qu'elle contient. Le contexte normatif est étroitement lié au contexte institutionnel car il permet de déterminer si une action institutionnelle est correcte ou non pour l'agent qui l'a effectuée, compte-tenu des normes auxquelles sont soumis les agents. Un SMA peut contenir de multiples institutions, et un agent peut se trouver dans plusieurs institutions à la fois, ce qui le soumet à un ensemble de normes contenus dans des institutions différentes. En bref, l'ontologie sur lequel repose les SMA institutionnels en général est caractérisée par le contexte, la norme, la règle, l'action, le fait, la condition.

Dans cette thèse, nous choisissons d'appeler institution une extension du contexte, ou encore un contexte particulier, qui est plus précisément un ensemble de normes, avec une terminologie, des concepts et des définitions. Dans ce sens, l'institution est une structure qui peut être réutilisée comme base pour différentes organisations, et il peut y avoir héritage et importation de caractéristiques entre institutions. L'héritage consiste pour l'institution fille d'hériter de l'institution mère toutes les normes que celle-ci possède, ainsi que ses concepts. Institution et Organisation sont souvent confondues, alors que ce sont des concepts différents qui ont toutefois quelques caractéristiques communes, que nous décrirons plus tard.

## 1.3 SMA organisationnels

### 1.3.1 L'organisation selon les sciences sociales

En général, les Sciences Sociales appellent organisation la façon d'organiser les membres d'une société. D'après (Mintzberg 1989), l'organisation représente l'ensemble des manières de diviser le travail en tâches distinctes et leur coordination. L'encyclopédie Universalis la décrit par un agencement déterminé du système social en sous-systèmes, qui manifeste les affinités structurales plus ou moins grandes existant entre ces sous-systèmes.

### 1.3.2 L'organisation selon les SMA

(Ferber, Gutknecht, et Michel 2003) définit une organisation par une possible instanciation d'une structure organisationnelle, qui consiste en des agents reliés entre eux, et dont l'aspect structurel consiste à la structuration des agents dans les groupes, les relations entre groupes, et les relations entre les rôles dans chaque groupe. En effet, la littérature définit souvent l'organisation par un modèle de coopération plus ou

moins formalisé (Boissier, Hübner, et Sichman 2006), une relation entre un ensemble d'agents et dont la description consiste en la manière dont les groupes et les rôles sont arrangés (Ferber et Gutknecht 1998). Structurée en fonction du modèle de la tâche à laquelle elle est assignée, l'organisation est constituée de l'ensemble des tâches et des sous-tâches à faire, de l'ensemble des agents dans l'organisation, de l'assignation des tâches à ces agents, du processus qui dicte la manière de distribuer les tâches et les sous-tâches, et optionnellement un ensemble de ressources et un ensemble de contraintes d'utilisation de ces ressources selon (So et Durfee 1993).

Dans la conception de SMA organisationnel, deux points de vue distincts peuvent être en jeu : le point de vue centré agent et le point de vue centré organisation. Le point de vue centré agent considère l'agent comme le moteur de l'organisation, et cette dernière existe comme un phénomène émergent du modèle de conception des agents.

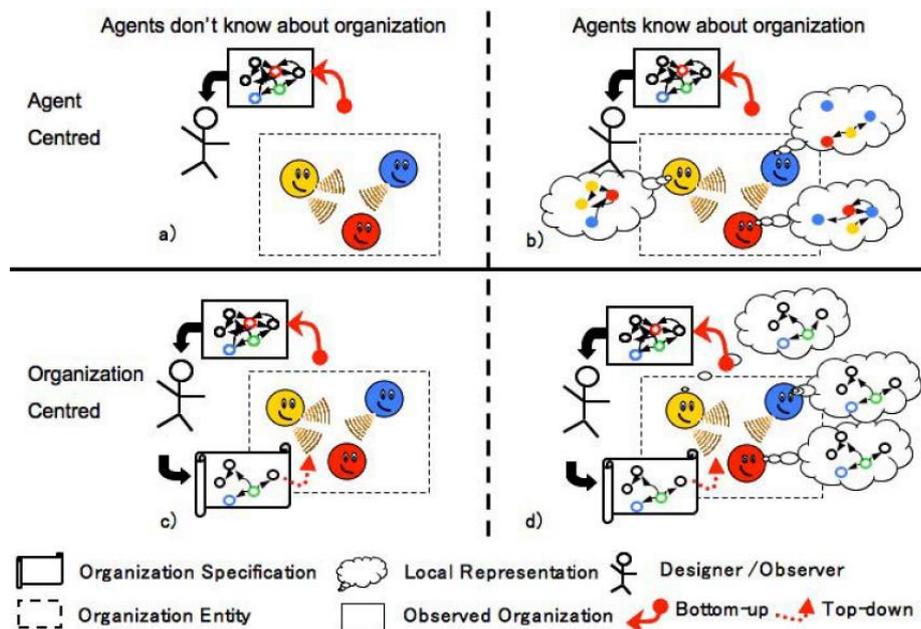


Figure 4 - Vue compréhensive des organisations dans le SMA (Boissier, Hübner, et Sichman 2006)

Dans le point de vue centré organisation, l'organisation est définie explicitement dans le système. Le modèle de coopération est conçu de manière descendante et de façon à contraindre les comportements des agents. Dans les deux cas, les agents peuvent être conscients ou non de l'existence de l'organisation. La figure 4.a décrit le cas du point de vue centré agent, dans lequel les agents ne savent rien de l'organisation. Dans la figure 4.b, les agents sont conscients de l'existence de l'organisation, et ont une représentation conceptuelle malgré que le système est centré agent. Le cas 4.c montre un système centré organisation, dans lequel les agents ne connaissent pas l'existence de l'organisation, mais agissent malgré tout suivant les contraintes organisationnelles qui sont codées intégralement en eux. Le cas 4.d représente un système centré organisation, dans lequel les agents savent l'existence de l'organisation, et agissent consciemment selon la structure organisationnelle définie (Boissier, Hübner, et Sichman 2006).

### 1.3.3 Quelques SMA organisationnels

Divers modèles d'organisation d'agents ont été proposés dans la littérature.

- Aalaadin (Ferber et Gutknecht 1998) est un modèle organisationnel caractérisé par les concepts d'agent, de groupe et de rôle.

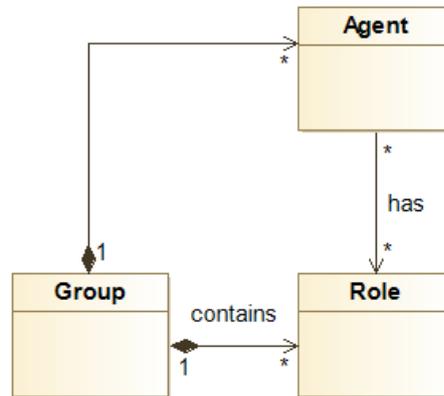


Figure 5 - Structure du modèle Aalaadin

Un agent joue des rôles dans des groupes. Le groupe est constitué d'un ensemble d'agents et d'un ensemble de rôles. La structure organisationnelle du système est constituée par l'ensemble des structures de groupes, reliés par un graphe. La structure du méta-modèle Aalaadin est représentée dans la figure 5.

- L'approche MAO (Multi-Agent Organizational) (Lemaître, Excelente, et El Fallah-Seghrouchni 1999) qui est une approche descendante centrée organisation se base sur les MAO qui sont des groupes d'agents ayant des buts communs et qui sont gouvernés par l'organisation humaine.

Un MAO est structuré en 2 niveaux hiérarchiques, le niveau supérieur contient l'Agent Directeur qui est l'assistant du directeur dans l'organisation humaine correspondante, le second niveau contient 4 types d'agents :

- o le *Organization Manager Agent (OMA)* ou agent gestionnaire d'organisation qui gère les agents, les rôles, les différentes tâches et les travaux des groupes ;
- o le *Certification Agent* est l'agent qui se charge de la gestion des clés de sécurité privés et publics nécessaires à la sécurisation des messages reçus des agents MAO ;
- o le *Knowledge Management Agent (KMA)* ou agent gestionnaire de connaissance se charge de gérer les répertoires de stockage des différents types de connaissances enregistrés ;
- o le *Learning and Planning Agent (LPA)* est l'agent chargé de l'apprentissage et de la planification et détecte les problèmes de performance de la base de données, cherche, propose et applique des solutions.

Ainsi, on distingue 5 types de rôles possibles pour un agent MAO. Le méta-modèle de l'architecture MAO est décrit dans la figure 6. MAO et Aalaadin sont des méthodes de conception de SMA qui organisent les agents par des groupes. Dans la méthodologie Aalaadin, chaque groupe contient des agents pouvant avoir chacun des rôles spécifiques, tandis que dans l'approche MAO, chaque organisation est un groupe d'agents possédant des buts communs et représentant une organisation

humaine.

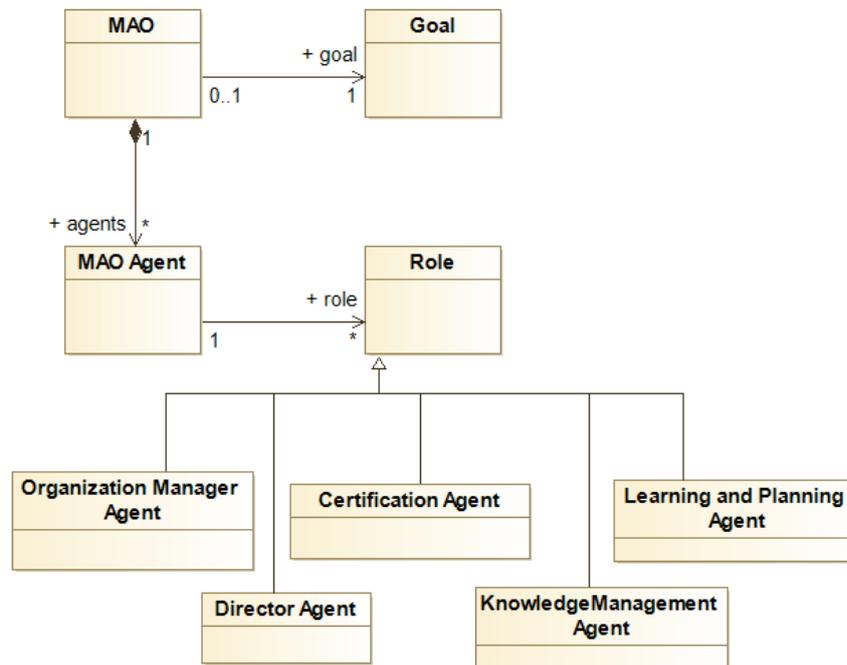


Figure 6 - Méta-modèle de l'architecture de MAO

Tous les MAO ont la même structure, contrairement aux groupes dans Aalaadin. Les MAO diffèrent ainsi selon les buts prévus pour chaque instance.

- Le modèle Moïse (Hannoun et al. 2000) est un modèle d'organisation de SMA qui met l'accent sur la structure des composants du système, plutôt que sur son fonctionnement. En effet, il est basé sur la notion de structure organisationnelle qui est définie par un ensemble de rôles, un ensemble de liens et un ensemble de groupes. Plusieurs structures organisationnelles peuvent gérer les agents d'un système. Moïse+ (Hübner, Sichman, et Boissier 2002) a été introduit pour pallier à ce manque de description de fonctionnalité, et a été conçu en tenant compte de la structure de l'organisation et de son fonctionnement. Il intègre 3 modules : la spécification structurelle, la spécification fonctionnelle et la spécification déontologique (gestion de la contrainte de temps) :

✧ *Spécification Structurelle* : décrit les rôles, leurs relations, et les groupes dans lesquels ils se trouvent, à travers les trois niveaux suivants :

- Niveau individuel : décrit les rôles dans l'organisation, les relations d'héritage entre les rôles, et le rôle abstrait qui décrit des spécifications de rôle.
- Niveau social : décrit les liens entre rôles, un lien peut être de type *acq*(connaissance) si l'agent jouant le rôle source peut avoir une représentation des agents jouant le rôle destinataire, *com*(communication) si l'agent jouant le rôle source peut communiquer aux agents jouant le rôle destinataire, ou *aut*(autorisation) si l'agent jouant le rôle source a une autorité sur les agents jouant le rôle destinataire.
- Niveau collectif : décrit les compatibilités entre rôles. Sachant qu'un rôle ne peut être joué qu'à l'intérieur d'un groupe, des liens intra-groupes et inter-groupes définissent les liens entre les agents d'un groupe selon leurs rôles.

✧ *Spécification Fonctionnelle* : basée sur le concept de mission qui est un ensemble de buts

globaux cohérents, et de plan global qui décompose chaque but via les opérateurs de séquence, de choix ou de parallélisme.

✧ *Spécification Déontologique* : décrit les permissions et obligations d'un rôle pour faire une mission en tenant compte de la contrainte de temps.

Le méta-modèle dans la figure 7 représente les concepts décrits dans Moïse+.

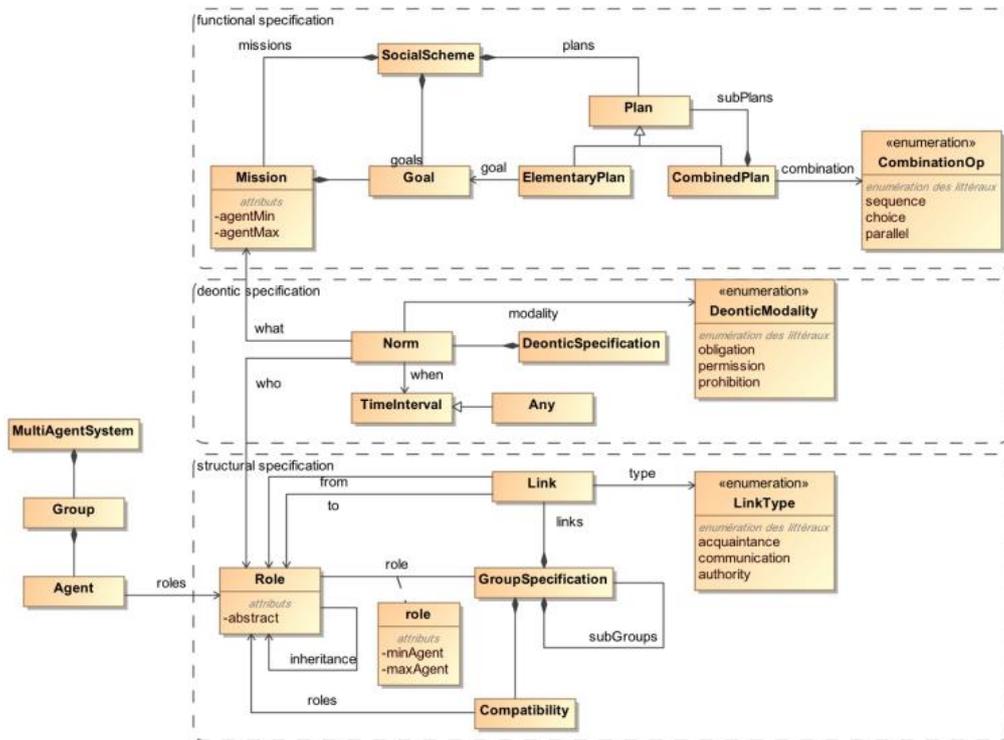


Figure 7 - Méta-modèle Moïse +

- MOCA (Modèle Organisationnel et Componentiel pour les systèmes multi-Agents) (Amiguet 2000) est un modèle componentiel dynamique pour les SMA organisationnels permettant la prise de rôles multiples dans un modèle de SMA organisationnel. MOCA est structuré en deux niveaux comme il est décrit dans la figure 8 : un niveau descriptif décrivant les comportements et interactions dans le système à l'aide des organisations, les types d'influence, les rôles, les compétences et le type d'agent ; et un niveau exécutif qui instancie les concepts du niveau descriptif. Dans le niveau descriptif, l'organisation est modélisée sous la forme d'un graphe de relations reliant des descriptions de rôles, chaque rôle et chaque relation ayant un nombre limité d'instanciation. Chaque rôle possède les types d'influence qu'il peut recevoir ou générer, tels que les forces, les événements ou les actes de langage. Chaque rôle définit la liste des compétences externes qu'elle utilise. La description de compétence spécifie les services utilisés par les composants. Ces concepts sont instanciés dans le niveau exécutif tel que l'organisation est instanciée par le groupe, et contient des agents jouant des rôles existant dans l'organisation. La relation d'accointance entre agents instancie dans le niveau exécutif la relation entre les rôles joués par ces agents. Le type d'influence est instancié par des influences échangées entre les agents. Le rôle est un composant et est décrit par une description de rôle, un agent peut transmettre des influences venant d'autres rôles à un rôle. Notons qu'un composant est une entité définie par un comportement interne et un ensemble de bornes externes qui

sont ici des compétences. La structure interne de l'agent inclut un Module de Gestion des Composants (MGC) qui gère les communications entre composants à l'intérieur de l'agent, répartit les influences reçues des autres agents et peut lier le comportement d'un rôle aux compétences de l'agent ou gérer les conflits entre rôles. Il est utilisé dans l'appel de compétence qui assure la séparation interactions / actions, la coordination intergroupes et l'ignorance mutuelle permettant d'utiliser les compétences d'un autre composant. La dynamique organisationnelle est gérée par une Organisation de Gestion instanciée par un Groupe de Gestion. Elle fait intervenir 3 descriptions de rôles dont les pages jaunes qui gèrent les organisations et les groupes, le gestionnaire du groupe, et le requérant qui peut entrer ou sortir d'un groupe. Les communications entre agents consistent en des échanges d'influences à l'intérieur des groupes.

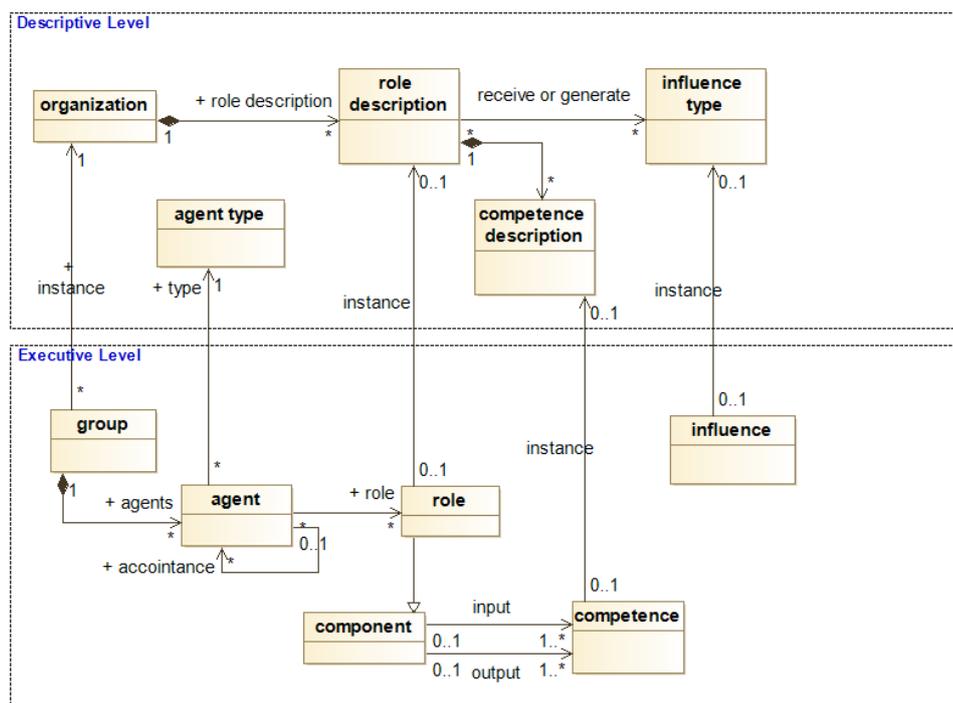


Figure 8 - Structure de MOCA

- Le modèle OperA (Organizations per Agents) (M. Dignum 2004) décrit dans la figure 9 se distingue principalement par sa capacité à décrire les interactions entre les agents. Son modèle organisationnel décrit les objectifs de l'organisation ainsi que les moyens pour les atteindre à travers la structure sociale, la structure d'interaction, la structure normative et la structure communicative. La structure communicative spécifie les actes communicatifs utilisés dans le système. La structure sociale décrit les groupes, les rôles qu'ils contiennent et les relations entre rôles. Chaque rôle possède des objectifs décomposables en sous-objectifs auxquels il a été conçu, des droits et des normes auxquels sont soumis les participants. Un rôle est externe lorsqu'il peut être tenu par tout agent selon les règles d'acquisition de rôle défini par la société, et un rôle est institutionnel lorsque les agents qui le tiennent doivent être désignés et contrôlés par la société et sont conçus pour contribuer à améliorer le comportement des agents et d'assurer le bon fonctionnement du système. Des relations de dépendance peuvent exister entre les rôles : 1) relation hiérarchique : décomposition

du rôle en sous-objectifs et délégation de rôle ayant un sous-objectif à un agent, 2) relation de marché : le rôle fils peut demander l'assignation de l'objectif du rôle initial, ou 3) relation de réseau : les deux cas sont permis, l'objectif peut être attribué par le rôle parent ou demandé par le rôle fils. La structure d'interaction décrit les interactions possibles entre les acteurs pour atteindre les objectifs de l'organisation.

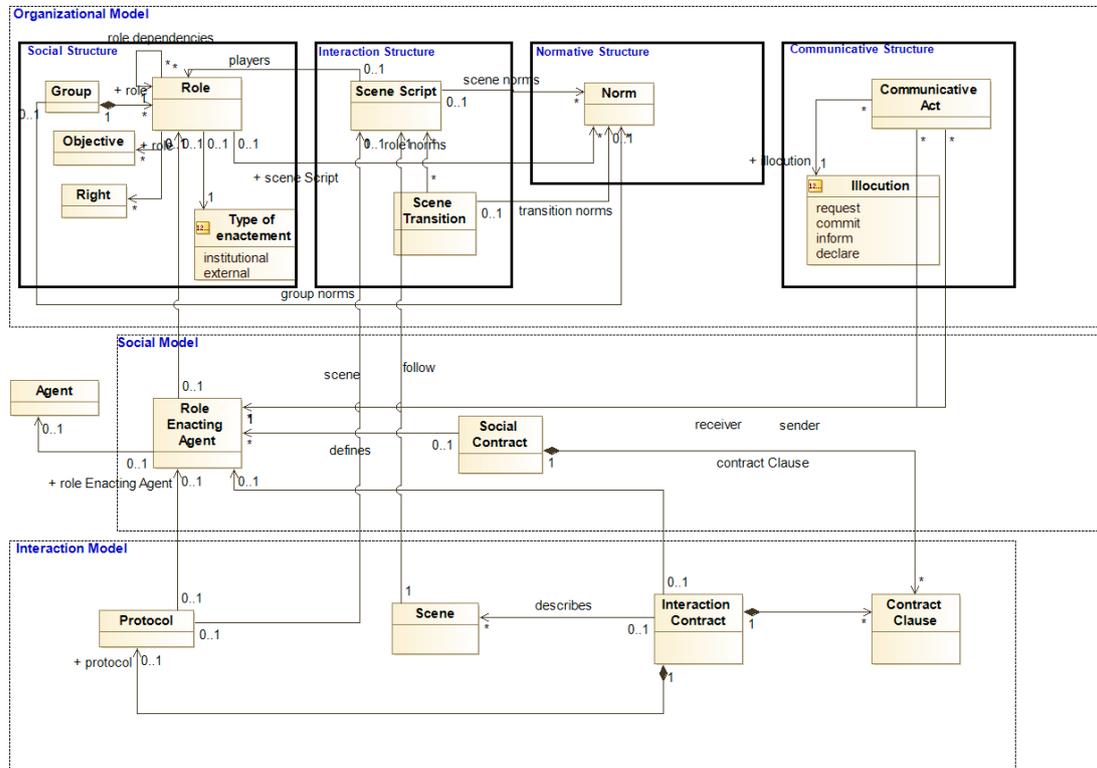


Figure 9 - Méta-modèle de OPERA

La structure d'interaction qui définit les scènes et leurs transitions est une implémentation de l'interaction entre rôles, qui considère l'acte communicative comme moyen d'interagir. La structure d'une scène est décrite de manière abstraite par le script de scène qui est un modèle de conversation. De la même manière, un script de transition décrit l'ordre des scripts de scène et les contraintes sur l'évolution des rôles. En effet, un rôle peut changer d'une scène à un autre, selon les résultats de l'interaction entre scènes. Les relations entre scènes sont décrites par des transitions de scène. La structure normative différencie les normes selon les objets auxquelles ils portent qui peuvent être des scènes, des rôles, ou des transitions. Le modèle social est décrit par les contrats sociaux qui décrivent les conditions et les règles appliquées à un agent teneur d'un rôle. Le modèle d'interaction est décrit par les contrats d'interaction qui décrivent les conditions et les règles appliquées aux interactions entre les agents.

- HARMONIA (Vázquez-Salceda et Dignum 2003) est une plateforme de modélisation d'organisations électroniques qui vise à montrer les relations entre les normes abstraites au niveau des institutions et les règles concrètes et procédures au niveau de l'organisation. Il est structuré en 4 niveaux d'abstraction comme le montre la figure 10 : le niveau abstrait, le niveau concret, le niveau règle et le niveau procédure.

- o Le niveau abstrait décrit principalement la « loi » (« statute ») qui est une abstraction de

l'objectif de l'organisation, des valeurs qui contribuent à cet objectif, et du contexte dans lequel se trouve l'organisation. Ces valeurs sont décrites par les normes abstraites pouvant être conditionnelles qui contribuent à leurs réalisations.

- Le niveau concret décrit les normes concrètes qui sont des descriptions des normes abstraites en fonction des actions et concepts utilisés dans l'organisation, obtenues via l'opérateur « compter-comme ». En effet, les normes abstraites peuvent utiliser des actions décrites de façon abstraite, par des concepts abstraits, ou des actions qui ne sont vérifiables qu'après implémentation.
- Le niveau règle dans lequel les normes sont traduites en règles, faisant ainsi correspondre une partie gauche (LHS) ou condition à une partie droite (RHS) ou action.
- Le niveau procédure traduit les règles en une suite de procédures à suivre pour les agents. Harmonia ne tient pas compte des structures internes des agents, mais se concentre sur le fonctionnement des institutions.

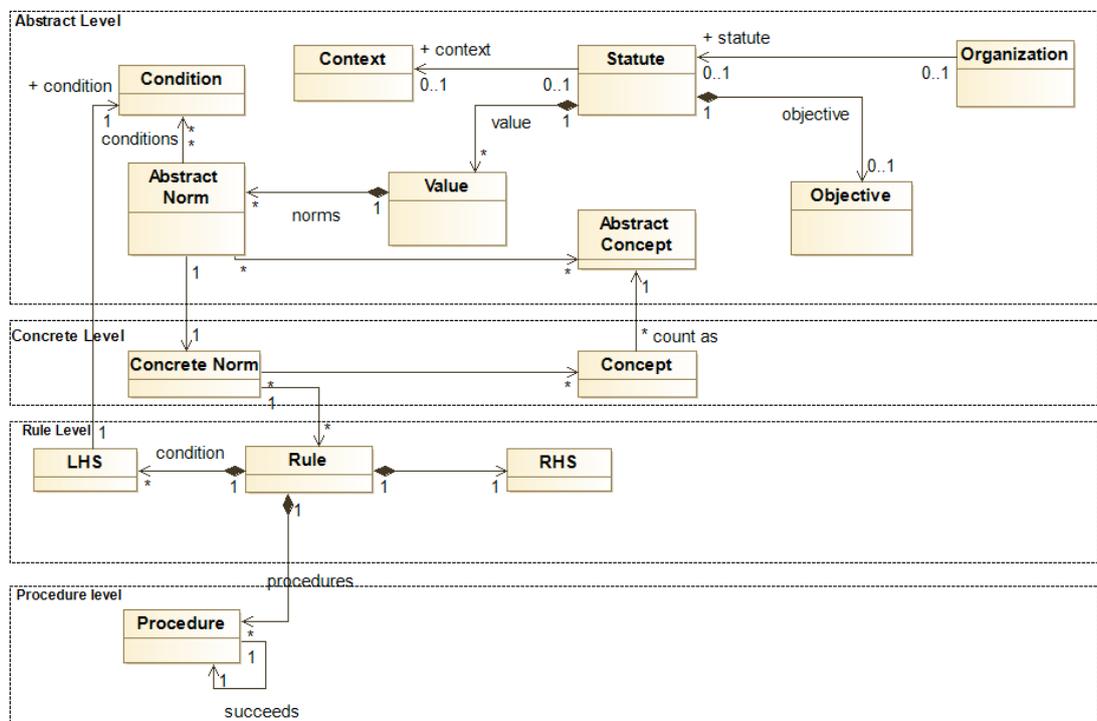


Figure 10 - Méta-modèle de Harmonia

- On note cependant l'existence de SMA hybrides, qui incluent à la fois la dimension institutionnelle, la dimension organisationnelle et la dimension normative. On peut citer pour cela le modèle OMNI ou Organizational Model for Normative Institutions (V. Dignum, Vázquez-Salceda, et Dignum 2004) décrit dans la figure 11: une structure pour la modélisation des organisations d'agents, permettant l'équilibre des besoins organisationnels globaux avec l'autonomie des agents individuels. OMNI est un modèle organisationnel basé sur OPERA et HARMONIA. OMNI spécifie les buts globaux du système indépendamment de ceux des agents, et tient compte des normes et des interactions dans le système. Il est composé de trois dimensions : la dimension organisationnelle, la dimension normative, et la dimension ontologique. Ces dimensions sont organisées dans trois niveaux d'abstraction : niveau

abstrait, niveau concret et niveau d'implémentation.

Le niveau abstrait contient les lois incluant le principal objectif de l'organisation, les valeurs ou croyances qui dirigent la poursuite de cet objectif et le contexte dans lequel l'organisation agit. Si dans le niveau abstrait, la dimension organisationnelle spécifie les buts de l'organisation, dans le niveau concret le modèle spécifie les moyens de les atteindre par le Modèle Organisationnel (OM) décrit par les Structures Sociales et les Structures d'Interaction, le Modèle Social (SM) et le Modèle d'Interaction (IM).

La structure sociale consiste en la définition des rôles dans l'organisation, des groupes qui constituent un ensemble de rôles, et des relations de hiérarchie et de dépendance entre les rôles. La structure d'interaction est caractérisée par l'ensemble des scènes qui correspondent aux scripts de scènes. Un script de scène spécifie la structure de scène par les rôles impliqués, les résultats attendus et les normes qui gèrent l'interaction. L'ordre d'exécution des scènes et les conditions de création de scène sont décrits par les transitions. Le modèle social décrit à travers les contrats sociaux les engagements à tenir lors de l'acquisition de rôle par un agent, il s'agit de conditions et de règles à respecter par l'agent teneur du rôle, la durée, et les sanctions en cas de violation de norme. De la même manière, le modèle d'interaction décrit à travers des contrats d'interaction les conditions temporelles ou non sur les interactions dans une scène, le protocole à suivre pour les agents participants dans la scène.

La dimension normative décrit le passage des valeurs et objectifs de l'organisation dans le niveau abstrait, en normes abstraites conditionnelles, puis en normes concrètes et en règles, violations et sanctions dans le niveau concret. Dans le niveau implémentation, les agents peuvent choisir d'utiliser un interpréteur de règles et de raisonner avec, ou traduire les règles en protocoles à inclure dans les contrats d'interaction et de suivre les protocoles.

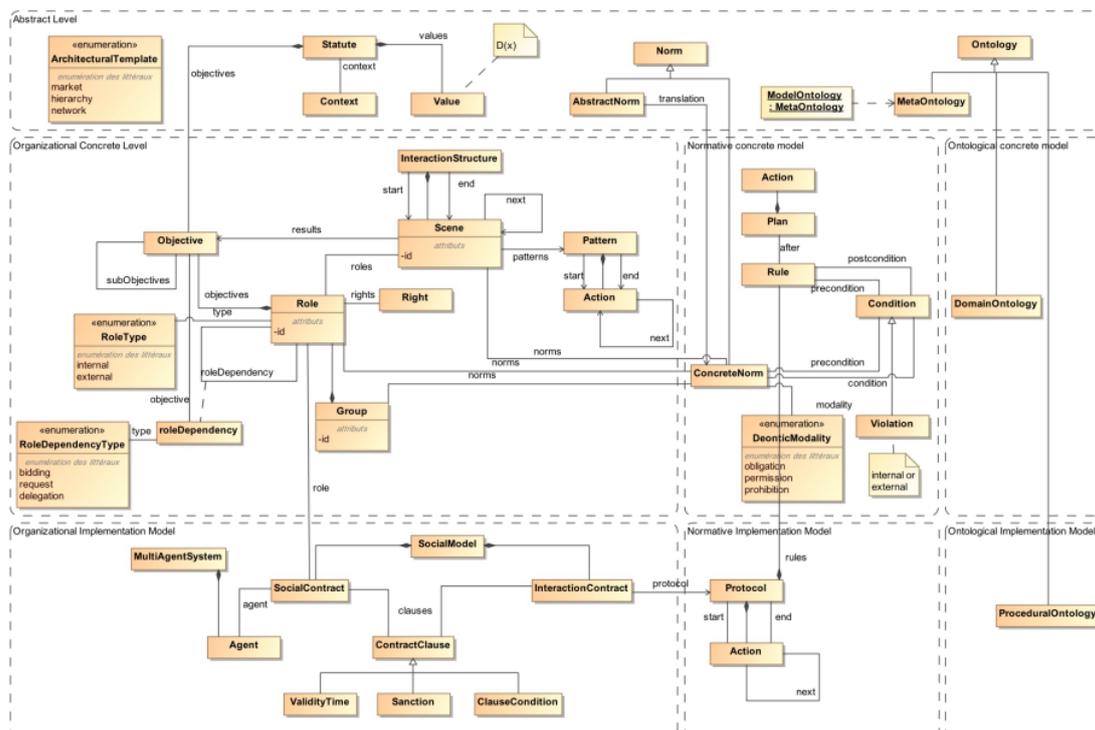


Figure 11 - Méta-modèle de OMNI

La Dimension Ontologique décrit le contenu et le langage de communication, dans les trois niveaux d'abstraction, en passant de l'Ontologie du Modèle qui définit les concepts utilisés par les normes, les règles, les rôles, les groupes, les violations, les sanctions, etc. et des Ontologies du Domaine qui définissent les concepts utilisés dans le contenu, vers les Actes de Communication Génériques représentant les langages d'interaction dans le modèle organisationnel et les Actes de Communication Spécifiques représentant les langages de communication utilisés par les agents dans les contrats d'interaction. OMNI se distingue des autres modèles organisationnels en fournissant des sémantiques formelles pouvant gérer tous les aspects d'un SMA à savoir les aspects structurel, normatif, et ontologique.

### 1.3.4 Synthèse

En Sciences Sociales comme en SMA, on constate que l'organisation est un moyen de coordonner les tâches au sein d'un groupe social, et de structurer les relations entre les membres de ce groupe, dans le but d'assurer la réalisation des tâches assignées aux membres. Par conséquent, les notions d'agent, de rôle qui définit les tâches de chaque individu, et de groupe, sont les éléments principaux d'une organisation.

Les différentes propositions de SMA organisationnels montrent que l'attribution de rôle à un agent se manifeste dans le niveau organisationnel d'un SMA, ce dernier étant constitué essentiellement de groupes d'agents. Les rôles sont conçus et répartis pour que le système atteigne un but prédéfini, et la tenue de ces rôles est gérée par des normes, concrétisées dans la réalité par des règles. Au niveau de la réalité, la tenue de ces rôles représente un engagement, parfois sous forme de contrat à suivre. Sachant que les normes sont définies dans l'institution, l'organisation se réfère donc à une institution lors de l'application des normes. L'utilisation des normes se manifeste au sein de l'organisation, et leurs structures sont définies au niveau de l'institution. L'ontologie du SMA organisationnel repose ainsi sur les notions d'agent, de rôle, de but, de norme.

Nous proposons dans cette thèse d'appeler organisation la mise en œuvre d'une institution, constituée d'un ensemble d'objets, telle que chaque agent peut y tenir un rôle bien défini. Les organisations peuvent toutefois avoir leurs propres normes. Les agents sont ainsi soumis aux normes des organisations auxquelles ils appartiennent, et à celles des institutions que ces organisations mettent en œuvre.

La différence entre institution et organisation repose donc principalement sur celle décrite par (Fornara et al. 2013), selon laquelle l'institution est une entité virtuelle qui décrit ce qui peut se faire à travers les normes et une ontologie, et l'organisation décrit qui doit le faire à travers les rôles institutionnels que prennent les individus, leurs buts et les ressources et représente une entité physique.

## 1.4 SMA normatifs

### 1.4.1 Les SMA normatifs dans la littérature

Un SMA est normatif lorsque sa conception est basée sur un ensemble de restrictions sur les comportements autorisés, interdits, obligatoires des agents éventuellement sous certaines conditions, et spécifiant des conséquences relatives au respect ou non de ces normes (Balke, da Costa Pereira, et al. 2013).

Les principales problématiques concernant les SMA normatifs consistent à la modélisation des normes, à leur application, et à la description de la logique du raisonnement normatif au niveau de l'agent mettant en relief l'importance de l'autonomie des agents. Un SMA normatif n'existe pas en effet sans la possibilité de reconnaître les normes et de les hiérarchiser, de les appliquer dans des cas concrets, et d'apporter des modifications sur les normes (Balke, da Costa Pereira, et al. 2013). Quelques propositions sont citées ci-dessous :

- (y López, Luck, et d'Inverno 2006) formalise un SMA normatif (figure 12) par l'ensemble des agents normatifs membres, un ensemble de normes générales (generalnorms) qui décrivent les comportements des agents, des normes de législation (legislationnorms) qui consistent à la création/modification/suppression de normes, de normes pour l'application des normes (enforcenorms) qui appliquent les sanctions, de normes de récompenses (rewardnorms) qui se chargent des récompenses, et l'état de l'environnement.

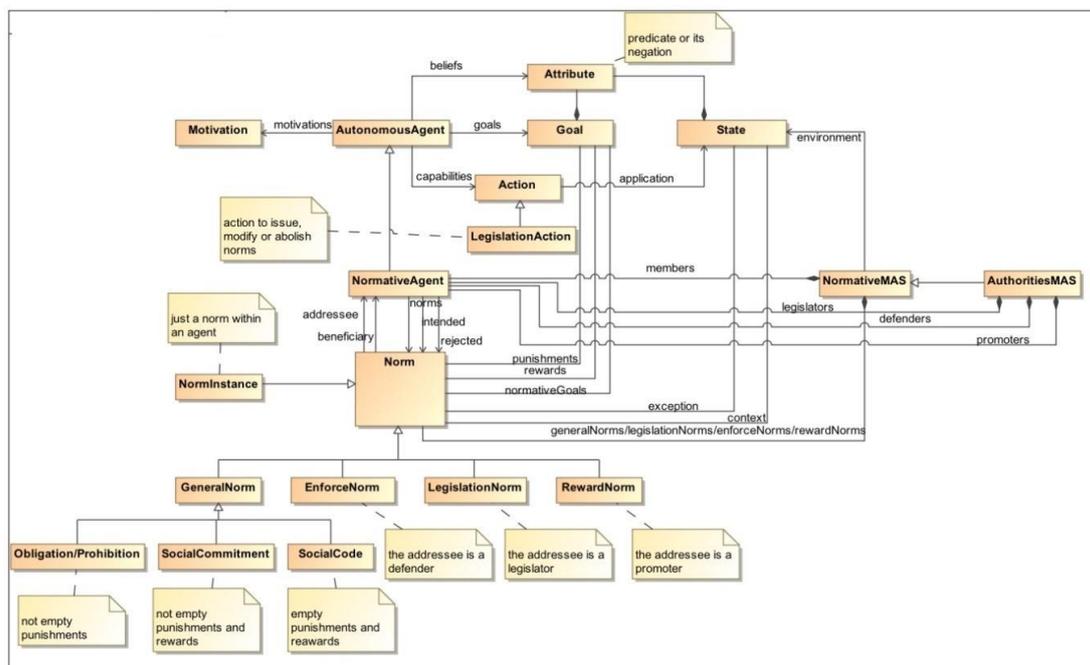


Figure 12 - Méta-modèle de SMA normatif proposé dans (y López, Luck, et d' Inverno 2006)

L'agent raisonne sur la base des motivations qu'il possède, dans le but de satisfaire ses buts, tout en se conformant aux normes selon la société à laquelle il adhère. L'environnement dans lequel se trouve l'agent est caractérisé par des attributs, et un état particulier de l'environnement est donc représenté par les valeurs de ces attributs. Les actions peuvent changer cet état de l'environnement. La norme spécifie des actions qui doivent ou peuvent être effectuées, et est adressée à un ensemble d'agents destinataires. Les agents qui bénéficient de l'accomplissement d'une norme sont appelés agents bénéficiaires. La norme est valable dans un contexte précis, et les exceptions représentent les situations hors du contexte, mais dans lesquelles la norme est toutefois valable. Le respect d'une norme peut faire bénéficier les agents destinataires de récompenses, et leur violation de punitions. En général, la norme définit soit une obligation, soit une interdiction, soit un engagement social, soit un code social. Afin de déterminer si une norme a été respectée ou non, une instance de norme est créée pour représenter une attitude mentale correspondant à la conformité d'un agent à une

norme, et les agents utilisent des instances de norme. Les normes peuvent s'enchaîner par conformité (resp. par non-conformité) telles que l'activation (resp. la désactivation) d'une norme primaire déclenche l'activation d'une norme secondaire, cette dernière admettra dans ce cas la satisfaction (resp. la violation) de la norme primaire comme contexte. Selon les motivations et les buts de l'agent normatif, il décide d'adopter certaines normes, de se conformer à certaines de ces normes (« intended norms ») et de rejeter certaines normes (« rejected norms »). Des types particuliers de normes qui sont les « enforcement norms » ou normes d'application des normes (resp. « reward norms » ou normes de récompenses) sont appliqués par les « defenders » ou défenseurs (resp. « promoters » ou promoteurs) et consistent à l'application des punitions (resp. récompenses) en cas de violation (resp. en cas de respect) des normes générales, par conséquent la violation (resp. le respect) d'une certaine norme déclenche l'activation d'une norme d'application des normes (resp. de récompense). La création de nouvelles normes afin de régler les conflits entre agents, la modification de normes en vue de l'amélioration du système ou la suppression des normes obsolètes sont qualifiées de normes de législation. Ainsi, le système normatif admet l'existence des rôles normatifs : législateurs, défenseurs et promoteurs.

- (Boella et van der Torre 2004) introduit une structure formelle pour la construction de SMA normatif (figure 13) incluant les normes régulatrices et les normes constitutives. La motivation désigne l'ensemble des désirs et des buts de l'agent. Face à des conflits de motivation, les agents raisonnent selon une priorité sur les états mentaux.

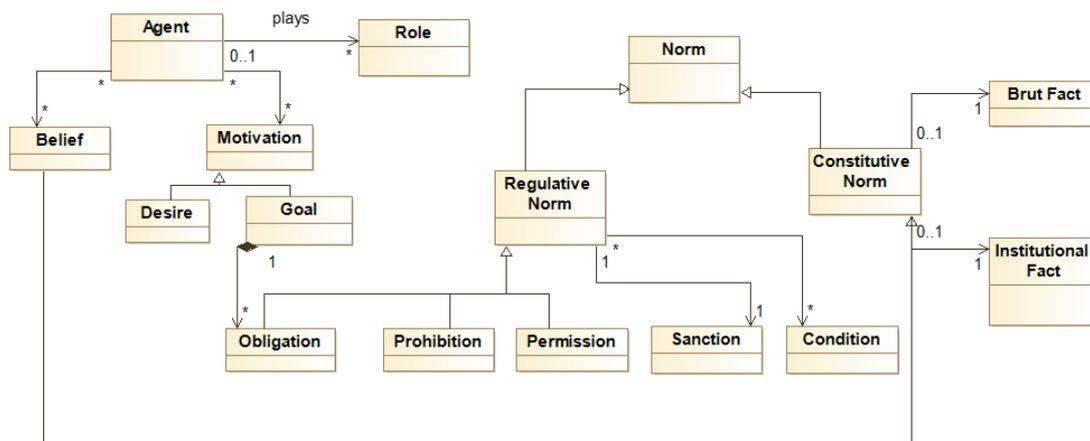


Figure 13 - Méta-modèle du SMA normatif proposé dans (Boella et van der Torre 2004)

Les normes régulatrices sont basées sur la notion d'obligation conditionnelle avec sanction, et les obligations représentent les buts de l'agent, sachant que l'agent désire qu'il n'y ait pas de violation, ni de sanction. Les normes constitutives introduisent les faits institutionnels en les faisant correspondre aux faits bruts relativement à un certain contexte. Les normes constitutives représentent dans ce système les croyances de l'agent. L'extension du système normatif consiste à l'introduction d'un ensemble d'actions modifiant le système, dont les actions de créations de croyances, de désirs, et de buts, qui consistent toutes aux créations de faits institutionnels.

- Une alternative pour l'implémentation de normes dans les Institutions Electroniques propose un langage normatif qui introduit de nouveaux types de normes : les normes basées sur les protocoles et les règles normatives (figure 14). Les normes basées sur les protocoles sont définies par les

scènes, la structure performative et la structure dialogique et les normes basées sur les règles désignent les actions permises à un certain instant compte tenu des actions effectuées par l'agent. En effet, la scène définit les séquences d'interaction permises entre agents tenant des rôles, la structure dialogique définit les conventions requises pour permettre les interactions entre agents, et la structure performative définit l'ordre d'exécution des scènes. Les normes basées sur les règles sont des règles qui déclenchent des obligations lorsque les conditions relatives à ces obligations sont remplies (lorsque certaines illocutions sont prononcées dans certaines scènes) (García-Camino, Noriega, et Rodríguez-Aguilar 2005).

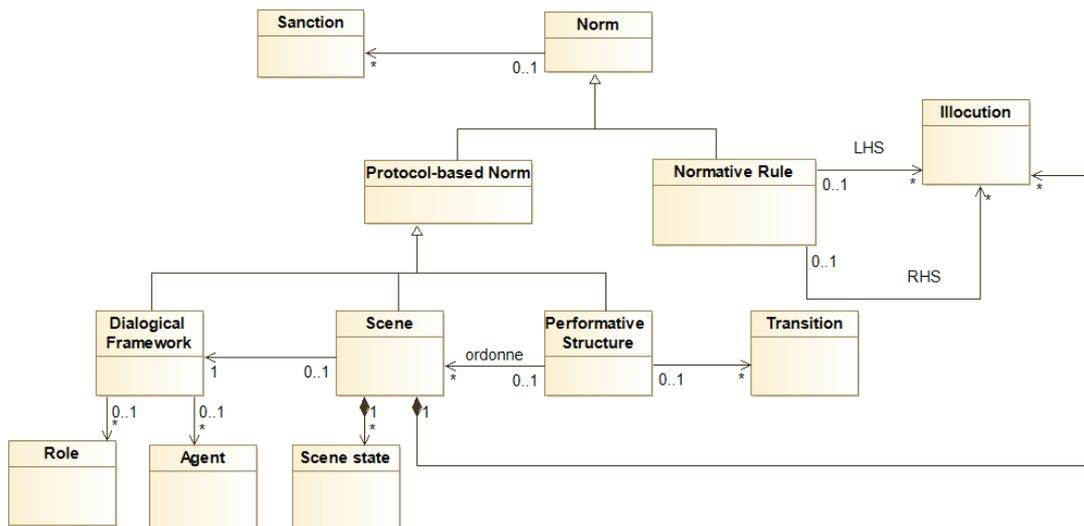


Figure 14 - Implémentation des normes dans les Institutions Electroniques

- Le « Norm-aware MAS » présenté dans (Salazar, Rodriguez-Aguilar, et Arcos 2008) est un système normatif (figure 15) dans lequel les agents sont soumis à des normes sociales, et peuvent percevoir l'état de l'environnement à tout moment. Les actions des agents peuvent être communicantes lorsqu'il s'agit de communiquer avec les autres agents ou environnementales lorsqu'il s'agit de changer l'état de l'environnement.

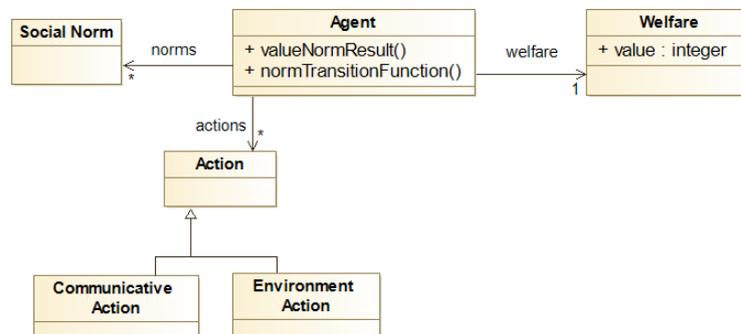


Figure 15 - Modèle de SMA normatif décrivant l'infection positive

Les agents communiquent entre eux, et chaque agent possède un bien-être dont il tend à maximiser la valeur. Chaque agent a la capacité de valoriser l'utilité de respecter ses normes sociales, et intègre sa propre fonction de transition de norme qui retourne l'ensemble des normes sociales qu'il choisit en vue de bien agir dans le système en fonction des résultats des actions effectuées dans l'environnement et de ses interactions avec les autres agents. D'où « l'infection positive » qui consiste à la propagation des normes par les agents ayant des bons comportements pouvant améliorer le bien-être social, et à leur adoption par les autres agents grâce à leur valeur d'utilité élevée. Dans ce sens, l'évolution du système normatif s'effectue par la coopération entre agents qui augmente la performance des agents et stabilise le système.

- Un formalisme pour la spécification et l'application des normes aux moyens des sanctions (figure 16) étend le modèle OCeAN et tient ainsi compte des événements qui déclenchent la norme et des rôles des agents impliqués dans une norme. La norme, qui désigne une obligation ou une interdiction, est déclenchée par un certain événement. Elle s'applique à des agents débiteurs ou « débiteurs » et les bénéficiaires sont les agents créanciers ou « creditors ».

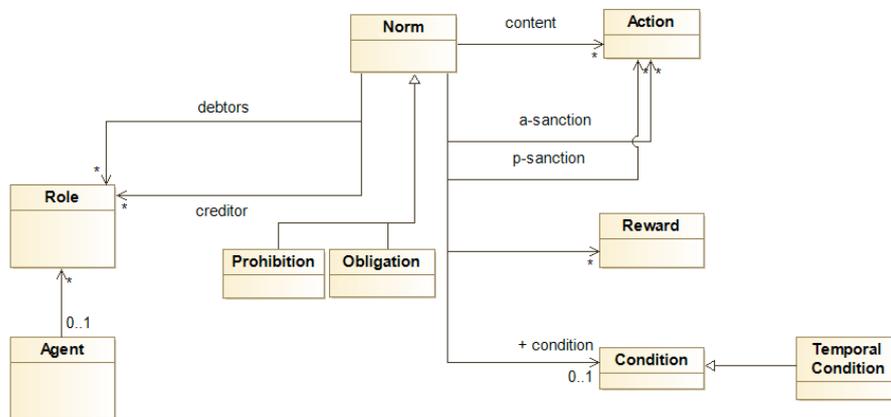


Figure 16 - Méta-modèle d'application de norme dans (Fornara et Colombetti 2008)

En cas de violation, la « p-sanction » désigne les actions pouvant être effectuées aux débiteurs par ceux qui appliquent les normes, les débiteurs doivent effectuer en outre les « a-sanctions ». Ce formalisme propose un mécanisme d'application des sanctions, attribue un délai pour l'activation des normes, et propose la transformation des normes en engagements pouvant être appliqués plusieurs fois dans un système par les règles Évènement-Condition-Action (EAC) (Fornara et Colombetti 2008).

- Le formalisme d'implémentation des normes dans (Vázquez-Salceda, Aldewereld, et Dignum 2005) (figure 17) distingue les normes définissant un terme abstrait ou une action abstraite, introduisant une permission, obligation ou interdiction, pouvant inclure les opérateurs temporels et conditionnels, ou porter sur d'autres normes. La condition temporelle peut être un deadline absolu (instant précis) ou un deadline relatif à un événement, l'exception décrit une condition dans laquelle la norme ne s'applique pas. La détection de violation diffère selon les niveaux de vérifiabilité des conditions relatives aux normes. En cas de violation, la sanction consiste à un plan (ensemble) d'actions à appliquer à l'agent fautif, et les réparations à un plan d'actions permettant de rétablir l'état du système. La « propriété d'annulation » (« defeasibility property ») est introduite au niveau de la combinaison de normes, elle consiste à modifier ou à supprimer l'applicabilité

d'une norme par l'introduction d'un ensemble de normes, et permet donc de gérer les exceptions. Un ensemble de normes a la propriété d'être annulée si une norme dérivée de cet ensemble peut être invalidée après ajout d'un ensemble de normes : annulation de normes (« defeasibility of norms »), ou si les significations des concepts dans ces normes peuvent être modifiées par ajout d'un ensemble de normes : annulation de classification (« defeasibility of classification »).

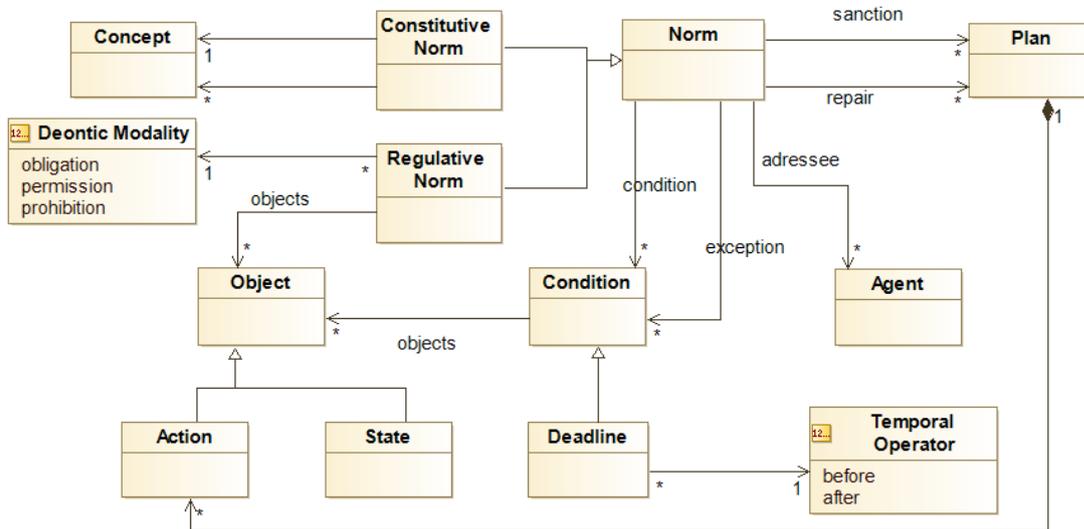


Figure 17 - Méta-modèle de norme dans (Vázquez-Salceda, Aldewereld, et Dignum 2005)

- L'autonomie des agents et les interactions entre agents peuvent améliorer les performances individuelles. Ceci a été prouvé à travers les mécanismes d'émergence de norme faisant évoluer les normes par une approche ascendante dans un SMA normatif proposé dans (Savarimuthu et al. 2007). L'expérimentation a étudié la cohabitation de différentes sociétés d'agents soumises à différentes normes à travers des agents jouant le jeu d'Ultimatum. Le premier mécanisme d'émergence de normes proposé est le recueil des réponses collectives des agents individuels. Chaque agent envoie ses valeurs de proposition (norme de proposition) et ses valeurs d'acceptation (norme d'acceptation) qui ont mené à la réussite au Conseiller normatif qui est chargé de collecter les réponses des agents et de modifier la norme du groupe d'agents. Ce Conseiller normatif calcule la moyenne de toutes les valeurs qu'il reçoit de tous les agents et modifie le « G norm » (Group Norm ou Norme de Groupe) du groupe après chaque itération. Parallèlement, chaque agent modifie sa « P norm » (Personal Norm ou Norme Personnelle) dans chaque itération. Le deuxième mécanisme consiste à utiliser un modèle de rôle d'agent, qui est l'agent le plus performant dans la société. Celui-ci collecte les réponses venant des agents après chaque itération et modifie sa P norm. Chaque agent peut lui demander conseil, suivre ou ignorer ses conseils, et modifier sa P norm en fonction des conseils reçus. Ce mécanisme diffère ainsi du premier par l'absence de G norm, et la possibilité de choisir d'accepter ou d'ignorer les conseils selon son autonomie. Ces types de norme sont décrits dans la figure 18. Après avoir testé ces deux mécanismes, les performances des deux sociétés de joueurs ont augmenté après l'émergence des normes. En général, le raisonnement normatif est influencé par les récompenses et les punitions, et est dicté par les états mentaux de l'agent. On note en outre que ce sont les agents eux-mêmes qui créent et modifient leurs normes.

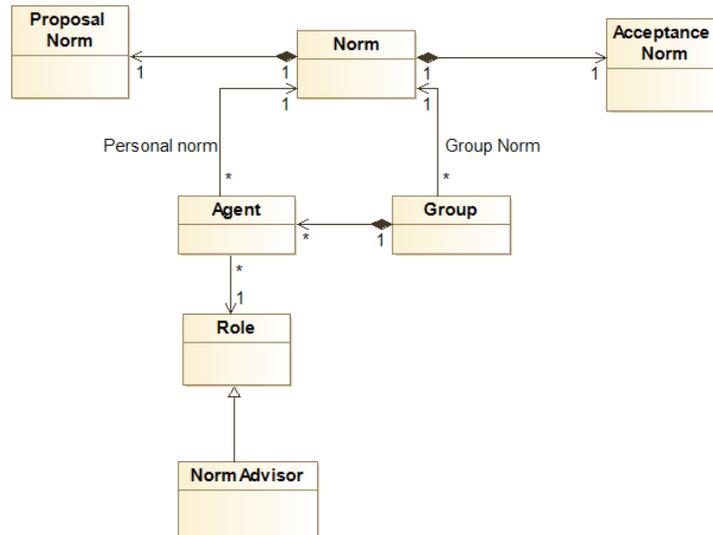


Figure 18 - Méta-modèle de norme dans (Savarimuthu et al. 2007)

- (Demolombe et Louis 2006) formalise les relations entre les notions de rôles et de norme telles qu'elles sont décrites dans la figure 19. Le rôle est défini par l'ensemble des conditions nécessaires à sa tenue, et des normes auxquelles est soumis le teneur, dont les normes statiques et les normes dynamiques. Le tout est défini relativement à l'institution qui est considérée comme un groupe social ayant un but. Les normes statiques sont constituées des normes valables en toute circonstance, et des normes valables lors de l'exercice du rôle seulement. Les normes dynamiques désignent les pouvoirs institutionnels, et permettent de créer des faits institutionnels et par conséquent de créer et de changer des situations normatives.

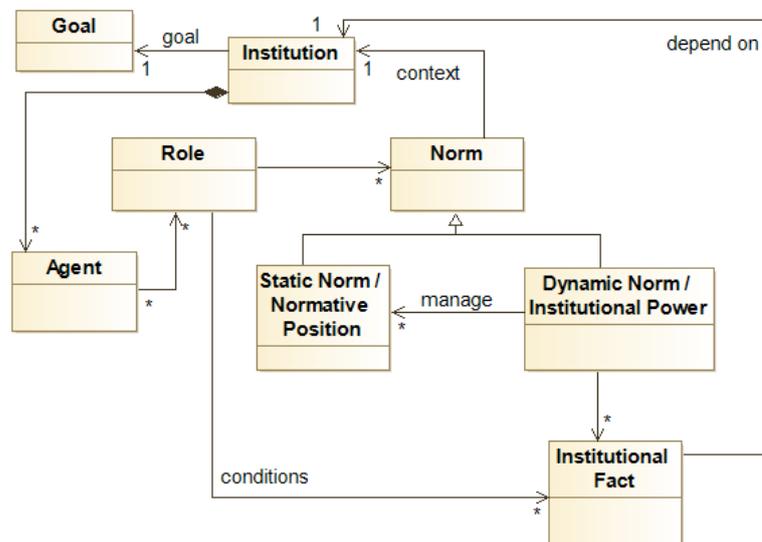


Figure 19 - Relations entre rôles et norme dans (Demolombe et Louis 2006)

- La dynamique des normes dans un système influence généralement l'ensemble des normes du système. L'ajout d'une nouvelle norme au système peut en effet déclencher plusieurs nouvelles

régulations dérivées de cette nouvelle norme, ou dans certains cas nécessiter le rejet des normes incompatibles parmi l'ensemble des normes dans le système, ou même le rejet de la nouvelle norme et de toutes les normes qui lui sont reliées selon l'argumentation établie entre les acteurs après détection de l'incohérence de la nouvelle norme avec les normes du système (Broersen et al. 2013).

- Dans les relations sociales, on remarque qu'aucun système de règles ou de normes n'est complet étant donné que tous les comportements ne sont pas tous prévisibles.

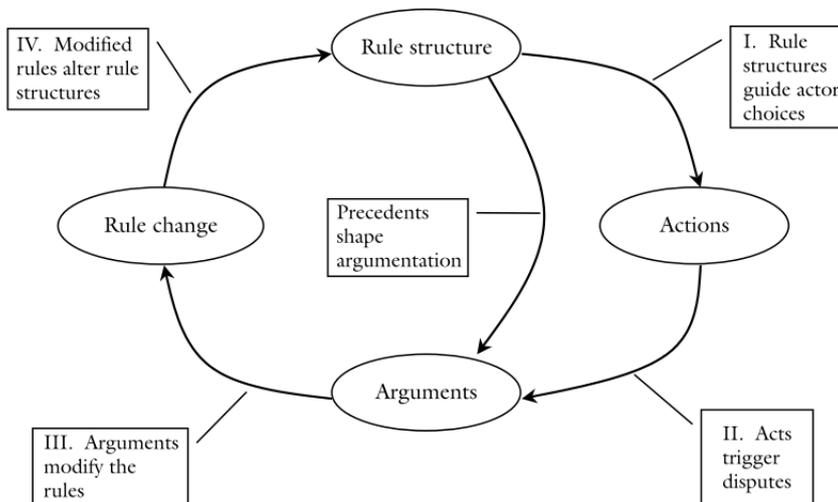


Figure 20 - Le cycle de changement de norme (Sandholtz 2008)

Des contradictions peuvent exister entre les normes, et certaines actions engendrent des incertitudes sur les normes à appliquer ou les liens entre deux normes. Le changement normatif suit généralement un cycle courant qui commence généralement avec un système social adoptant un ensemble de normes, les actions exécutées par les membres peuvent ensuite entraîner des disputes sur les normes à appliquer, ce qui engendre des argumentations en vue de modifier les normes, et par conséquent la mise à jour des normes en une version plus ou moins précise, plus ou moins spécifique, etc. (Sandholtz 2008). Ce cycle est décrit dans la figure 20.

- L'implémentation de normes en tant de mécanismes de contrôle dans un système normatif peut revêtir deux formes distinctes (Criado, Argente, et Botti 2011) comme le montre la figure 21 :
  - o L'embrigadement (« regimentation ») qui consiste à interdire dans le système la violation de normes. On peut prendre l'exemple des systèmes d'implémentation de jeu dans lesquels l'utilisateur ne peut faire une action qui ne suit pas les règles du jeu. L'embrigadement peut se manifester de deux manières : soit par la médiation dans laquelle une entité contrôle les comportements des agents et les prévient de respecter les normes, soit par le « hard-wiring » dans laquelle les états mentaux des agents sont modifiés directement pour se conformer aux normes.
  - o Le mécanisme d'application des normes (« enforcement ») qui permet aux agents du système de violer les normes, et au système de détecter les violations et de les gérer. Ce mécanisme peut se faire de différentes manières : soit les normes s'appliquent elles-mêmes (self-enforced) lorsque les agents se sanctionnent eux-même en cas de violation, soit les normes sont appliquées par une entité particulière, soit les normes sont appliquées par une troisième entité

qui n'est ni l'entité observateur ni l'entité qui l'applique, mais qui peut être un arbitre qui prend en charge la résolution de la situation en cas de violation, ou une entité sociale qui est un groupe d'agents extérieurs capables d'observer la situation, ou encore une institution observatrice qui se charge d'appliquer les normes.

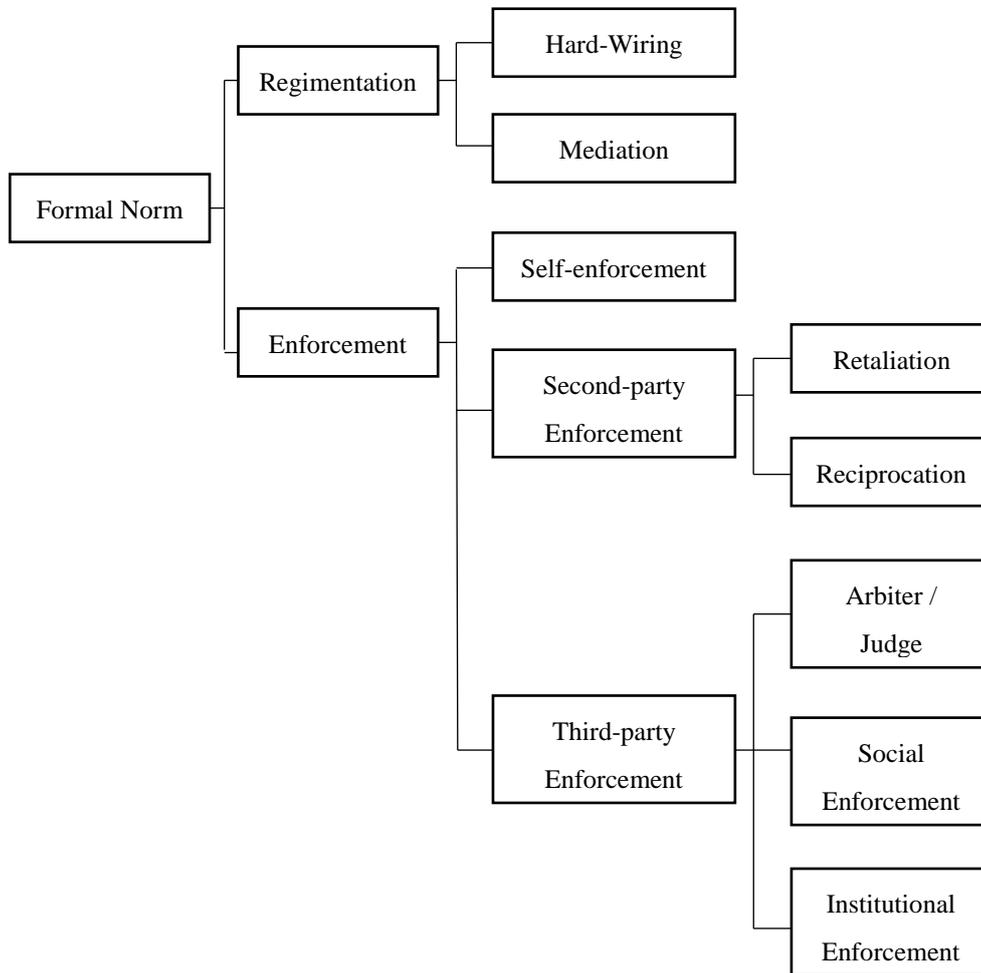


Figure 21 - Interprétation opérationnelle des normes (Criado, Argente, et Botti 2011)

## 1.4.2 Synthèse

De là, on peut induire que le SMA normatif contient un ensemble de normes régulatrices auxquelles sont soumis les agents normatifs membres, ces derniers agissent en tenant compte de ces normes, tout en ayant des buts précis qu'ils cherchent à atteindre. Toutefois, l'activation d'une norme est parfois soumise à certaines conditions pouvant porter sur une action ou un état. Un agent normatif est donc principalement motivé par la poursuite de ses buts, est contraint par la crainte d'être sanctionné, et tient compte également de l'existence des possibles récompenses. Il y a en outre les cas où l'agent normatif choisit les normes dans le système auxquelles il veut se conformer, et dont la motivation est dirigée par la maximisation de son bien-être, ou en imitant les normes des agents qui ont été déjà prouvés comme performants dans la société. Dans ce cas, l'agent normatif crée et modifie lui-même ses normes. Il peut y avoir dans certains cas des agents à qui une norme rend service, qualifiés d'agents créditeurs. La terminologie utilisée dans l'expression

de ces normes régulatrices est mise en correspondance avec la terminologie utilisée dans la situation réelle via les normes constitutives en utilisant la relation «compter-comme».

Dans les Institutions Electroniques, outre la définition des séquences des interactions permises, les conditions requises par ces interactions et l'ordre d'exécution des actions, les normes sont des obligations à des actions ou à un protocole que l'agent doit suivre, suite à ses actions antérieures.

Dans la création de nouvelles normes, on note qu'il est possible que l'apparition d'une nouvelle norme qui peut en entraîner d'autres, peut surtout déclencher des conflits avec des normes existantes. La gestion de ces conflits peut se faire en rejetant les anciennes normes en conflit avec la nouvelle, ou en supprimant la norme.

Bien concevoir un modèle de SMA normatif nécessite de le mettre à jour au fur et à mesure de son utilisation et des situations rencontrées étant donné qu'aucun système de règles n'est jamais complet. Toutefois, il est important de bien définir les paramètres de base structurant les normes pour être explicite, notamment le sujet de la norme, l'objet sur lequel elle porte, le but et les différentes conditions d'activation.

## 1.5 Norme

L'harmonie dans une société d'individus ne repose pas seulement sur la bonne foi de ses membres, mais il existe toujours un certain nombre de règlements auxquels sont confrontés les membres. Ces règlements ou normes revêtent plusieurs formes (formelles ou non), font intervenir plusieurs paramètres, et influencent les comportements des individus. Il en est de même pour les SMA qui sont une société d'agents. Ainsi, les normes ont été étudiées aussi bien dans la littérature sur les sciences sociales, que dans les SMA.

### 1.5.1 La norme selon les sciences sociales

La norme désigne généralement ce qui doit se faire. La notion de « norme » a été utilisée depuis longtemps dans les sciences sociales, et est en relation avec la notion d'être « normal ». (Therborn 2002) affirme que la norme donne la définition d'une chose (Qu'est-ce que ... ?), d'une structure sociale (quand est-ce que c'est normal), et des actions à faire. L'action normative est donc celle qui est conforme à la norme en tant que responsabilité, celle qui décrit ce qu'on doit faire en dépit de ses possibles conséquences.

Les sciences sociales utilisent souvent la notion de norme sociale qui désigne des standards de comportement basés sur des croyances partagées sur les comportements des membres d'un groupe social devant une situation. La création de norme sociale est souvent due à la constatation par les membres de la société des effets positifs ou négatifs des actions effectuées par certains membres (Fehr et Fischbacher 2004).

### 1.5.2 La norme selon les SMA

La notion de norme est souvent liée aux concepts de loi, de convention, de contrat, d'engagement. La norme peut en effet être classifiée en 3 niveaux selon sa portée (Criado, Argente, et Botti 2011):

- Le niveau social : la norme appartient au niveau social qui est le plus élevé lorsqu'elle concerne la coordination des individus dans une société, il s'agit donc des normes institutionnelles qui sont imposées par l'institution, et des conventions ou normes sociales qui n'ont pas été définies

explicitement mais qui émergent des comportements communs dans un groupe d'agents.

- Le niveau interaction : il s'agit des contrats et accords entre groupes d'individus, valables généralement pour une certaine période.
- Le niveau privé : il s'agit des normes imposées à soi-même, des principes qu'on s'impose à soi-même, comme les bonnes conduites dans une société.

La création de normes dans une société d'agents peut se faire généralement de deux manières possibles :

- Par une approche descendante : soit le système normatif est décrit de manière statique, soit les normes sont créées dynamiquement par des agents ayant des rôles spéciaux
- Par une approche ascendante : dans laquelle la norme émerge des comportements habituels d'un groupe d'agents.

### 1.5.3 Typologie des normes et leurs structures

Dans les sciences sociales, on remarque la distinction de 3 types de normes compte-tenu de l'interaction humaine (Therborn 2002): les normes constitutives qui définissent l'adhésion des membres dans un système et les actions relatives à ces membres (comportements, langage, manières, etc.), les normes régulatrices qui décrivent les contributions et performances attendues aux membres (ex : normes sur le travail, rôle dans la famille, etc.), et les normes distributives qui définissent l'attribution de récompenses, des coûts et des risques dans un système social.

Une distinction plus abstraite distingue les normes en deux types selon leurs buts : les normes substantielles et les normes procédurales (Boella et van Der Torre 2008). Les normes substantielles décrivent les comportements souhaités des agents entre eux et envers le système par les normes régulatrices et les normes constitutives. Les normes procédurales ou normes d'application consistent en des normes distributives et visent à maintenir l'ordre social et à appliquer les normes substantielles, en décrivant les récompenses et les punitions qui leur correspondent.

Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement aux normes substantives, et nous ne traiterons pas les normes distributives ou procédurales.

#### 1.5.3.1 Norme régulatrice

En général, la littérature décrit la norme régulatrice par la spécification de modèles de comportement d'un ensemble d'agents, décrivant les actions qui devront être faites et les contraintes sur les actions, ainsi que les buts qui devront être atteints ou évités par les agents. En effet, (y López, Luck, et d'Inverno 2006) et (Fornara et Colombetti 2008) caractérisent la norme régulatrice principalement par un ensemble de buts, des agents destinataires, des agents bénéficiaires de la norme, un contexte spécifique d'exécution de la norme, les exceptions à ce contexte, les punitions en cas de violation et les récompenses en cas de respect de la norme. Afin de préciser si l'atteinte ou pas du but décrit dans la norme est obligatoire, interdite ou juste permise, la notion de modalité déontique a été introduite. En effet, la norme régulatrice est généralement décrite dans la littérature par un énoncé déontique (une obligation, une interdiction ou une permission de satisfaire un but) et conditionnel (Aldewereld et al. 2010) (García-Camino, Noriega, et Rodríguez-Aguilar 2005) (Vázquez-Salceda, Aldewereld, et Dignum 2005) , (Boella et van der Torre 2004) y ajoute la notion de sanction. Il s'agit donc d'un énoncé de la forme «*Si ... alors il est obligatoire que ...*». (Cialdini, Kallgren, et Reno 1991)

distingue deux types de normes régulatrices : l'engagement social décrivant ce qui doit être fait et qui est prescrit formellement ou non, et le fait habituel décrivant ce qui se fait généralement sans être prescrit. Cet engagement social est parfois appelé norme d'injonction et le fait habituel qualifié de norme descriptive (Interis 2011). Il y a ensuite la distinction entre la norme statique ou position normative regroupant la permission, l'interdiction et l'obligation, et la norme dynamique ou pouvoir institutionnel qui décrit le droit sur d'autres agents de gérer leur situation normative, en modifiant ainsi les normes auxquelles ces agents sont soumis. Le modèle de norme proposé dans la grammaire des institutions décrite dans (Crawford et Ostrom 1995) caractérise la norme par un attribut représentant le sujet de la norme (Attribute A), une modalité déontique (Deontic D), un but (Aim I), une condition (Condition C), et une sanction ou une récompense selon que la norme a été violée ou respectée (Otherwise O). Par rapport à la réalité au niveau de la société, la littérature sur les SMA distingue les conventions quand il s'agisse de réaliser d'une manière conventionnelle les souhaits des membres par coopération, les normes sociales quand le système se base sur des obligations dont les punitions affectent les décisions des agents, et les normes légales quand il existe une autorité ou quand des rôles spécifiques liés à la gestion des normes sont concrétisés au sein des membres de la société (Balke, Cranefield, et al. 2013).

Un approfondissement sur la description de la norme en tant qu'énoncé déontique conditionnel est décrit dans (Rubino, Rotolo, et Sartor 2007). On distingue en effet les normes conditionnelles qui sont des règles faisant dépendre le jugement normatif à des conditions suffisantes, et celles qui sont des liens faisant dépendre le jugement normatif de conditions nécessaires. Concernant les règles, on distingue les règles d'initiation d'une proposition normative selon la satisfaction des conditions, les règles de résiliation d'une proposition normative selon certaines conditions, et les règles de survenance déclarant une proposition normative valable tant que les conditions sont satisfaites. Les obligations et les permissions peuvent être positives ou négatives selon qu'elles concernent une action ou une omission. La permission négative est appelée privilège. « Noright » exprime la négation d'un droit obligatoire d'une personne envers un autre devant une action, cette dernière a ainsi un privilège envers l'action et peut la négliger. L'obligation de faire une action est appelée droit obligatoire ou « obligative right ». Le droit d'exclusion ou « Exclusionary right » désigne l'interdiction de certains propos dans l'intérêt d'une personne particulière. Le droit de liberté ou « Liberty right » désigne le droit pour une personne d'effectuer ou d'omettre une action qui est ainsi facultative. Le droit de responsabilité ou « Liability right » sur une action désigne le droit d'un agent de bénéficier d'une action faite par un autre agent lorsque celui-ci effectue une certaine action.

(Demolombe et Louis 2006) introduit la relation entre norme et rôle, en attribuant à chaque rôle un ensemble de normes statiques pouvant être conditionnelles et un ensemble de normes dynamiques ou pouvoirs institutionnels. La tenue et l'exercice d'un rôle représentent ici une condition d'activation pour certaines normes. Parmi les normes statiques, il y a les normes valables en toute circonstance, et les normes valables seulement lors de l'exercice du rôle. Les modalités déontologiques considérées dans les normes relatives aux rôles sont les obligations portant sur une action et qui nécessitent des délais, et les obligations portant sur un état.

Les normes dynamiques introduisent la possibilité d'évolution des normes, en changeant de catégorie, comme le fait de passer d'une convention à une norme sociale, ou d'une norme sociale à une norme légale. Ce qui peut impliquer dans certains cas des conflits normatifs sur les contraintes qui s'appliquent à un agent soumis à une norme à la fois sociale et légale (Balke, Cranefield, et al. 2013).

Dans les systèmes de jeu, les normes sont considérées soit comme des mécanismes d'application de stratégie d'interaction décrivant les règles du jeu en vue d'atteindre les résultats escomptés, soit comme

l'équilibre résultant des interactions entre les individus et qui devient un modèle de comportement collectif (Broersen et al. 2013).

La littérature sur les normes (Balke, Cranefield, et al. 2013) distingue 3 principales étapes dans le processus d'utilisation des normes : la phase de formation de la norme qui consiste à la création de normes et leur identification par les agents, la phase de propagation de la norme qui décrit la propagation et l'application des normes dans la société, et la phase de l'émergence qui décrit l'ampleur de la propagation d'une norme. Ces 3 étapes principales ont permis de déterminer les 5 phases du cycle de vie d'une norme, dont : la création de norme, l'identification de la norme, la propagation de norme, l'application de norme et l'émergence de la norme.

- La création de norme peut se faire de trois manières :
  - soit un concepteur spécifie les normes (conception off-line) et les codes en dur dans les agents
  - soit un dirigeant spécifie les normes, de façon autoritaire ou démocratique
  - soit un entrepreneur qui considère que la norme est adaptée à la société.
- L'identification de norme par chaque agent est nécessaire pour identifier les normes qui n'ont pas été créées explicitement, mais qui ont émergé des interactions entre les agents. Dans ce cas, chaque agent a sa propre notion de norme selon ce qu'il observe dans l'environnement dans lequel il se situe.
- La propagation de norme consiste à propager l'existence des normes aux membres d'un groupe ou d'une société, grâce aux moyens comme le leadership, ou les mécanismes évolutionnaires ou culturels.
- L'application de norme consiste à introduire et à appliquer la sanction en cas de violation de norme, et la récompense suite à un respect de la norme. D'un autre côté, l'observation de ces sanctions et récompenses par les autres agents renforce le mécanisme de propagation de norme.
- L'émergence de norme consiste à l'atteinte d'un certain seuil au-delà de laquelle la norme est propagée, signifiant qu'un nombre considérable d'agents dans la société reconnaissent la norme.

### 1.5.3.2 Norme constitutive

Dans la littérature, la norme constitutive représente une règle de croyance du système normatif qui introduit comme conséquences de nouvelles catégories abstraites de faits et d'entités existants (Boella et van Der Torre 2005). Elle définit comment les actions et les états des choses dans le monde physique modifient les faits dans l'état institutionnel (la description institutionnalisée de l'état du monde), et introduit ainsi de nouvelles classifications de faits appelés faits institutionnels (Criado et al. 2014). (Grossi, Meyer, et Dignum 2008) souligne qu'il s'agit d'une classification contextuelle et qui représente un élément d'un ensemble de règles spécifiant un système normatif et définissant le contexte dans lequel existe cette règle. La norme constitutive est décrite sous la forme d'une déclaration «*compter-comme*» (Grossi, Meyer, et Dignum 2005) (exemple : ce que je dis *compte comme* du beurre), et représente une classification contextuelle qui n'a ainsi de sens que dans un contexte particulier qui est le système normatif ou l'institution, et exprime un fait institutionnel. On la représente sous la forme «*X compte comme Y*» ou «*X compte comme Y dans le contexte C*» tel que *X* et *Y* peuvent être tout type d'objet et *C* un contexte (Searle et al. 1995). Cette mise en correspondance entre terminologies de deux contextes engendre la permission ou l'interdiction de faire certaines actions (ex : il est interdit de travailler le dimanche, or pêcher compte comme travailler, donc il est

interdit de pêcher le dimanche), bref d'appliquer les normes régulatrices. Les faits institutionnels n'existent donc que dans un système ayant des normes constitutives. Dans ce sens, les faits institutionnels sont les faits rattachés à une institution et décrits avec sa terminologie, et les faits bruts les faits qui peuvent exister indépendamment des institutions et qui sont décrits suivant le contexte brut tel qu'on l'aperçoit physiquement sans considérer aucune institution. Ainsi, nous disons que l'action « moissonner un champ » compte comme « récolter » dans un contexte où le propriétaire du champ effectue l'action, et comme « voler » dans un contexte où on sait que le champ n'appartient pas à la personne en question.

#### 1.5.4 Synthèse

Nous pouvons induire que la norme influence les comportements des agents dans un système en vue de contribuer au bien-être de l'ensemble des éléments de ce système. Les normes permettent donc de tenir l'équilibre d'un système social, et de limiter les comportements non souhaitables, pour une bonne harmonie dans la société.

La norme régulatrice consiste principalement à spécifier par une modalité déontique (permission, obligation, interdiction) les comportements que peuvent ou doivent avoir un agent, en fonction de son rôle dans l'organisation, généralement sous certaines conditions. Le respect de cette norme peut entraîner une récompense, et dans le cas contraire il peut y avoir une sanction. La norme est valable seulement dans un certain contexte social qui est l'institution, et le fait d'entrer dans ce contexte engage l'agent à se soumettre aux normes qu'il définit.

La norme constitutive définit à partir de la relation « compter-comme » les classifications conceptuelles admises dans une institution, principalement les faits qualifiés d'institutionnels à partir des faits dits bruts dans le contexte de la réalité. Les deux contextes diffèrent donc en matière de terminologies utilisées et d'expression, mais peuvent décrire une même action. La norme constitutive permet dans ce sens de formaliser et d'exprimer dans un SMA institutionnel la situation réelle existante, grâce aux faits institutionnels qu'elle définit en fonction de la terminologie utilisée par le système physique.

Dans cette thèse, nous utiliserons les normes constitutives pour définir les concepts utilisés dans les normes régulatrices. Lorsque les agents dans un SMA sont conçus pour se conformer aux normes, on dit que le SMA est normatif. Un tel système intègre par conséquent une structure permettant d'appliquer les normes en tenant compte du contexte existant.

### 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la bibliographie sur les SMA institutionnels, organisationnels, normatifs et surtout sur les normes et leur fonctionnement. Nous avons pu établir que la norme influence le comportement d'un agent dans un SMA. Nous pouvons déduire que l'institution est constituée essentiellement de normes, et afin de proposer un modèle de SMA institutionnel capable de représenter le système de gestion forestière à Madagascar, nous devons nous focaliser sur la structure des normes et apporter le(les) élément(s) manquant pour que les normes en SMA puissent représenter les règlements sociaux sur le socio-écosystème, de l'échelle villageoise à l'échelle nationale. La norme est souvent conditionnelle et se déclenche relativement à un événement, un engagement, une durée ou une action antérieure. Le respect des normes par les agents assure le bon fonctionnement du SMA, toutefois le contraire

n'est pas toujours vrai car la poursuite de son but peut conduire un agent à violer une norme, et des cas imprévisibles peuvent se produire quant à l'état du système.

La norme est donc soit constitutive, soit régulatrice. La norme constitutive définit le vocabulaire à utiliser dans l'institution. Le tableau 1 nous permet de discerner les types de normes possibles, et les différents éléments constitutifs des normes régulatrices. Nous constatons que la norme régulatrice consiste généralement en une modalité déontique, conditionnelle ou non, a pour objet un état ou une action ou même une autre norme, nécessite des sanctions et des récompenses, est attribué à un destinataire qui peut être un agent tenant un rôle particulier ou un groupe d'agents, et existe au profit d'un bénéficiaire.

En fonction de ces éléments constitutifs, différentes qualifications peuvent être attribuées aux normes régulatrices. En l'absence de la modalité déontique, on parle de *norme descriptive*, et dans le cas contraire il s'agit de *norme d'injonction*. Lorsque l'objet de la norme consiste en un état ou une action, la norme est qualifiée de *position normative*, et lorsque la norme porte sur une autre norme, il s'agit d'un *pouvoir institutionnel*. Une norme caractérisée par un attribut, un but et une condition est une *stratégie partagée*, qui devient *norme sociale* lorsqu'on ajoute la modalité déontique, et qui devient *règle* lorsqu'elle est en plus munie des sanctions / récompenses.

La condition temporelle a été introduite dans certaines architectures avec des opérateurs temporels qualificatifs basiques (*before, after, between*), la condition spatiale a été mentionnée pour indiquer un concept de lieu, mais aucune structure formelle n'a jamais été proposée.

Des rôles normatifs sont souvent introduits dans les SMA normatifs, notamment le défenseur qui applique les normes, le législateur qui gère la création/modification ou suppression de norme, et le promoteur qui gère les récompenses. Pour un système plus fiable, il peut s'avérer nécessaire d'introduire un nouveau rôle : un exécuteur à la racine ou « *root enforcer* » qui se charge de surveiller et d'appliquer les normes à ceux qui sont chargés d'appliquer les normes comme les défenseurs. Dans d'autres cas, le choix des normes à adopter dépend de chaque agent, ou du groupe d'agents, auquel cas un « *conseiller normatif* » prend la décision pour le groupe.

Ces constatations nous incitent à adopter un modèle de norme avec un paramètre temporel plus explicite, et un paramètre spatial détaillé, qui sont tous primordiaux pour un système évoluant dans le temps et dans l'espace comme la gestion forestière à Madagascar.

Table 1 - Tableau récapitulatif des architectures de SMA normatifs et institutionnels

Réf.	Types de normes	Structure des normes régulatrices	Rôles normatifs
SIMAS (Muller et Aubert 2012)	Norme régulatrice	modalité déontique, rôle de sujet, rôle d'objet, rôle de lieu (condition spatiale), rôle d'agent, activité	
(Viganò et Colombetti 2007)	Norme régulatrice	modalité déontique, condition, but	
(Aldewereld et al. 2010)	Norme régulatrice, norme constitutive	conditions d'activation, d'expiration et de maintenance, fait	
(Cliffe, De Vos, et Padget 2007)	Pouvoir institutionnel, norme régulatrice	modalité déontique, condition (deadline)	

(y López, Luck, et d'Inverno 2006)	Normes générales (norme régulatrice, engagement social, code social), normes de législation, normes d'application, normes de récompenses	récompense, sanction, norme (en tant qu'objet), destinataire, bénéficiaire, contexte, exception, but	Défenseur, promoteur, législateur
(Fornara et Colombetti 2008)	Norme régulatrice	modalité déontique, buts, destinataire, bénéficiaire, contexte, exceptions, a-sanction, p-sanction, récompenses, condition temporelle, action	
(Boella et van der Torre 2004)	Normes régulatrices, normes constitutives	modalité déontique, condition, but, sanction	
(Interis 2011)	Norme d'injonction, norme descriptive	Sanction, action	
(Crawford et Ostrom 1995)	Stratégie partagée, norme sociale, règle	Sujet, modalité déontique, but, condition, sanction ou récompense	
(Rubino, Rotolo, et Sartor 2007)	Normes conditionnelles (règles et facteurs liens), normes inconditionnelles	Condition, jugement normatif (évaluatif, qualificatif, définitionnel, déontique, potestative, probant, existentiel, normes sur les jugements)	
(Demolombe et Louis 2006)	Normes statiques, normes dynamiques (pouvoirs institutionnels)	Condition, objet de la norme : action ou état, sujet de la norme (teneur de rôle), portée de la norme (en toute circonstance ou en exercice du rôle), modalité déontique	
(García-Camino, Noriega, et Rodríguez-Aguilar 2005)	Normes basées sur les protocoles, règles normatives	Normes basées sur les protocoles : scène, structure performative, structure dialogique règles normatives : modalité déontique, action, condition, sanction, condition temporelle (before, between, after)	
(Vázquez-Salceda, Aldewereld, et Dignum 2005)	Normes régulatrices, normes d'application	Modalité déontique, condition temporelle (deadline absolu ou relatif) ou non, exception, sanction, réparation, action, sujet	Exécuteur à la racine ou « Root enforcer »
(Savarimuthu et al. 2007)	Norme de groupe, norme personnelle	Punition, récompense	Conseiller normatif

Ainsi, les normes auxquelles est soumis un agent peuvent changer au cours du temps, à travers l'espace,

d'où le besoin de formaliser cette dimension spatio-temporelle qui n'a pas encore été approfondie dans la littérature, à travers une proposition de modèle de SMA institutionnel. Les processus à suivre et les outils nécessaires pour exploiter ce modèle en y intégrant la dimension spatio-temporelle afin d'obtenir le langage dédié à la description des normes vont être présentés dans le chapitre suivant.

# Chapitre 2

## OUTILS ET METHODE

Afin de pouvoir proposer notre langage de description de SMA institutionnel, nous avons besoin de le décrire formellement de manière compréhensible, à travers un langage ou par des graphiques. Comme nous avons procédé dans l'étude bibliographique, nous allons nous baser sur une ontologie de SMA institutionnel représentée par des modèles UML pour créer notre langage de description d'institution et de norme. Cette méthode qui part des modèles porte le nom de « Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) ».

### 2.1 Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM)

Devant la taille et la complexité des besoins actuels en matière de génie logicielle, et dans le souci d'assurer l'évolution continue des produits ainsi que de leur durée de vie, on remarque la multiplication des types d'acteurs impliqués dans les processus de développement logiciel. Ces différents types d'acteurs ont des compétences différentes et sont chargés de tâches différentes, tout en travaillant sur un même système. Cette multiplicité de points de vue conduit à une multiplicité de modèles (modèle de développement, de déploiement, de test, etc.), conçus spécialement afin de répondre aux questions que se posent ces différents acteurs.

En effet, le modèle est la représentation abstraite de la réalité afin d'arriver à un but spécifique. Ainsi, l'utilisation de modèles permet de se passer de la complexité du monde réel qui est souvent incompréhensible dans sa totalité, pour se concentrer sur les aspects du système qui permettent de résoudre le problème qu'on se pose. Le processus de développement peut être représenté par un ensemble de transformations de modèles en d'autres modèles.

L'OMG (Object Management Group) est un consortium qui se focalise sur la possibilité d'intégrer au fur et à mesure, de nouveaux codes dans des codes déjà développés, et de standardiser le modèle objet, ce qui n'est pas faisable avec un seul langage de programmation ou un seul système d'exploitation. D'où le besoin d'une certaine architecture pour assurer l'interopérabilité du système en question. Les principaux standards OMG sont :

- CORBA (Common Object Request Broker Architecture) (Pope 1998) : est une architecture logicielle pour le développement de composants et d'ORB (Object Request Broker). CORBA facilite l'intégration d'applications distribuées et hétérogènes, ainsi que la réutilisabilité et la portabilité des composants d'application, en se basant sur la technologie objet.
- UML (Unified Modeling Language) (Rumbaugh, Jacobson, et Booch 2004): qui permet de concevoir des modèles objets et de les manipuler durant la phase de conception. Ainsi, il est possible avant le développement de détecter et de corriger des problèmes sur les fonctionnalités attendues du système.
- MOF (Meta-Object Facility) : est un standard OMG définissant le langage de spécification des méta-modèles, et représente lui-même un exemple de méta-modèle car le méta-modèle est un modèle qui définit le langage d'expression d'un modèle. Le MOF est ainsi un méta-formalisme

permettant d'établir des langages de modélisation.

- XML Metadata Interchange (XMI) : est un format d'échange de modèles basés sur le MOF, et permet de faire le mapping entre MOF et le XML (eXtensible Markup Language). Le XMI permet la représentation des métadonnées et de leurs instances par un langage basé sur les balises. Pour cela, la génération transforme le méta-modèle en un DTD (Document Type Definition) et la sérialisation représente les modèles sous forme de document XMLs.
- Model Driven Architecture (MDA) (Soley 2000) est une approche définie par l'OMG qui s'appuie sur l'UML et le MOF (Meta-Object Facility), permettant le développement de système et d'interopérabilité permettant de décrire séparément les modèles pour les différentes phases du cycle de développement d'une application : analyse des besoins, modélisation, développement, déploiement, maintenance, etc. Principalement, le MDA utilise les modèles pour représenter le système et les méta-modèles pour définir le langage d'expression des modèles. En MDA, le système est un système de traitement d'informations (ex : un ordinateur, un programme, une entreprise, etc.).

La modélisation de l'OMG se base sur le principe que le modèle est décrit par un méta-modèle, le méta-modèle par un méta-méta-modèle, et ainsi de suite, d'où la pyramide de modélisation qui place le système à modéliser à la base de niveau  $M_0$ , les modèles de ce système dans le niveau  $M_1$ , les méta-modèles au niveau  $M_2$ , et le méta-méta-modèle au sommet de niveau  $M_3$  (figure 22) qui se décrit lui-même.

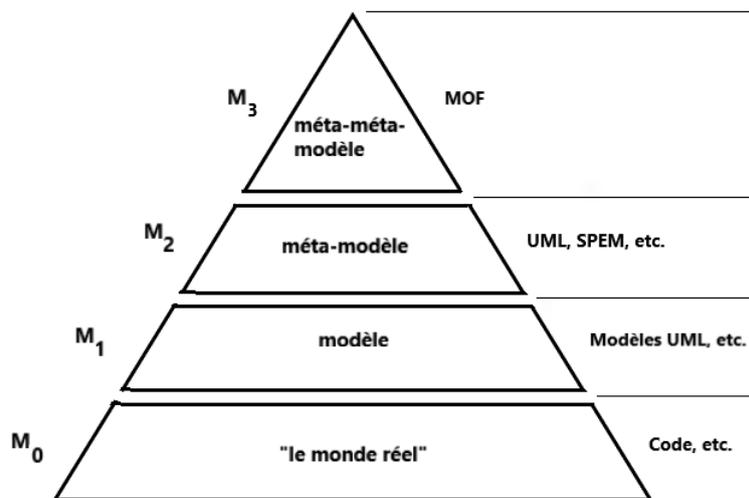


Figure 22 - Pyramide de modélisation de l'OMG (Bézivin 2003)

L'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) est une approche d'ingénierie basée sur les modèles, qui consiste à modéliser les applications à un haut niveau d'abstraction et à générer des codes à partir des modèles. Notons qu'un modèle est une spécification formelle de la fonction, la structure et le comportement d'un système dans un contexte donné, d'un point de vue spécifique, représentée par des schémas ou des textes. La spécification est formelle dans le sens où elle est associée à une sémantique qui la distingue des simples diagrammes et définissant le sens de chacun de ses concepts. Le modèle peut être utilisé pour répondre à des questions sur le système modélisé.

Les relations de dépendance entre modèle et méta-modèle sont décrites dans la figure 23. Le

méta-modèle décrit la spécification des modèles exprimés avec le langage de modélisation, chaque modèle se conforme à son méta-modèle. Le système est ici un ensemble de parties en relations et conçu pour atteindre un certain but. L'environnement décrit tout ce qui est extérieur au système. Un point de vue est un ensemble réutilisable de critères de construction, de sélection et de présentation d'éléments de modèles, pour un but particulier d'un porteur d'enjeu, et la vue est une représentation du système conforme à un point de vue.

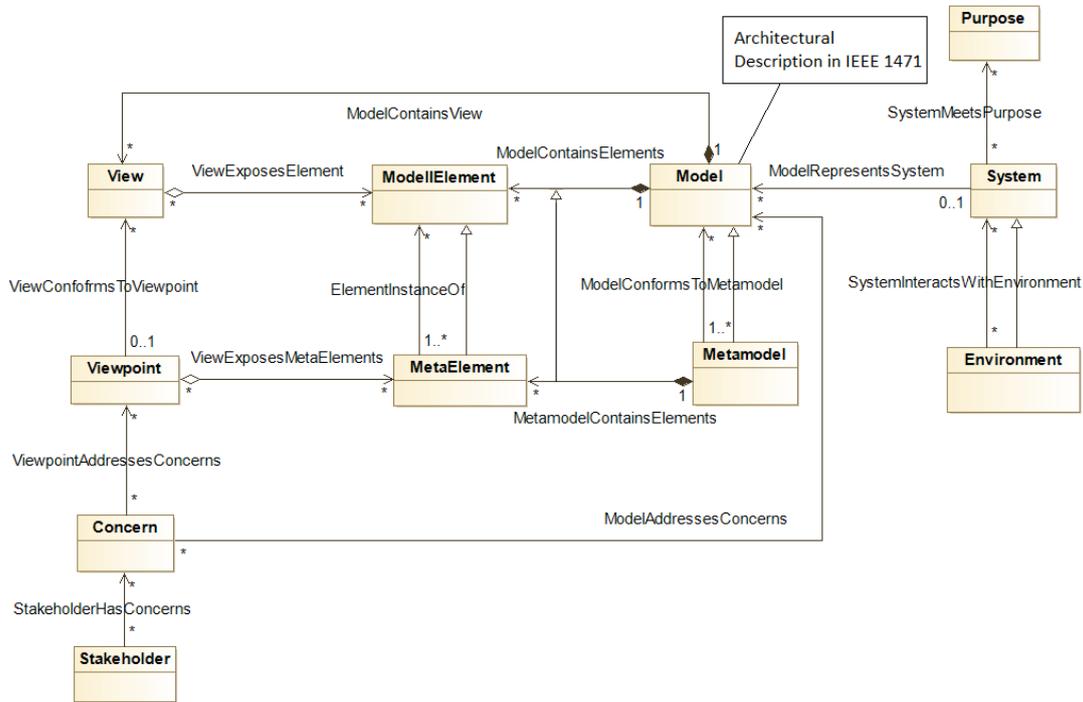


Figure 23 - Les relations entre modèles, méta-modèles et systèmes (2010)

L'IDM est basé sur les concepts de modèle représentant le système, et de méta-modèle définissant les langages d'expression des modèles. Le méta-modèle définit la syntaxe abstraite du langage de modélisation, et chaque modèle représente une instance plus concrète de son méta-modèle.

Pour construire un modèle, il faut une syntaxe concrète : des graphiques (comme les diagrammes d'UML) ou des textes (langage de script, par exemple). Le méta-modèle utilise des concepts. Un même méta-modèle peut avoir plusieurs syntaxes concrètes. Les méta-modèles peuvent être édités grâce aux différents outils qui existent actuellement comme le Papyrus UML qui est un modelleur UML open source, l'Eclipse EMF, le QVT, et le M2T(Acceleo). Les syntaxes concrètes textuelles peuvent être créées avec le cadriciel Xtext, et Sirius permet de définir les syntaxes concrètes graphiques. Le principe de l'IDM consiste à l'utilisation de langages de modélisation pour décrire un domaine particulier.

Un langage (de programmation ou de modélisation) en informatique est défini par sa syntaxe et sa sémantique. La syntaxe concrète (CS) est la version manipulée par l'utilisateur du langage, la syntaxe abstraite (AS) celle manipulée par l'ordinateur. Un lien d'abstraction existe entre la syntaxe concrète et la syntaxe abstraite ( $M_{ca}$ ), et enlève tous les éléments syntaxiques inutiles à l'analyse du programme. La sémantique du langage s'obtient par la correspondance ( $M_{cs}$ ) entre les constructions de la syntaxe abstraite et les états possibles du système qui forment le domaine sémantique (SD). La sémantique de la syntaxe concrète s'obtient par transitivité. Ces composantes sont décrites dans la figure 24.

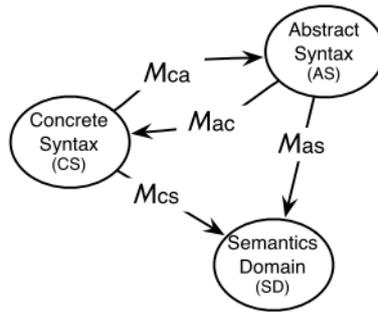


Figure 24 - Composantes d'un langage (Combemale 2008)

Lorsque le langage est conçu pour un domaine spécifique, on parle de Domain-Specific Language (DSL). Le modèle spécifié utilisant un DSL est appelé Domain-Specific Model (DSM).

Les étapes essentielles de l'IDM consistent à :

- La transformation de modèles qui consiste à transformer un modèle source en un autre modèle cible selon certaines règles de transformations. Il peut s'agir de transformation verticale de Modèle indépendant de plateforme (PIM ou Platform Independant Model) à Modèle spécifique de plateforme (PSM ou Platform Specific Model), ou horizontale (PIM à PIM ou PSM à PSM), ou peut servir pour les mapping et les traductions entre différents langages, comme le montre la figure 25. Le QVT (Query / View / Transformation) est un langage de spécification de transformation de modèle.

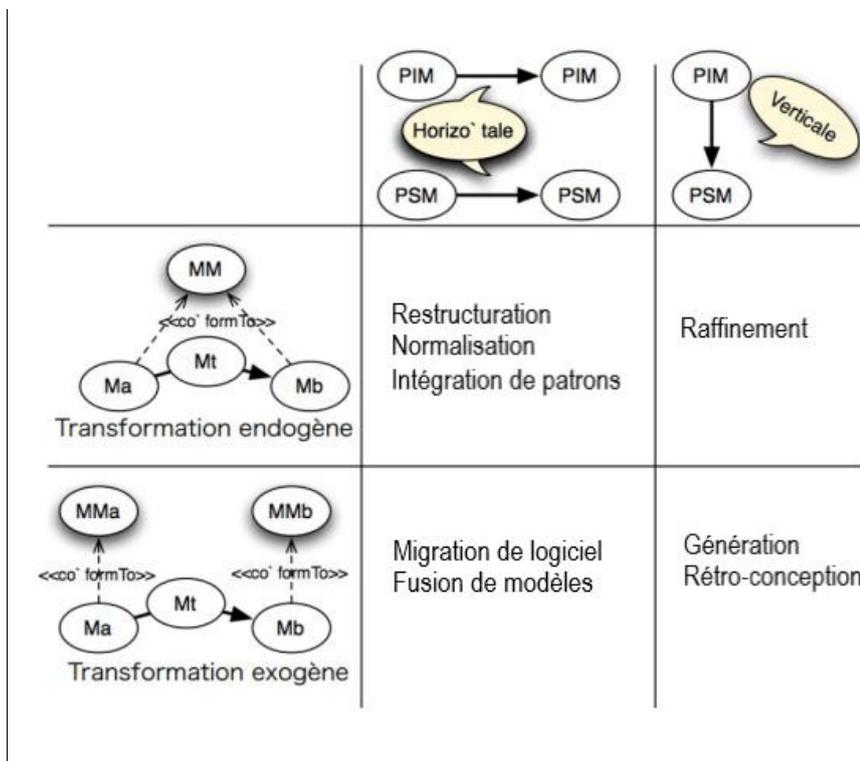


Figure 25 - Types de transformation et leurs principales utilisations (Combemale 2008)

- La génération de code qui consiste à générer des codes à partir de modèles ou plus précisément de

transformer un modèle dans sa syntaxe concrète textuelle.

- L'interprétation de modèles qui consiste à l'exécution de modèle sur une machine virtuelle sans avoir à générer de code ou à transformer le modèle.
- La validation de modèles ou vérification de consistance qui consiste à évaluer le modèle selon la sémantique et les contraintes syntaxiques, afin de déterminer la conformité du modèle au méta-modèle.

### 2.1.1 Syntaxe abstraite

La syntaxe abstraite (AS) décrit les concepts mis en jeu dans le langage et leurs relations. Les concepts principaux de méta-modélisation (MOF, Ecore, etc.) sur lesquels repose la description de la syntaxe abstraite sont décrits dans la figure 26. Le principal concept est le concept de classe qui définit les concepts utilisés dans le langage, une classe est composée de propriétés qui sont les attributs lorsque leur type est un type de donnée, et les références lorsque leur type est une autre classe. C'est avec ces concepts que l'on va décrire la syntaxe abstraite ou le méta-modèle.

Toutefois, certaines contraintes structurelles du langage définies dans la sémantique axiomatique qui est basée sur les logiques mathématiques ne peuvent être gérées par les langages de méta-modélisation. Ces contraintes peuvent être définies et gérées par le Object Constraint Language (OCL) qui est un langage formel de description de contraintes sur les modèles UML. OCL est donc un langage de spécification, et sa spécification a été définie par l'OMG.

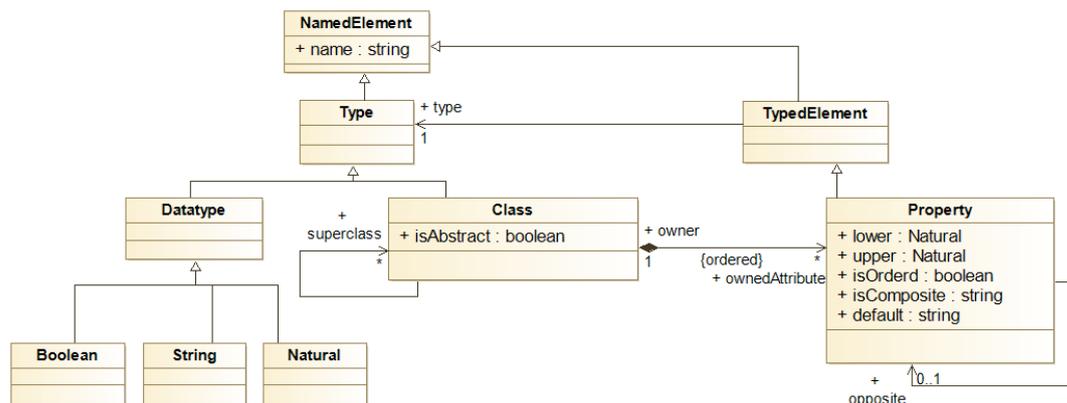


Figure 26 - Concepts principaux de métamodélisation (EMOF 2.0)

Il existe actuellement différents outils pour la représentation de la syntaxe abstraite (donc des méta-modèles), on peut citer

- Le MOF (Meta-Object Facility) (2016)
- Le Eclipse-EMF/Ecore (Merks et al. 2003)
- le XMF-Mosaic/Xcore (Mosaic 2007)
- Kermata (Kernel Metamodeling) le KM3 (Kernel MetaMetaModel)
- le OWL (Web Ontology Language) (McGuinness et Van Harmelen 2004)
- le GME (The Generic Modeling Environment) (Ledeczki et al. 2001)

Nous avons utilisé EMF ou Eclipse Modeling Framework qui est un framework de modélisation permettant de générer des codes à partir de modèles. EMF manipule des modèles de type Ecore, dont les concepts sont semblables aux concepts objets préfixés par « E ».

## 2.1.2 Syntaxe concrète

La syntaxe concrète (CS) d'un langage est représentée par un formalisme graphique ou textuel, permettant d'instancier les concepts de la syntaxe abstraite. Le formalisme textuel décrit la syntaxe des expressions, et le formalisme graphique décrit la représentation graphique des concepts et de leurs relations dans le modèle. Le mapping  $M_{ac}: AS \leftrightarrow CS$  fait correspondre chaque élément de construction du langage défini dans la syntaxe abstraite à un élément visuel ou textuel pouvant être manipulé par l'utilisateur dans la syntaxe concrète.

Parmi les outils existants pour la description de la syntaxe concrète, on peut citer

- le GMF (Graphical Modeling Framework) : est un outil de l'environnement de travail Eclipse qui permet d'avoir un éditeur graphique basé sur les frameworks EMF et GEF.
- TOPCASED (Toolkit in Open Source for Critical Applications & Systems Development) (Farail et al. 2006) est un logiciel contenant un IDE basé sur le framework de la plateforme de développement Eclipse, dans lequel sont implémentés des moyens d'analyse d'exigences, modélisation, simulation de modèles, implémentation, test, validation, retro-ingénierie, génération de code, de modèles et de documentation et gestion de projet.
- Merlin Generator est un plugin Eclipse facilitant le processus d'automatisation de la génération de code et de transformation de modèle.
- SIRIUS (Viyović, Maksimović, et Perisić 2014) est un projet Eclipse permettant la création d'éditeurs de type graphique.
- GEMS (Generic Eclipse Modeling System) (White, Schmidt, et Mulligan 2007) est un outil configurable permettant de créer des environnements de modélisation et de synthèse de programmes spécifiques à un domaine pour Eclipse.
- TIGER (Biermann, Ermel, et Taentzer 2006) permet la génération d'environnements de modélisation basés sur GEF.
- Xtext (Behrens et al. 2008) est un plugin Eclipse permettant de créer un éditeur textuel pour un DSL sur la base d'un modèle Ecore.

Notre choix s'est porté sur Xtext qui est un des éditeurs textuels les plus utilisés pour la description de la syntaxe concrète textuelle d'un langage dédié sur la base du méta-modèle Ecore correspondant au méta-modèle UML que nous avons proposé. Le fait que Xtext intègre tous les aspects d'un IDE moderne : parseur, compilateur, interpréteur, et intégration complète dans l'environnement de développement Eclipse le rend facile d'utilisation.

Pour bénéficier de Xtext, il est nécessaire de partir d'un langage basé sur l'EBNF (Extend Backus Naur Form) et de le transformer en grammaire Xtext (Yue 2014). L'EBNF est une extension du métalangage BNF. Cette forme permet de condenser la notation BNF et de la rendre plus lisible.

Les caractères représentant les opérateurs sont les suivants (par ordre de priorité croissante) :

- \* répétition
- - absence

- , concaténation
- | choix
- = définition
- ; terminaison

La priorité normale est substituée par les signes de ponctuations par paires suivantes :

- ‘ terminal ambigu ’
- « terminal ambigu »
- (\* commentaire \*)
- (groupe)
- [groupe optionnel]
- {groupe répété}
- ?séquence spéciale ?

Le tableau suivant montre les correspondances entre les notations EBNF et les notations Xtext.

Table 2 - Notations dans EBNF et Xtext (Yue 2014)

Usage	Notation EBNF	Notation Xtext
Définition	=	:
Concaténation	,	(Concaténer directement sans notation)
Interruption	;	;
Alternance		
Option	[...]	(...)?
Répétition	{...}	(...)*
Groupement	(...)	(...)
Terminal de type « String »	« ... »	'...'
Commentaire	(*...*)	'/*?_>'*/'
Exception	-	!

### 2.1.3 Sémantique

La définition de la sémantique d'un langage consiste à donner de manière précise la signification des constructions du langage selon la syntaxe abstraite définie. Pour cela, il est nécessaire de définir le domaine de la sémantique, appelé aussi domaine du discours, qui regroupe l'ensemble des choses dont on peut parler sur le système à modéliser. Le mapping  $M_{as}$  fait correspondre chaque élément de la syntaxe abstraite vers un élément dans le domaine de discours. La manipulation des modèles nécessite par conséquent une formalisation de la sémantique. En effet, la sémantique est dite formelle lorsqu'elle est exprimée par un formalisme mathématique, et permet de vérifier la cohérence et la complétude de cette définition.

La sémantique peut être catégorisée en 3 types : sémantique axiomatique, sémantique dénotationnelle et sémantique opérationnelle (Combemale et al. 2006).

- La sémantique axiomatique consiste à prouver les propriétés des constructions du langage par la logique mathématique. Plus précisément, il s'agit de démontrer des propriétés, ou de déduire les préconditions nécessaires que doivent vérifier les éléments du langage avant l'exécution du modèle,

pour aboutir à la postcondition. La sémantique axiomatique est généralement exprimée par les triplets de Hoare :  $\{p\}S\{q\}$ , où  $p$  est la précondition,  $q$  la postcondition, et  $S$  est une instruction, une série d'instructions, une fonction, un programme, etc. On a :  $\{p\}S\{q\}$  si

- $p$  est vrai, et si  $S$  se termine, alors  $q$  est vrai après la terminaison de  $S$  ;
- l'instruction  $S$  est partiellement correcte par rapport à la précondition  $p$  et la postcondition  $q$ .

Dans notre cas, il s'agit de garantir la cohérence de ces constructions par les règles bien formées qui devront être respectées par les modèles. La conformité d'un modèle à ces règles peut être vérifiée par simple analyse statique du modèle. L'OMG suggère l'utilisation de l'OCL pour exprimer ces règles, qui permet de décrire des contraintes sur les propriétés du méta-modèle UML qui n'ont pas pu être décrites dans la modélisation. Des vérificateurs OCL permettent ensuite de vérifier la conformité du modèle aux contraintes établies dans ces règles.

- La sémantique dénotationnelle consiste à formaliser les significations d'un langage en utilisant les mathématiques. Elle est fournie par la traduction du concept du langage d'origine vers un formalisme d'expression de la sémantique. Il s'agit donc d'une transformation vers un autre espace de modélisation. Dans notre cas, cela consiste à faire correspondre les concepts du méta-modèle à leurs significations réelles exprimées sous une forme manipulable par l'utilisateur de l'outil de modélisation.
- La sémantique opérationnelle décrit le comportement dynamique des constructions d'un langage. En effet, elle décrit les étapes d'exécution d'un programme. Dans notre cas, la sémantique opérationnelle décrit le calcul de la composition de deux unités spatiales ou temporelles et l'obtention de la valeur sur une opération effectuée entre ces unités, ainsi que le calcul des normes applicables en fonction des paramètres sociaux et spatio-temporels.

Le sens d'un modèle est défini à travers la sémantique suivant un domaine contenant l'ensemble des valeurs pouvant être attribuées aux instances du modèle, qui est le domaine sémantique. Toutefois, plusieurs domaines sémantiques peuvent être utilisés pour un même modèle, selon le contexte de l'étude.

Après avoir défini le domaine sémantique, des règles sémantiques sont nécessaires pour raisonner et définir le sens d'une expression du langage dans ce domaine. Ces règles sont définies pour chaque construction de la syntaxe abstraite.

Le modèle que nous allons proposer sera donc traduit en langage dédié grâce à l'IDM. Comme le socio-écosystème dont nous voulons modéliser la gestion est réparti sur des surfaces géographiques, et que la gestion des ressources qui s'y trouvent dépend du temps, nous avons besoin d'intégrer une algèbre temporelle et une algèbre spatiale respectivement pour le calcul des relations entre unités temporelles et spatiales. D'où le besoin d'adopter une algèbre temporelle et une algèbre spatiale parmi les propositions existantes dans la littérature. Mais auparavant, nous allons introduire la logique de description qui nous servira de base pour définir la sémantique et que nous étendrons avec le temps et l'espace.

## 2.2 Logique de description

Sachant que notre but est de proposer un modèle SMA institutionnel ainsi que le langage de description correspondant, nous avons besoin d'une logique pour écrire les expressions décrivant les faits et les actions pour formuler les normes. La logique de description est utilisée pour représenter formellement les

connaissances terminologiques sur un domaine. Étant donné que notre langage de description de SMA institutionnel va décrire les terminologies pour formuler les normes et structurer des expressions, nous allons utiliser la logique de description dans la formalisation du langage et des expressions sur les normes.

### 2.2.1 Définition

La Logique de Description (DL)(Nut 2003) est un langage formel de représentation de connaissances composé essentiellement de la partie terminologie décrite par le TBox et le RBox, et des assertions décrites dans le ABox. Le TBox contient le vocabulaire général du domaine d'application, le RBox décrit les caractéristiques des rôles, et le ABox contient les assertions de connaissance qui sont les définitions des types des individus nommés, notamment les assertions de concept et les assertions de rôle.

Le vocabulaire est fait de concepts qui représentent les individus ou des ensembles d'individus, et de rôles qui sont les relations binaires entre individus. Il est toutefois possible de construire de nouveaux concepts plus complexes sur la base de ces concepts et rôles. Le TBox fait correspondre des noms aux concepts complexes et de rôles.

Les éléments basiques des langages des descriptions sont donc les concepts atomiques et les rôles atomiques. Les descriptions complexes sont construites avec les constructeurs de concept. Les langages de description se distinguent par les constructeurs qu'ils fournissent.

Les DL sont basées sur les 3 ensembles disjoints d'éléments primaires : les noms individuels désignant les entités singulières du domaine, les noms de concept se référant aux types, catégories, classes ou entités c'est-à-dire les propriétés communes, et les noms de rôles dénotant les relations binaires entre individus du domaine. La définition de ces mots est décrite dans le TBox.

### 2.2.2 Syntaxe et sémantique

A partir des éléments basiques conceptuels qui sont les concepts atomiques et les rôles atomiques, on peut construire d'autres types plus complexes de concepts, ensuite on peut décrire la terminologie (TBox) en déclarant des axiomes terminologiques construits avec ces types de concepts, et on peut par la suite décrire un domaine d'application particulier (ABox) sur la base de cette terminologie. Les relations entre rôles (inclusion ou implication) peuvent être décrites dans le RBox.

En DL, l'interprétation  $I$  fournit le domaine ou l'univers du discours désignant l'ensemble des individus et des choses dans le monde et leurs relations, soit l'ensemble non-vide  $\Delta^I$  et la fonction d'interprétation  $^I$  qui fait correspondre les éléments du vocabulaire (noms d'individus, noms de concept et noms de rôle) au domaine du discours  $\Delta^I$ .

La sémantique de la DL est définie par les interprétations, et une interprétation  $I$  est définie par  $I=(\Delta^I, ^I)$  où  $\Delta^I$  est le domaine de l'interprétation ou l'univers du discours désignant l'ensemble des individus et des choses dans le monde et leurs relations, et  $^I$  la fonction d'interprétation faisant correspondre les éléments du vocabulaire (noms d'individus, noms de concept et noms de rôle) au domaine du discours  $\Delta^I$ :

- à chaque nom d'individu  $a \in N_I$  correspond un individu  $a^I \in \Delta^I$
- à chaque nom de concept  $A \in N_C$  correspond un sous ensemble  $A^I \subseteq \Delta^I$  du domaine
- à chaque nom de rôle  $r \in N_R$  correspond un ensemble  $r^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I$  de relations binaires d'éléments du domaine (Rudolph 2011)

### 2.2.2.1 La description de concepts

La description de concepts dans le langage de description basique  $AL$  peut revêtir les différentes formes suivantes :

- $C, D \rightarrow A$  | (*concept atomique*)
- $\top$  | (*concept universel*)
- $\perp$  | (*concept impossible*)
- $\neg A$  | (*négation atomique*)
- $C \sqcap D$  | (*intersection de concepts*)
- $\forall R.C$  | (*restriction de valeur*)
- $\exists R.\top$  (*quantification existentielle limitée*)

où  $A$  est un concept atomique,  $R$  un rôle atomique,  $C$  et  $D$  des descriptions de concepts.

Ces descriptions de concepts servent à définir les axiomes qui sont les expressions reliant les concepts pouvant être vrais ou faux, et sont interprétées comme suit :

- $\top^I = \Delta^I$
- $\perp^I = \emptyset$
- $(\neg A)^I = \Delta^I \setminus A^I$
- $(C \sqcap D)^I = C^I \cap D^I$
- $(\forall R.C)^I = \{a \in \Delta^I \mid \forall b. (a, b) \in R^I \rightarrow b \in C^I\}$
- $(\exists R.\top)^I = \{a \in \Delta^I \mid \exists b. (a, b) \in R^I\}$

Ces caractéristiques définissent le  $ALC$  ou *Attributive Language with Complements*, la plus petite DL permettant d'appliquer les opérateurs booléens aux concepts sans restriction. Ces caractéristiques ont été enrichies pour spécifier d'autres formalismes plus expressifs. Les rôles inverses sont utilisés pour inverser les rôles, les contraintes de cardinalité pour spécifier le nombre des instances reliées, les nominales pour énumérer les instances de classe. L'insertion individuelle peut être une assertion de concept, une assertion de rôle, une assertion de rôle avec négation, une expression d'égalité ou une expression d'inégalité (Nut 2003).

L'extension de l' $AL$  par un ensemble de constructeurs donne lieu à un langage- $AL$  particulier. Chaque langage est nommé par un mot de la forme  $AL[\mathcal{U}][\mathcal{E}][\mathcal{N}][\mathcal{C}]$ , chaque lettre correspondant à la présence du constructeur correspondant, tel que :

- $\mathcal{U}$  introduit la disjonction de concepts :  $AL\mathcal{U} = AL \cup \{C \cup D\}$
- $\mathcal{E}$  introduit la quantification existentielle typée :  $AL\mathcal{E} = AL \cup \{\exists r.C\}$
- $\mathcal{N}$  introduit la cardinalité de rôles :  $AL\mathcal{N} = AL \cup \{\geq n r, \leq n r\}$
- $\mathcal{C}$  introduit la négation de concepts définis :  $AL\mathcal{C} = AL \cup \{\neg C\}$

Les noms de concept peuvent être combinés en concepts complexes via des opérateurs booléens (comme l'union ou l'intersection), ou en quantifiant les rôles par  $\exists$  ou  $\forall$ .

La convention de nommage en DL est décrite par :  $((ALC \mid S)[\mathcal{H}] \mid SR) [\mathcal{O}][\mathcal{I}][\mathcal{F}|\mathcal{N}|\mathcal{Q}]$  dont voici quelques caractéristiques couramment utilisées :

- $ALC$  ne permet pas les axiomes RBox ainsi que le rôle universel, les rôles inverses, les contraintes de cardinalité, les concepts nominaux, et les self concepts.
- $S$  est l' $ALC$  permettant l'expression transitive c'est-à-dire les axiomes de chaînes de rôle
- $ALC$  et  $S$  peuvent être étendus par les hiérarchies de rôle ( $ALCH$  ou  $S\mathcal{H}$ ) qui permettent l'inclusion de rôle simple

- $\mathcal{SR}$  est le  $ALC$  étendu avec les types d'axiome de RBox et les self concepts
- $\mathcal{O}$  indique que les concepts nominaux sont supportés
- $\mathcal{I}$  indique que les rôles inverses sont supportés
- La lettre  $\mathcal{F}$  à la fin du nom de DL permet l'expression de fonctionnalité sur le rôle pouvant être exprimé par  $\top \sqsubseteq \leq 1.\top$ .
- Le  $\mathcal{N}$  à la fin de la DL permet les restrictions de valeur non qualifiée, c'est-à-dire les concepts de la forme  $\geq nr.\top$  et  $\leq nr.\top$
- $\mathcal{Q}$  indique que les restrictions de valeur qualifiée arbitrairement sont permises.

D'après les sémantiques des axiomes, les bases du raisonnement en DL sont la vérification de satisfiabilité/consistance, la vérification de subsumption, et la vérification d'instance (Rudolph 2011).

### 2.2.2.2 La terminologie (TBox)

Les axiomes terminologiques caractérisant le TBox (Nut 2003) peuvent avoir les formes suivantes :

- $C \sqsubseteq D$  ( $R \sqsubseteq S$ ) pour exprimer une inclusion de concepts
- $C \equiv D$  ( $R \equiv S$ ) pour exprimer une égalité de concepts

où  $C$  et  $D$  sont des concepts,  $R$  et  $S$  des rôles

Exemple : Soient les concepts atomiques *parent*, *mère* et *père*, alors nous pouvons écrire  $parent \equiv père \cup mère$  et  $père \sqsubseteq parent$ .

L'interprétation  $I$  satisfait :

- $C \sqsubseteq D$  si  $C^I \sqsubseteq D^I$  ;
- $C \equiv D$  si  $C^I = D^I$ .

Le RBox fait partie de la partie terminologie, et permet de modéliser des relations entre rôles. Il s'agit notamment de l'inclusion de rôles de la forme :

$$R_1 \sqsubseteq R_2 \text{ où } R_1 \text{ et } R_2 \text{ sont des rôles}$$

L'interprétation  $I$  satisfait :

$$R_1 \sqsubseteq R_2 \text{ si } \forall x_1 \forall x_2, ((x_1^I, x_2^I) \in R_1^I \rightarrow (x_1^I, x_2^I) \in R_2^I)$$

### 2.2.2.3 La description du monde (ABox)

Les axiomes dans le ABox décrivent un domaine d'application particulier en termes de concepts et de rôles, en les faisant correspondre à des noms d'individus. Le vocabulaire décrivant le monde réel est donc basé sur les *concepts* qui dénotent les ensembles d'individus, les *rôles* qui dénotent les relations binaires entre individus, et les *individus*. Ainsi, la syntaxe se définit comme suit (Nut 2003):

Soient  $x, y$  des noms d'individus,  $D$  un concept et  $R$  un rôle :

- $D(x)$  est une assertion de concept qui affirme que  $x$  est un nom de concept  $D$
- $R(x, y)$  une assertion de rôle qui exprime que  $x$  et  $y$  sont liés par la relation  $R$

Exemple : Soient *Pierre* et *Marie* des noms d'individus, et *Père* un concept, alors  $Père(Pierre)$  signifie que *Pierre* est père, et  $avoirEnfant(Marie, Pierre)$  signifie que *Marie* a pour enfant *Pierre*.

Si l'interprétation fait correspondre les concepts atomiques et les rôles atomiques du TBox à des éléments du domaine, elle fait correspondre également les noms d'individus dans le ABox à des éléments du domaine. On dit que l'interprétation  $I$  satisfait :

- l’assertion de concept  $D(x)$  si  $x^I \in D^I$  ;
- et l’assertion de rôle  $R(x, y)$  si  $(x^I, y^I) \in R^I$ .

Si  $T$  est un ensemble d’axiomes, alors  $I$  satisfait  $T$  si et seulement si  $I$  satisfait chaque élément de  $T$ . Si  $I$  satisfait un axiome (resp. un ensemble d’axiomes), alors on dit que c’est un modèle de cet axiome (resp. de cet ensemble d’axiomes). Deux axiomes ou deux ensembles d’axiomes sont équivalents s’ils ont les mêmes modèles.

Un ensemble d’axiomes (TBox ou ABox) est satisfaisable ou consistant s’il a un modèle. Un modèle d’un ensemble d’axiomes est une interprétation  $I$  qui satisfait tous ses axiomes. La vérification de subsumption consiste à vérifier si un concept  $C$  est subsumé par un autre concept  $D$  dans la base de connaissance, ce qui est vrai si  $C^I \subset D^I$  pour tout modèle  $I$  de la base. La vérification d’instance consiste à vérifier si un individu (nom)  $a$  appartient à un concept  $C$  dans une base de connaissance, ce qui est vrai si  $a^I \in C^I$  pour tout modèle  $I$  de la base de connaissance.

### 2.2.3 Synthèse

La DL nous servira donc à décrire le système à modéliser, qui est le socio-écosystème, composé du système humain et de l’écosystème dans lequel il se trouve comme nous l’avons vu dans 1.1. La DL est basée sur la notion de concept, qu’on peut munir de relation d’égalité ou d’inclusion, et avec lequel on peut définir des noms et des relations.

Afin d’intégrer le paramètre spatio-temporel qui est indissociable avec l’évolution du socio-écosystème, il nous faut adopter un moyen de le représenter, et d’en faire le calcul. La littérature existante nous permet de faire le choix des logiques et algèbres spatiales et temporelles les mieux adaptées pour notre cas.

## 2.3 Logique et algèbre temporelles

La logique temporelle consiste à déterminer la valeur de vérité d’un énoncé qui change au fil du temps, comme les conditions sur les normes. La logique temporelle utilise principalement la sémantique des mondes possibles munis d’une relation d’accessibilité. On y introduit des opérateurs modaux (ensuite, toujours, etc.) dont la sémantique dépend de cette relation d’accessibilité. Intuitivement un monde possible correspond à un état du monde (ou situation) et la relation d’accessibilité formalise la succession qui peut définir un ordre total pour un temps linéaire ou partiel pour un temps arborescent (plusieurs futurs ou passés possibles).

L’algèbre temporelle consiste à faire des calculs sur des expressions temporelles exprimées en fonction des objets temporels.

Dans notre cas, nous devons utiliser l’algèbre temporelle car nous avons besoin de connaître les normes applicables à un agent à un certain instant, d’où le besoin de calculer si cet instant quelconque est inclus dans la durée d’activation de certaines normes, et d’effectuer donc des calculs temporels.

Nous allons nous baser sur une logique temporelle pour notre proposition d’écriture des expressions temporelles dont la sémantique est décrite par une algèbre temporelle choisie.

Les formalismes existants les plus utilisés pour la logique et l’algèbre temporelles sont décrits ci-après.

### 2.3.1 Linear Temporal Logic (LTL)

Le Linear Temporal Logic (LTL) (Pnueli 1977) ou parfois appelé Propositional Temporal Logic (PTL) ou Logique Temporelle Linéaire est une logique modale avec des modalités temporelles pour raisonner de façon linéaire sur un ensemble de propositions combinées par des connecteurs logiques. Une expression LTL est constituée d'un ensemble fini de variables propositionnelles  $AP$ , des opérateurs logiques  $\neg$  et  $\vee$ , et des opérateurs temporels modaux  $X$  qui se lit comme suivant, et  $U$  comme jusqu'à. Il existe en outre des opérateurs logiques supplémentaires ( $\wedge, \rightarrow, \leftarrow, \rightarrow, \text{vrai et faux}$ ) et des opérateurs temporels supplémentaires dont  $G$  (globally) pour toujours,  $F$  (in the future) pour éventuellement,  $R$  (release) pour la réalisation et  $W$  (weakly until) pour faible jusqu'à. Les formules LTL sont définies comme suit :

- si  $p \in AP$  alors  $p$  est une formule LTL
- si  $\psi$  et  $\varphi$  sont des formules LTL alors  $\neg \psi, \varphi \vee \psi, X \psi, \text{ et } \varphi U \psi$  sont des formules LTL.

La sémantique s'opère comme suit : la formule LTL est satisfaite par une suite infinie d'évaluations de vérité des variables propositionnelles dans  $AP$ . Soit  $w = a_0, a_1, a_2, \dots$  un mot- $w$ . Soit  $w(i) = a_i$  et  $w^i = a_i, a_{i+1}, \dots$  qui est un suffixe de  $w$ . Sachant que  $\models$  désigne la relation de satisfaction entre un mot et une formule de LTL, on a :

- $w \models p$  si  $p \in w(0)$
- $w \models \neg \psi$  si  $w \not\models \psi$
- $w \models \varphi \vee \psi$  si  $w \models \varphi$  ou  $w \models \psi$
- $w \models X \psi$  si  $w^1 \models \psi$  ( $\psi$  doit être vrai à l'étape suivante)
- $w \models \varphi U \psi$  s'il existe  $i \geq 0$  tel que  $w^i \models \psi$  et pour tout  $0 \leq k < i, w^k \models \varphi$  ( $\varphi$  doit rester vrai jusqu'à ce que  $\psi$  devienne vrai)

En outre,

- $\varphi R \psi \equiv \neg(\neg \varphi U \neg \psi)$
- $F \psi \equiv \text{vrai} U \psi$  ( $\psi$  devient éventuellement vrai)
- $G \psi \equiv \text{faux} R \psi \equiv \neg F \neg \psi$  ( $\psi$  reste toujours vrai)

### 2.3.2 Computation Tree Logic (CTL)

Le CTL (E. M. Clarke et Emerson 1981) ou logique temporelle arborescente représente le temps par un arbre des mondes possibles. Il se diffère syntaxiquement de la LTL par la distinction de la modalité universelle qui s'intéresse à tous les chemins possibles à partir d'un état, et de la modalité existentielle qui s'intéresse à l'existence de certains chemins à partir d'un état. La grammaire suivante décrit les formules bien formées en CTL :

$$\begin{aligned} \phi ::= & \top \mid \perp \mid p \mid (\neg \phi) \mid (\phi \vee \psi) \mid (\phi \\ & \wedge \psi) \mid A X \phi \mid E X \phi \mid A F \phi \mid E F \phi \mid A G \phi \mid E G \phi \mid A(\phi_1 U \phi_2) \mid E(\phi_1 U \phi_2) \end{aligned}$$

avec  $p$  un ensemble de formules atomiques,  $A$  signifie pour tous les chemins, et  $E$  signifie qu'il existe au moins un chemin.

La sémantique est définie sur un système de transitions d'états  $M = (S, \rightarrow, L)$  avec  $S$  un ensemble d'états muni d'une relation de succession  $\rightarrow$  et  $L$  une fonction assignant des lettres aux états (ceux qui sont

vrais dans cet état),  $s \in S, \phi \in F$  qui est un ensemble de formules bien formées sur le langage  $M$ , et la relation  $(M, s \models \phi)$  est définie récursivement sur  $\phi$ . On a :

- $((M, s) \models \top) \wedge ((M, s) \not\models \perp)$
- $((M, s) \models p) \Leftrightarrow (p \in L(s))$
- $((M, s) \models \neg \phi) \Leftrightarrow ((M, s) \not\models \phi)$
- $((M, s) \models \phi_1 \vee \phi_2) \Leftrightarrow (((M, s) \models \phi_1) \vee ((M, s) \models \phi_2))$
- $((M, s) \models \phi_1 \wedge \phi_2) \Leftrightarrow (((M, s) \models \phi_1) \wedge ((M, s) \models \phi_2))$
- $((M, s) \models A X \phi) \Leftrightarrow (\forall (s \rightarrow s_1) ((M, s_1) \models \phi))$
- $((M, s) \models E X \phi) \Leftrightarrow (\exists (s \rightarrow s_1) ((M, s_1) \models \phi))$
- $((M, s) \models A F \phi) \Leftrightarrow (\forall (s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots)(s = s_1) \exists i((M, s_i) \models \phi))$
- $((M, s) \models E F \phi) \Leftrightarrow (\exists (s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots)(s = s_1) \exists i((M, s_i) \models \phi))$
- $((M, s) \models A G \phi) \Leftrightarrow (\forall (s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots)(s = s_1) \forall i((M, s_i) \models \phi))$
- $((M, s) \models E G \phi) \Leftrightarrow (\exists (s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots)(s = s_1) \forall i((M, s_i) \models \phi))$
- $((M, s) \models A[\phi_1 U \phi_2]) \Leftrightarrow (\forall (s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots)(s = s_1) \exists i(((M, s_i) \models \phi_2) \wedge (\forall (j < i)(M, s_j) \not\models \phi_1)))$
- $((M, s) \models E[\phi_1 U \phi_2]) \Leftrightarrow (\exists (s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots)(s = s_1) \exists i(((M, s_i) \models \phi_2) \wedge (\forall (j < i)(M, s_j) \models \phi_1)))$

### 2.3.3 CTL\*

Une version généralisée du CTL nommée CTL\* (Emerson et Halpern 1986) mélange les quantificateurs de chemins  $\forall, \exists$  et d'état  $G, F, X, U$  et offre la possibilité de raisonner en préfixant les formules de chemins par les quantificateurs universel et existentiel. La syntaxe est donnée par la grammaire suivante :

$$\Phi ::= \top \mid p \mid \neg \Phi \mid (\Phi \wedge \Phi) \mid A \phi \mid E \phi \text{ où } p \text{ est une proposition atomique}$$

$$\phi ::= \Phi \mid \neg \phi \mid (\phi \wedge \phi) \mid X \phi \mid (\phi U \phi)$$

Les formules CTL\* valides sont construites en utilisant le symbole  $\Phi$  et sont des formules d'état, tandis que  $\phi$  désigne ici une formule de chemin. La sémantique est définie dans une structure de Kripke donc sur la base des mondes possibles.

Une structure de Kripke est un modèle de calcul représenté par un graphe orienté tel que les nœuds représentent les états accessibles dans le système, et les arcs les transitions entre les états. La fonction d'étiquetage fait correspondre à un état l'ensemble des propositions logiques vraies dans cet état. Formellement, une structure de Kripke est caractérisée par :

- Un ensemble fini d'états  $S$
- Un ensemble d'états initiaux  $I$  tel que  $I \subseteq S$
- Une relation de transition  $R \subseteq S * S$  telle que  $\forall s \in S, \exists s' \in S$  tel que  $(s, s') \in R$
- Une fonction d'étiquetage ou d'interprétation  $L : S \rightarrow 2^{AP}$

Un chemin est défini par une suite d'états  $s_1, s_2, s_3, \dots$  telle que  $(s_i, s_{i+1}) \in R$  pour tout  $i$ . Pour la sémantique, on note  $s \models \Phi$  lorsqu'un état  $s$  d'une structure de Kripke satisfait une formule d'état  $\Phi$ .

- $A \phi$  indique que  $\phi$  sera vérifiée dans tous les chemins possibles
- $E \phi$  indique qu'il existe un chemin tel que  $\phi$  soit vérifiée
- $X \phi$  indique que  $\phi$  sera vérifiée dès l'étape suivante du chemin

- Pour deux formules de chemin  $\phi_1$  et  $\phi_2$ ,  $\phi_1 U \phi_2$  indique que  $\phi_1$  sera vérifiée dans la suite du chemin, jusqu'à ce que  $\phi_2$  soit vraie

En supposant que  $s \models \phi$  lorsqu'un état  $s$  d'une structure de Kripke satisfait une formule d'état  $\phi$ , on a :

- $(M, s) \models \top$  toujours
- $(M, s) \models p \Leftrightarrow p$  est vrai à l'état  $s$
- $(M, s) \models \neg \phi \Leftrightarrow (M, s) \not\models \phi$
- $(M, s) \models \phi_1 \wedge \phi_2 \Leftrightarrow ((M, s) \models \phi_1) \wedge ((M, s) \models \phi_2)$
- $(M, s) \models A\phi \Leftrightarrow \Pi \models \phi$  pour tout chemin  $\Pi$  commençant en  $s$
- $(M, s) \models E\phi \Leftrightarrow \Pi \models \phi$  pour au moins un chemin  $\Pi$  commençant en  $s$

Notons que  $\pi \models \phi$  si un chemin  $\pi = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$  d'une structure de Kripke satisfait une formule de chemin  $\phi$ , et  $\pi[n]$  le sous-chemin  $s_n \rightarrow s_{n+1} \rightarrow \dots$ . On a :

- $(M, \pi) \models \phi \Leftrightarrow (M, s_0) \models \phi$
- $(M, \pi) \models \neg \phi \Leftrightarrow (M, \pi) \not\models \phi$
- $(M, \pi) \models \phi_1 \wedge \phi_2 \Leftrightarrow (M, \pi) \models \phi_1 \wedge (M, \pi) \models \phi_2$
- $(M, \pi) \models X\phi \Leftrightarrow (M, \pi[1]) \models \phi$
- $(M, \pi) \models (\phi_1 \cup \phi_2) \Leftrightarrow \exists n \geq 0$  tel que  $(M, \pi[n]) \models \phi_2$  et  $\forall 0 \leq k < n$  on a  $(M, \pi[k]) \models \phi_1$

### 2.3.4 Interval Temporal Logic (ITL)

Il est aussi possible de structurer le temps comme un ensemble d'instants ou un ensemble d'intervalles, de façon linéaire lorsque deux unités temporelles différentes peuvent être comparées, ou de façon arborescente lorsque chaque instant (ou intervalle) peut avoir plusieurs instants (ou intervalles) successeurs possibles, etc.

Le Interval Temporal Logic (ITL) (Moszkowski 1983) ou Logique Temporelle basée sur l'Intervalle est une logique propositionnelle basé sur les intervalles. La véracité d'une formule est déterminée par rapport à l'intervalle considéré, sachant qu'un intervalle peut être une séquence d'états (un état représente un mapping entre un ensemble d'énoncés et l'ensemble {vrai,faux}). Évidemment la sémantique des énoncés va dépendre des relations que les instants ou intervalles entretiennent entre eux et donc d'une algèbre de ces objets. La syntaxe est donnée comme suit :

Expression :

$$e ::= z \mid a \mid A \mid g(e_1, \dots, e_n) \mid O A \mid \text{fin } A$$

Formule :

$$f ::= \text{true} \mid q \mid Q \mid h(e_1, \dots, e_n) \mid \neg f \mid f_1 \wedge f_2 \mid \forall v. f \mid \text{skip} \mid f_1 ; f_2 \mid f *$$

sachant que :

- $z$  un entier
- $a$  une variable statique entier qui ne change pas dans un intervalle
- $A$  une variable d'état (qui peut changer dans un intervalle)
- $v$  une variable statique ou une variable d'état
- $g$  un symbole de fonction d'entier
- $q$  une variable statique booléenne
- $Q$  une variable booléenne d'état
- $h$  un symbole de prédicat

- $e_i$  ( $i$  étant un entier) est un entier ou un booléen
- $f_1$  et  $f_2$  des formules
- $O A$  : si l'intervalle est non vide, la valeur de  $A$  dans l'état suivant cet intervalle est une valeur arbitraire
- $fin A$  : si l'intervalle est fini, la valeur de  $A$  dans le dernier état de cet intervalle est une valeur arbitraire
- $skip$  est l'intervalle entre deux états
- $f_1 ; f_2$  est vraie si l'intervalle peut être décomposé en un intervalle préfixe et un intervalle suffixe, tel que  $f_1$  est vérifié dans le préfixe et  $f_2$  dans le suffixe, ou si l'intervalle est infini et  $f_1$  est vérifié dans cet intervalle
- $f *$  est vraie si l'intervalle peut être décomposé en un nombre fini d'intervalles tels que chacun de ces intervalles est vérifié, ou si l'intervalle est infini et peut être décomposé en un nombre infini d'intervalles finis dans lesquels  $f$  est vérifiée.

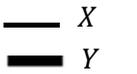
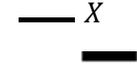
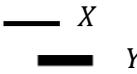
Soient  $E$  la fonction d'interprétation des expressions vers un ensemble  $Val$  de valeurs,  $M$  la fonction d'interprétation des fonctions vers  $\{\text{vrai, faux}\}$ , et  $\sigma = \sigma_0 \sigma_1 \dots$  un intervalle. La sémantique est décrite comme suit :

- $E[z](\sigma) = z$
- $E[a](\sigma) = \sigma_0(a)$
- $E[A] = \sigma_0(A)$
- $E[g(e_1, \dots, e_n)](\sigma) = g(E[e_1](\sigma), \dots, E[e_n](\sigma))$
- $E[O A](\sigma) = \begin{cases} \sigma_1(A) \text{ si } |\sigma| > 0 \\ v \text{ une valeur quelconque } \in Val \text{ sinon} \end{cases}$
- $E[fin A](\sigma) = \begin{cases} \sigma_{|\sigma|}(A) \text{ si } \sigma \text{ est fini} \\ v \text{ une valeur quelconque } \in Val \text{ sinon} \end{cases}$
- $M[q](\sigma) = \sigma_0(q)$  et pour tout  $0 < i \leq |\sigma|, \sigma_i(q) = \sigma_0(q)$
- $M[Q](\sigma) = \sigma_0(Q)$
- $M[h(e_1, \dots, e_n)](\sigma)$  est vraie si et seulement si  $h(E[e_1](\sigma), \dots, E[e_n](\sigma))$  est vraie
- $M[\neg f](\sigma)$  est vraie si et seulement si  $M[f](\sigma)$  est fausse
- $M[f_1 \wedge f_2](\sigma)$  est vraie si et seulement si  $M[f_1](\sigma)$  est vraie et  $M[f_2](\sigma)$  est vraie
- $M[skip](\sigma)$  est vraie si et seulement si  $|\sigma| = 1$
- $M[\forall v. f](\sigma)$  est vraie si et seulement si ( $\forall \sigma'$  tel que  $\sigma$  est identique à  $\sigma'$ ,  $M[f](\sigma')$  est vraie)
- $M[f_1 ; f_2](\sigma)$  est vraie si et seulement si ( $\exists k$  tel que  $M[f_1](\sigma_0 \dots \sigma_k)$  est vraie et  $M[f_2](\sigma_k \dots \sigma_{|\sigma|})$  est vraie) ou ( $\sigma$  est infini et  $M[f_1](\sigma)$  est vraie)
- $M[f *](\sigma)$  est vraie si :
  - Si  $\sigma$  est fini :
    - $\exists I_0, \dots, I_n$  tel que  $I_0 = 0$  et  $I_n = |\sigma|$  et  $\forall 0 \leq i < n, I_i \leq I_{i+1}$  et  $M[f](\sigma_{I_i} \dots \sigma_{I_{i+1}})$  est vraie
  - Sinon :
    - ( $\exists I_0, \dots, I_n$  tel que  $I_0 = 0$  et  $M[f](\sigma_{I_n} \dots \sigma_{|\sigma|})$  est vraie et  $\forall 0 \leq i < n, I_i \leq I_{i+1}$  et  $M[f](\sigma_{I_i} \dots \sigma_{I_{i+1}})$  est vraie) ou
    - ( $\exists$  un nombre infini de  $I_i$  tel que  $I_0 = 0$  et  $\forall 0 \leq i, I_i \leq I_{i+1}$  et  $M[f](\sigma_{I_i} \dots \sigma_{I_{i+1}})$  est vraie)

### 2.3.5 L'algèbre des intervalles

L'algèbre des intervalles introduite dans (Allen 1983) représente le temps par des intervalles en décrivant toutes les relations possibles entre deux intervalles de temps et permet de faire des calculs de composition d'intervalles par la table de composition des relations. D'après ce formalisme, 13 relations peuvent exister entre deux intervalles (*before*, *meets*, *overlaps*, *starts*, *during*, *finishes* et leurs inverses respectives, *equal*) comme le montre le tableau 2. Le calcul peut aussi se faire par comparaison faisant intervenir les valeurs des minimums et des maximums de deux intervalles, sachant qu'un intervalle commence à un point précis quelconque dans le temps ou un instant donné et se termine à un autre instant donné.

Table 3 - Les 13 relations possibles dans l'algèbre de Allen

Relation	Symbole	Symbole de l'inverse	Exemple en image
<i>X before Y</i>	<	>	
<i>X equal Y</i>	=	=	
<i>X meets Y</i>	<i>m</i>	<i>mi</i>	
<i>X overlaps Y</i>	<i>o</i>	<i>oi</i>	
<i>X during Y</i>	<i>d</i>	<i>di</i>	
<i>X starts Y</i>	<i>s</i>	<i>si</i>	
<i>X finishes Y</i>	<i>f</i>	<i>fi</i>	

### 2.3.6 Le raisonnement temporel basé sur le semi-intervalle

Le raisonnement temporel basé sur le semi-intervalle (Freksa 1992) est une théorie qui étend l'approche de Allen basée sur les intervalles. Il consiste à représenter les relations qui peuvent être vérifiées en comparant seulement les semi-intervalles qui sont les débuts ou les fins des intervalles (*younger than*, *precedes*, *succeeds*, etc.) telles qu'elles sont décrites dans le tableau 3. Le formalisme est intéressant lorsqu'on a le « coarse knowledge » : les relations entre événements sont perçues de manière incomplète et la disjonction d'au moins deux relations forme un voisinage conceptuel (possibilité de transformer un événement par un autre par déformation continue).

Table 4 - Les 11 relations entre semi-intervalles (Freksa 1992)

Relation	Label	Inverse	Illustration
<i>X is older than Y</i> <i>Y is younger than X</i>	<i>ol</i>	<i>yo</i>	XXX??? YY
<i>X is head to head with Y</i>	<i>hh</i>	<i>hh</i>	XXX?? YYYY
<i>X survives Y</i> <i>Y is survived by X</i>	<i>sv</i>	<i>sb</i>	??X XX YY
<i>X is tail to tail with Y</i>	<i>tt</i>	<i>tt</i>	??X XX YYYY
<i>X precedes Y</i> <i>Y succeeds X</i>	<i>pr</i>	<i>sd</i>	XXX? YYY
<i>X is contemporary of Y</i>	<i>ct</i>	<i>ct</i>	?X X? ??Y Y?
<i>X is born before death of Y</i> <i>Y is died after birth of X</i>	<i>bd</i>	<i>db</i>	XXX? ???

### 2.3.7 Algèbre temporelle basée sur les instants

De la même façon qu'il y a l'algèbre des intervalles, il y a l'algèbre temporelle basée sur les instants (Vilain, Kautz, et Van Beek 1990). Il est possible de décrire des relations entre instants précis et de faire des compositions de certaines relations, en utilisant les vecteurs qui représentent la relation entre deux points. Ce formalisme est intéressant lorsqu'on souhaite raisonner sur une période de temps dont on connaît les instants qui ont marqué les événements. La figure 27 montre les différentes relations possibles.

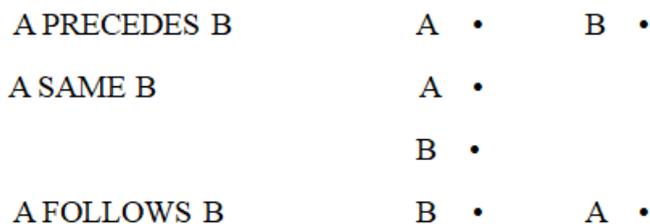


Figure 27 - Les simples relations entre points (Vilain, Kautz, et Van Beek 1990)

### 2.3.8 Synthèse

La représentation du temps dans les logiques et les algèbres temporelles peut donc se faire de différentes manières : soit en se basant sur les points qui représentent des instants (LTL, algèbre basée sur les instants), soit en se basant sur les intervalles de temps (ITL, Algèbre de Allen, Semi-Interval Calculus), soit en utilisant un arbre des mondes possibles (CTL, CTL\*).

Dans notre proposition, nous avons construit une logique temporelle basée sur les intervalles. En effet, l'utilisation des intervalles nous semble plus adaptée pour les conditions temporelles relatives aux normes, car les conditions représentent souvent des durées, et rarement des instants. Pour la sémantique, notre choix s'est porté sur l'algèbre de Allen qui offre les relations basiques, complètes et suffisantes pour décrire l'applicabilité d'une norme dans un socio-écosystème en faisant des calculs sur les objets temporels.

Pour l'espace, il est nécessaire de faire une étude bibliographique similaire, afin de déterminer la représentation la mieux adaptée.

## 2.4 Logique et algèbre spatiales

Généralement, une logique spatiale permet de formaliser les expressions verbales usuelles pour localiser des objets ou des lieux. La logique spatiale désigne tout langage formel interprété sur les structures des entités géométriques et leurs relations. L'unité spatiale considérée est soit le point, soit la région dont il faut définir la structure algébriquement pour définir la sémantique des énoncés relativement à l'espace.

Dans le cas de cette thèse, nous avons besoin d'utiliser l'algèbre spatiale car il s'agit principalement de connaître, pour un agent situé spatialement, les normes qui lui sont applicables à l'endroit où il se trouve, ce qui nécessite par conséquent de calculer si les coordonnées spatiales de cet agent sont incluses dans les zones d'activation de certaines normes.

### 2.4.1 Le Oriented Point Relation Algebra (OPRA<sub>m</sub>)

Le Oriented Point Relation Algebra (*OPRA<sub>m</sub>*) (Moratz, Dylla, et Frommberger 2005) repose sur la modélisation des directions d'objets en déplacement par des points orientés (figure 28). « *Front* » et « *Back* » représentent le secteur linéaire, « *Left* » et « *Right* » représentent les deux autres côtés. Le symbole d'une relation est obtenu par concaténation des 2 noms de secteurs pour ces deux relations. La position du point lui-même est appelée « *Same* ». 20 relations atomiques possibles sont obtenues par cette méthode.

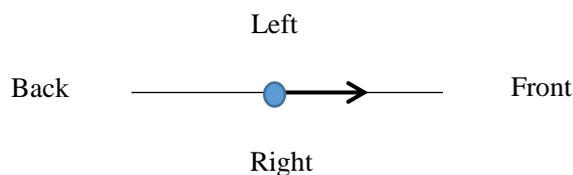


Figure 28 - Un point orienté et ses directions relatives qualitatives spatiales (Moratz, Dylla, et Frommberger 2005)

### 2.4.2 Le Region-Connection-Calculus RCC-8

Plusieurs articles ont montré l'analogie entre les notions d'objets et d'évènements et ont conduit à des raisonnements spatiaux basés sur les résultats des études sur le temps. Par exemple, le *Region-Connection-Calculus RCC-8* (Randell, Cui, et Cohn 1992) présente un calcul spatial analogue aux

intervalles dans (Allen 1983), et simplifiant la théorie de Clark (B. L. Clarke 1981) qui se base sur la représentation de la connexion entre deux points  $x$  et  $y$  par  $C_{x,y}$ . La *RCC-8* décrit les régions dans un espace topologique, et les relations possibles entre ces régions dont : *disconnected* ( $D$ ), *externally connected* ( $EC$ ), *equal* ( $Q$ ), *partially overlapping* ( $PO$ ), *tangential proper part* ( $TPP$ ), *tangential proper part inverse* ( $TPPi$ ), *non-tangential proper part* ( $NTPP$ ), *non-tangential proper part inverse* ( $NTPPi$ ), décrites dans la figure 29. La combinaison des relations peut se faire en utilisant une table de composition.

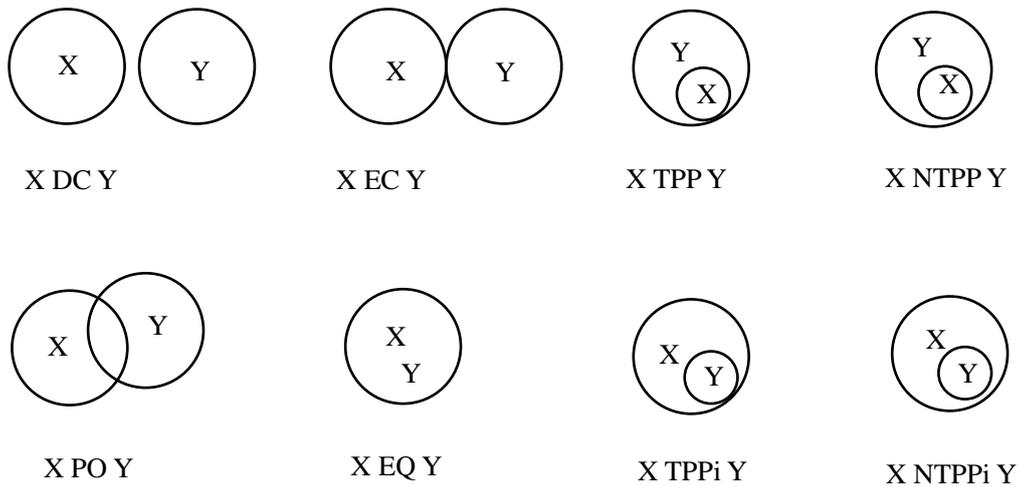


Figure 29 - Les différentes relations dans le RCC-8

### 2.4.3 Spatiotemporal Constraint Calculus (STCC)

(Gerevini et Nebel 2002) propose une algèbre qualitative spatio-temporelle nommée *Spatiotemporal Constraint Calculus* (*STCC*) qui consiste à temporiser le *RCC-8* en utilisant le formalisme d'Allen. Ci-dessous un exemple de description selon ce formalisme :

$$I: (X\{DC, EC\}Y), I: (Y\{TPP\}Z), \\ J: (X\{PO\}Y), J: (Y\{DC\}Z).$$

Cet exemple montre que durant un intervalle  $I$ , les régions  $X$  et  $Y$  sont déconnectées ou extérieurement connectées, et que  $Y$  est tangentiellement une partie propre de  $Z$ . Durant l'intervalle  $J$ ,  $X$  et  $Y$  sont chevauchent partiellement et  $Y$  et  $Z$  sont déconnectées.

### 2.4.4 Propositional Spatio-Temporal Logic (PSTL)

La proposition d'une logique modale multi-dimensionnelle utilisée dans le *Propositional Spatio-Temporal Logic* (*PSTL*) (Bennett et al. 2002) s'obtient par le produit cartésien de la logique temporelle LTL avec la logique modale S4U peut être utilisée pour représenter le *RCC-8* comme il a été montré dans (Bennett 1996). Mais elle ne nous intéresse pas ici, vu que nous n'avons pas choisi une

approche sur les mondes possibles.

### 2.4.5 Synthèse

A travers ces différents formalismes, on peut constater que la représentation de l'espace peut être formalisée soit par des points, soit par des régions. Au niveau de l'applicabilité des normes, qui est concrétisée dans la réalité par les règlements dans la société, le lieu en question est souvent une région (ex : règlements qui s'appliquent dans la forêt, dans un pays, etc.), et rarement un point. En effet, dans les normes, l'expression de conditions spatiales se limite à la détermination de la position d'un individu ou d'un objet, éventuellement par rapport à un autre, ce qui est assimilable à la détermination de la relation spatiale entre deux régions.

Dans notre modèle de norme, nous avons choisi d'utiliser le RCC-8 pour calculer les relations entre régions dans la vérification de la véracité des conditions spatiales sur les expressions des normes. En effet, afin de déterminer si un agent se trouve dans une certaine région précisée dans une norme, RCC-8 permet d'exprimer de façon complète et de calculer les relations entre deux régions, et donc nous allons construire une logique spatiale basée sur RCC-8.

## 2.5 Conclusion

Nous avons établi dans ce chapitre les méthodologies que nous allons suivre ainsi que les principaux outils que nous allons utiliser pour créer notre modèle et pour l'implémenter. Il s'agit principalement de l'IDM qui est la technologie utilisée pour manipuler et exploiter des modèles. L'adoption de la DL pour représenter le système à modéliser doit permettre d'explicitier les caractéristiques du système, ainsi que les faits et actions qui s'y manifestent en vue de construire l'expression des règlements sociaux. La bibliographie sur les logiques et algèbres temporelle et spatiale nous a permis de faire le choix des logiques et des algèbres les mieux adaptées aux normes dans les socio-écosystèmes, notamment le choix de considérer comme unité temporelle un intervalle de temps, et comme unité spatiale une région, et de se baser sur ces unités pour l'écriture des relations et le calcul. Ce choix nous permet d'écrire des normes plus complexes en termes de paramètre temporel et spatial dans le système. Après avoir spécifié ces outils, nous allons présenter dans le chapitre suivant la principale contribution de la thèse, qui est le méta-modèle de SMA institutionnel adapté au socio-écosystème. La première étape consiste à établir une logique de description permettant de décrire le socio-écosystème avec les notions de temps et d'espace. Les concepts de cette logique vont permettre ensuite de définir le méta-modèle des institutions, des organisations, et des agents sous la forme d'un diagramme de classes et d'établir les contraintes sur le méta-modèle en utilisant OCL. Pour la syntaxe des expressions, nous adopterons plutôt une formalisation logique équivalente. Le modèle UML que nous allons créer sera traduit en modèle Ecore dans Eclipse et sera décrit parallèlement via le framework Xtext qui se charge de la description de la syntaxe concrète. Un langage de description sera créé pour les institutions et les organisations, et un autre pour les agents, tel que la structure des concepts est celle décrite dans la proposition de DL précédente. Après définition des institutions, des organisations, et des agents dans un socio-écosystème à travers ce langage, on pourra calculer l'ensemble des normes applicables à un certain agent socialement, spatialement et temporellement situé.

## Chapitre 3

# PROPOSITION DE MODELE D'INSTITUTION

Rappelons que notre but est de calculer les normes applicables à un agent socialement, spatialement et temporellement situé, notre proposition consiste en un méta-modèle de SMA institutionnel, dont la structure des normes pourra décrire les différentes normes qui concernent l'interaction entre les humains et leur environnement. Ce modèle sera utilisable via un langage dédié de description de SMA institutionnel qui va servir d'interface pour l'utilisateur, et dont la syntaxe va s'inspirer en partie du langage de représentation de connaissance terminologique utilisant une proposition de DL. Cette partie de la proposition va détailler la syntaxe abstraite de notre proposition de SMA institutionnel, ensuite les conditions normatives et leurs sémantiques qui montrent en quoi cette DL est nécessaire.

En premier lieu, nous allons décrire l'ontologie de notre proposition de SMA institutionnel et décrire son méta-modèle, à travers le diagramme UML des concepts qui le constituent, de la même façon que nous avons présenté les différentes propositions par des méta-modèles dans la bibliographie. En d'autres termes, il s'agit de la syntaxe abstraite de notre langage de description d'institution et de norme. Dans le langage, nous aurons à introduire en premier lieu le contexte de l'étude par les faits existants au niveau des agents et de leur environnement, avant de définir par les normes les règlements qui gèrent l'interaction entre les agents et l'environnement.

### 3.1 Les objets

Avant de proposer le méta-modèle qui représente le socio-écosystème, il convient de déterminer de quoi un tel système est constitué. Le socio-écosystème représente en effet le système humain en interaction avec l'écosystème. L'écosystème est constitué à son tour des animaux, des végétaux et du milieu dans lequel ils vivent. Les interactions entre tous ces éléments se manifestent en fonction du temps et du lieu. Tous ces objets physiques du monde réel qui sont les « faits bruts » sont considérés dans notre étude comme des objets qu'on manipule dans des modèles.

Il peut s'agir de temps, d'espace, d'action, de ressource, ou d'agent. Le temps peut déterminer un instant précis ou une durée, l'espace peut de la même façon désigner un point quelconque ou une surface, et une ressource ou un agent est un objet situé spatialement et temporellement. Chaque objet est identifié par un nom, et peut avoir dans certains cas comme pour les ressources une magnitude ou une multitude. Une action est considérée comme un objet et peut faire intervenir des agents acteurs, d'autres objets, des paramètres spatio-temporels. Le méta-modèle des objets à prendre en compte est décrit dans la figure 30.

L'agent est l'élément constitutif principal d'un SMA et constitue un objet particulier. Dans notre proposition de modèle de SMA institutionnel, l'agent représente un acteur du socio-écosystème et ne peut agir que dans des organisations. C'est donc au niveau organisationnel que l'agent agit, tandis que le niveau institutionnel consiste aux normes et à la terminologie. Nous considérons que l'agent est un type d'objet pouvant appartenir à une ou des organisations.

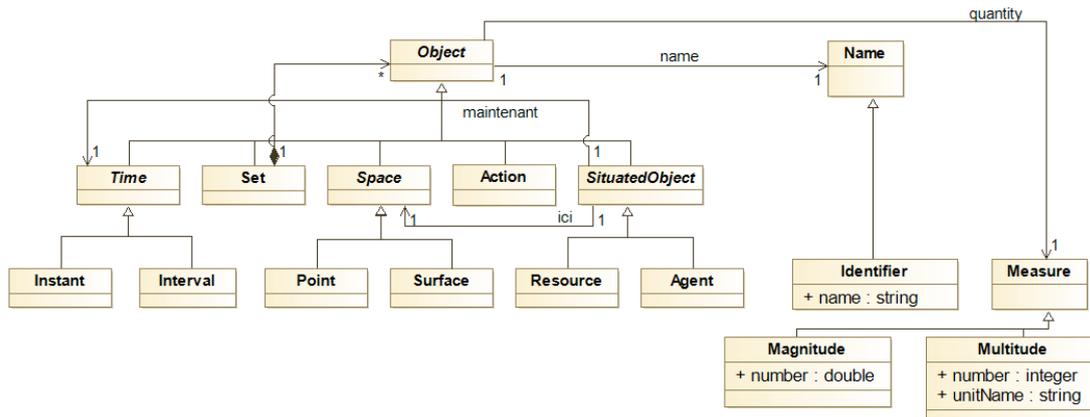


Figure 30 - Méta-modèle de l'objet

Un agent appartenant à une organisation y tient un ou plusieurs rôles. Ainsi, un rôle est un concept appartenant à l'institution, et est associé dans l'organisation à un agent. Prenons l'exemple d'un agent représentant une personne qui a pour rôle le « chef de région » dans la « région d'Analamanga » qui est donc l'organisation. Cet agent ne peut exercer son rôle de chef de région que s'il est dans la région d'Analamanga. Dans les autres régions, il ne peut exercer ce rôle. Le méta-modèle de l'agent est décrit dans la figure 31.

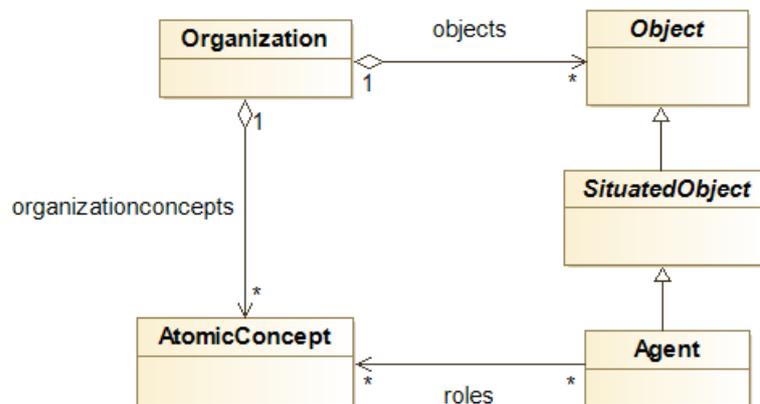


Figure 31 - Méta-modèle de l'agent

Nous définissons les objets physiques selon la structure de données décrite dans le méta-modèle de la figure 30. L'objet désigne soit l'espace par un point spatial avec des coordonnées précises ou un polygone représentant une surface physique caractérisée par les coordonnées des sommets, soit le temps par un instant précis (date et heure) ou une intervalle de temps entre deux instants, soit une action par une méthode java, soit un objet situé qui est un agent ou une ressource (exemple : un arbre qui est situé dans une forêt avec les coordonnées (105,245) à l'instant Mardi 1 Janvier 2019 à 12h 30mn), soit un ensemble d'objets. Ces objets ont chacun un identifiant (ex : rizièrR1) et peuvent avoir une quantité. A titre d'exemple, nous utiliserons un agent informatique pour représenter un « chef de fokontany », etc.

Pour la structure de données informatiques :

- Un instant est représenté par une chaîne de caractères caractérisé par le jour et/ou le jour de la

semaine (ex : il est interdit de travailler le samedi, il est interdit de travailler le jour du nouvel an), le mois, l'année, l'heure, la minute (ex : 2:12:12:2019:2:50)

- L'intervalle est caractérisé par les instants de début et de fin
- Le point est représenté par un couple d'abscisse et d'ordonnée (ex : (547 ; 523))
- Une surface est représentée par un polygone caractérisé par les points représentant les sommets (ex : riziere1 (A,B,C,D) est un polygone nommé riziere1 dont les points A,B,C et D sont les sommets)
- La ressource est représentée par son nom qui est une chaîne de caractères, sa mesure, et éventuellement ses coordonnées spatiales et/ou temporelles (ex : la ressource nommée cocotier\_A de longueur 8m est située aux coordonnées (100 ; 25) à l'instant 2:12:12:2019:2:50).
- L'agent est représenté par son nom, l'URI qui le représente, et ses coordonnées spatiales et temporelles
- L'action est représentée par l'URI de la méthode java qui la représente

Le domaine de discours que nous allons utiliser est donc constitué de l'ensemble de toutes les instances d'objets existants dans le système.

## 3.2 Les institutions

Compte tenu de la synthèse que nous avons établie à la suite de l'état de l'art sur les SMA institutionnels, nous nous basons sur la définition dans (Fornara, Viganò, et Colombetti 2004) qui décrit une institution comme étant composée principalement d'un ensemble de normes et d'une ontologie.

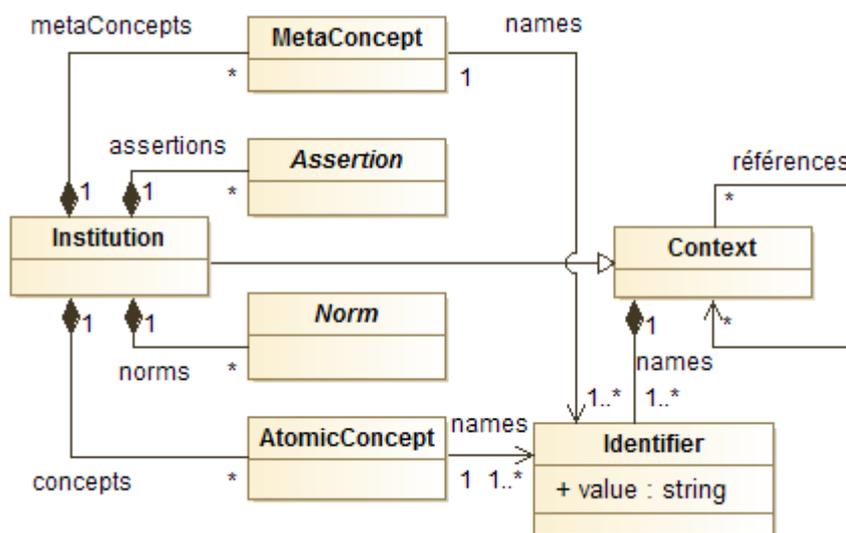


Figure 32 - Eléments constitutifs d'une institution

En effet, l'institution se caractérise en premier lieu par les concepts (mots) qu'elle utilise dont l'ensemble forme la terminologie, ensuite elle associe les données existantes à ces concepts, et par la suite l'ensemble des normes construites en utilisant ces mots. En supposant qu'un contexte est constitué d'une

terminologie, l'institution est un contexte particulier qui définit des normes en fonction des méta-concepts, des concepts, et des assertions qui permettent d'associer des identifiants à des concepts. Sachant que l'ontologie consiste à la définition des mots par des concepts, nous proposons de définir l'institution par un ensemble de normes, et une terminologie qui est un ensemble d'identifiants, qui est définie à partir de méta-concepts, et des définitions de concepts ou assertions pour associer des identifiants à des concepts comme le montre la figure 32. Rappelons qu'un méta-concept représente ici un méta-modèle de concept utilisé dans la définition d'un nouveau concept. Il est possible d'hériter de toutes les caractéristiques ou d'importer les concepts d'une autre institution. Nous avons publié cette proposition de modèle d'institution et d'organisation dans (Raharivelo et Müller 2021).

### 3.2.1 Les méta-concepts

Nous définissons par méta-concept, un concept situé dans un niveau d'abstraction plus élevé, et définissant la nature d'un concept (ex : le concept de « père » est un concept dont le méta-concept est « personne »), correspondant à un type d'objet. Le méta-concept est conçu pour indiquer dans quel domaine le concept se situe, permettant ainsi la vérification des types de données dans la sémantique du langage. Il s'agit par conséquent d'une pure utilisation de la définition de concepts en TBox de la Logique de Description (DL) décrit dans 2.2.2.2.

Par exemple, le concept « Lundi » est un concept de « temps », et son méta-concept est donc le temps.

Généralement, les méta-concepts les plus basiques nécessaires sont le temps, l'espace, l'action, l'agent, et la ressource. Ces méta-concepts correspondent aux différents types d'objet de la figure 30. Mais il est possible de définir d'autres méta-concepts particuliers comme la mesure, l'état, etc. par exemple pour qualifier ou quantifier des objets définis avec ces méta-concepts.

Pour créer notre langage de description permettant d'écrire des expressions sur la base de ces concepts, nous allons proposer une DL spécifique adaptée au socio-écosystème et capable de représenter un SMA institutionnel.

### 3.2.2 La logique de description (DL)

Une institution est décrite essentiellement sur la base des concepts qu'elle contient et des normes qui la composent. Un bloc de description d'institution contiendra donc évidemment une définition de concepts et de normes. D'un côté, une organisation met en œuvre une institution, et sa description nécessite de faire référence à cette institution ainsi qu'à des objets qui vont représenter les concepts dans cette institution, et sera décrite par conséquent indépendamment de l'institution. Cette relation entre les terminologies utilisées dans l'organisation et dans l'institution nécessite d'adopter un formalisme et une logique de représentation de connaissances adaptée. Un agent sera décrit indépendamment des institutions et des organisations, et peut se trouver dans une ou des organisations et y tenir un rôle.

Afin de formaliser la structure du langage d'expression des conditions dans les règlements sociaux, nous allons proposer une DL particulière de description d'un SMA institutionnel, sur laquelle repose la structure de l'expression, dont la particularité est de pouvoir exprimer un fait institutionnel ou une action avec des paramètres spatio-temporels. Ces faits et actions s'appliquent à des objets, font intervenir des sujets et des actions, dépendent de contexte, etc. et peuvent par conséquent se décrire comme les connaissances en DL.

Cette DL sera capable de décrire le méta-modèle d'institution et de norme proposé. En effet, l'expression de formalisation des normes est basée sur la notion de concept et de ses possibles formes de représentation, la définition des concepts se fait par les assertions, et le modèle de l'expression des normes est représenté comme un agencement de concepts.

La typologie des concepts dans cette DL doit être capable de représenter tout type d'entité représentant différents types d'objets physiques dans un socio-écosystème. Par conséquent, il convient de proposer d'abord la typologie des concepts avant de les utiliser pour décrire un modèle.

### 3.2.2.1 Les concepts

Rappelons que le concept désigne un élément basique de la partie terminologique TBox en DL. Le concept introduit ici la terminologie utilisée dans les règlements sociaux que nous voulons modéliser. En DL, nous avons les relations  $\subseteq$  pour l'inclusion de concept, et  $\equiv$  pour l'égalité permettant de définir un concept. Généralement, tout objet dans notre système est représenté par un concept, et toute expression devra utiliser les concepts, de la même manière qu'en DL basique, plus précisément les expressions de TBox et ABox.

La partie conceptuelle de notre DL va distinguer deux types principaux de concepts, dont le *concept individuel* qui désigne un nom d'entité individuelle (ex : Rakoto), et le *concept catégorique* qui désigne une catégorie (ex : personne). Chaque concept, individuel ou catégorique, désigne un objet quelconque comme une action, un individu, le temps, l'espace, etc. qui est défini par son méta-concept et qui constitue sa structure de base.

Etant donné que notre langage de description va servir pour construire des expressions utilisées dans des règles sociales appliquées dans un socio-écosystème, ce langage va exprimer principalement la réalité dans le socio-écosystème en général, soit des faits, soit des actions, avec des paramètres spatio-temporels. A part les types courants de concepts, comme les concepts d'individu pour désigner des personnes, les concepts d'objet, etc., voici quelques types particuliers de concepts dont les constructions sont plus complexes :

- Les concepts d'action :

Il s'agit de concept dont le méta-concept est l'action, qui désigne une action proprement dite. L'expression d'une action nécessite principalement un sujet, un objet, et l'action en question. Le sujet et l'objet sont des concepts individuels ou catégoriques, tandis que l'action est un concept individuel particulier exprimant une activité qu'on peut faire.

Dans l'exemple « les agriculteurs travaillent le week-end », « travaillent » est un concept d'action. Sa sémantique sera l'ensemble des intervalles et des lieux où se déroule cette action. Par exemple, dans « les agriculteurs travaillent ce week-end à Fianarantsoa », l'action « les agriculteurs travaillent » est vraie durant l'intervalle de temps « ce week-end » et dans le lieu défini par « Fianarantsoa ».

- Les concepts temporels :

Il s'agit des concepts dont le méta-concept est le temps. En prenant l'exemple « les agriculteurs travaillent le weekend », nous pouvons constater qu'il s'agit d'un énoncé commandé par un groupe verbal avec des constantes désignant les sujets, objets, etc. Les mots « agriculteurs », « travaillent » et « weekend » sont les concepts dans cette expression. « weekend » est ici un concept temporel, mais il en est de même pour « avant weekend » ou « après weekend » qui ont été obtenus chacun en ajoutant un nom de relation de l'algèbre de Allen avant un autre concept temporel. Nous ne choisissons toutefois que certains noms de relations que nous jugeons pertinents pour décrire le socio-écosystème, dont « *before* »,

« *after* », « *meets\_before* », et « *meets\_after* », sachant que les autres noms de relations peuvent être traduites par des relations entre concepts.

Une expression du type « les agriculteurs travaillent *quelquefois*... » est une spécialisation de l'énoncé précédent, évoquant une « quantification existentielle » sur le temps via l'opérateur temporel « *quelquefois* ». Il y a aussi la spécialisation « les agriculteurs travaillent *toujours* » qui introduit une « quantification universelle » marquée par l'opérateur « *toujours* ».

○ Les concepts spatiaux :

Il s'agit des concepts dont le méta-concept est l'espace. Le concept spatial est généralement exprimé par un mot désignant un lieu comme « Antananarivo », ou « zone forestière ». En utilisant certains noms de relation dans le RCC-8, nous pouvons construire d'autres concepts spatiaux à partir de ces concepts spatiaux atomiques, comme « *EC* zone forestière » pour indiquer une région extérieurement connectée à la zone forestière. Les noms de relation dans le RCC-8 que nous utiliserons pour décrire le socio-écosystème sont « *EC* » et « *DC* » car ce sont les relations que nous trouvons plus pertinentes dans les règlements sociaux et que les autres noms de relation peuvent être exprimés par des relations d'inclusion.

De la même façon que dans les concepts temporels, une expression munie de « *certaines* » définit une quantification existentielle sur l'espace, par exemple « les agriculteurs travaillent dans *certaines* zones ... », et une expression munie de « *partout* » telle que « les agriculteurs travaillent *partout* ... » définit une quantification universelle.

○ Les concepts de relation :

Dans le socio-écosystème, on a la possibilité d'avoir un concept évoquant une relation entre concepts, comme dans l'expression « les éleveurs sont voisins des agriculteurs », qui est une expression de relation pouvant être vraie ou fautive selon les objets sur lesquels elle porte. Il s'agit ici d'un concept définissant une relation « être voisins de » entre « éleveurs » et « agriculteurs », de la même façon que pour un concept de relation en DL.

Pour le paramètre temporel, les 13 noms de relation dans l'algèbre de Allen sont tous des noms de relation temporelle entre deux concepts temporels (ex : Mardi overlaps Noël). De même pour le paramètre spatial, les 8 noms de relation entre régions dans le RCC-8 sont tous des noms de relation spatiale dans notre système (ex : forêt TPP lac).

○ Construction de concepts :

Comme en DL de base, il y a différentes manières de construire un concept :

- le concept élémentaire est le *concept atomique* que nous qualifions de *concept individuel* lorsqu'il désigne un nom d'une entité individuelle (ex : Rakoto), et de *concept catégorique* lorsqu'il désigne une catégorie (ex : personne), qui possède initialement un méta-concept.
- le *concept composé* est le concept obtenu par composition de deux ou plusieurs concepts via l'union ou l'intersection entre concepts de même méta-concept (ex :  $parents \equiv père \cup mère$ )
- le *concept complémentaire* s'obtient par négation d'un concept (ex : homme est le concept complémentaire de femme, car toute personne appartient soit à la catégorie homme soit à la catégorie femme)
- le *concept d'énumération* est le concept qui est défini par une énumération c'est-à-dire une liste de concepts (ex : étant donné les concepts samedi, dimanche, et week-end, le concept week-end désigne la liste des concepts {samedi, dimanche})
- le *concept de relation* désigne une relation entre deux concepts (ex : le père et la mère sont mariés et

sont liés par la relation de mariage)

- le *concept qualifié* désigne le concept qui est muni de la quantification existentielle ou de la quantification universelle. (ex : tous les revenus des foyers)
- le *concept obtenu par une fonction* est construit en mettant en paramètre un autre concept dans une fonction, par exemple « les voisins des agriculteurs .... » exprime un concept. Il s’agit d’un concept construit à partir d’une fonction : la fonction « voisin » qui étant donné un objet quelconque retourne les voisins de cet objet, y compris temporels ou spatiaux.

Le méta-modèle du concept est donc tel que décrit dans la figure 33.

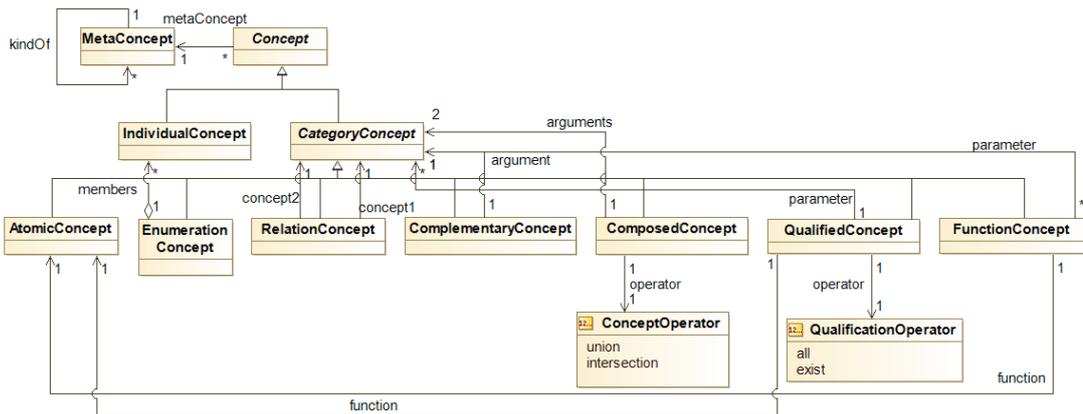


Figure 33 - Méta-modèle du concept

Formellement, notre proposition de DL est donc décrite comme suit :

Pour la partie terminologie TBox, compte-tenu de ce qui est énuméré ci-dessus, un concept est soit individuel, soit catégorique, tel que :

- les concepts individuels sont :
  - tout concept individuel atomique (ex : Pierre, Lundi) ;
  - si  $I_1$  et  $I_2$  sont des concepts individuels temporels, alors *before*  $I_1$ , *after*  $I_1$ , *meets\_before*  $I_1$ , *meets\_after*  $I_1$ ,  $I_1 \cup I_2$ ,  $I_1 \cap I_2$  sont des concepts individuels temporels ;
  - si  $I_1$  et  $I_2$  sont des concepts individuels spatiaux, alors *EC*  $I_1$ , *DC*  $I_1$ ,  $I_1 \cup I_2$ ,  $I_1 \cap I_2$  sont des concepts individuels spatiaux.
- les concepts catégoriques sont :
  - tout concept catégorique atomique (ex : homme, jour, champ, etc.) ;
  - le concept d'énumération  $\{I_1, \dots, I_n\}$  qui regroupe une liste de concepts individuels  $I_1, \dots, I_n$  (ex :  $\{Lundi, \dots, Dimanche\}$ ) ;
  - si  $C_1$  et  $C_2$  sont des concepts catégoriques, alors  $\neg C$ ,  $C_1 \cup C_2$ ,  $C_1 \cap C_2$  sont des concepts catégoriques ;
  - si  $C_1$  est un concept catégorique,  $C_R$  le concept de ce qui est en relation (équivalent au rôle) avec un autre concept,  $\forall C_R(C_1)$  et  $\exists C_R(C_1)$  (ex :  $\exists voisin(C_1)$  comme concept de voisin d'au moins un  $C_1$ ) ;

- si  $C_1$  et  $C_2$  sont des concepts catégoriques temporels, alors  $before C_1$ ,  $after C_1$ ,  $meets\_before C_1$ ,  $meets\_after C_1$ ,  $C_1 \cup C_2$ ,  $C_1 \cap C_2$  sont des concepts catégoriques temporels ;
- si  $C_1$  et  $C_2$  sont des concepts catégoriques spatiaux, alors  $EC C_1$ ,  $DC C_1$ ,  $C_1 \cup C_2$ ,  $C_1 \cap C_2$  sont des concepts catégoriques spatiaux.

### 3.2.2.2 Les assertions

L'assertion sert principalement à définir les mots qui sont utilisés et connus dans l'institution, dont dépend l'application des normes, plus précisément à associer des noms aux concepts. Le modèle d'assertion est décrit dans la figure 34. Nous définissons donc par l'assertion un concept d'individu ou un concept de catégorie en associant le nom de concept à un type de concept, et un concept de relation en associant un nom de concept de relation aux deux concepts mis en relation. En outre, la norme constitutive dans l'organisation qui consiste à associer un objet du domaine du discours à un concept de l'institution correspondante est considérée comme une assertion constitutive, et la norme constitutive de l'institution consiste à établir l'équivalence entre un concept d'une institution à un autre concept d'une autre institution.

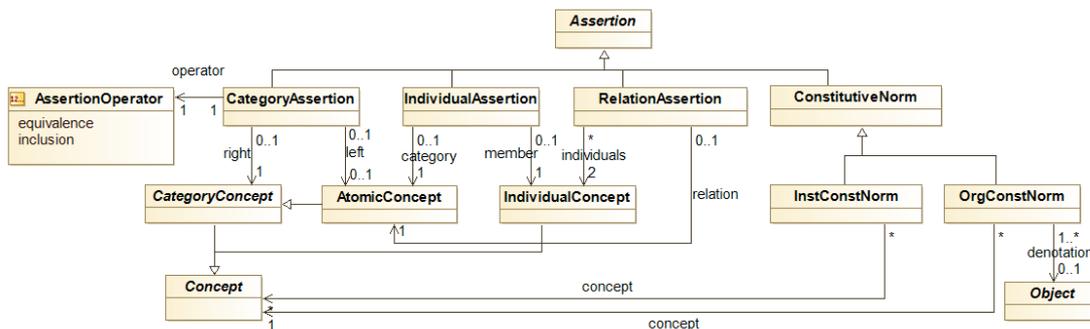


Figure 34 - Méta-modèle de l'assertion

#### 3.2.2.2.1 Les assertions de la TBox

Les assertions de la TBox correspondent aux assertions catégoriques en DL et sont utilisées dans notre méta-modèle :

- soit pour définir des concepts  
Ex :  $C_1 = C_2 \cup C_3$  définit le concept  $C_1$  comme l'union des concepts  $C_2$  et  $C_3$
- soit pour établir une équivalence ou une inclusion entre concepts appartenant à des mêmes institutions ou à des institutions différentes (ex : les personnes incluent les hommes et les femmes) de la même façon qu'on définit un concept atomique en DL en utilisant les relations d'équivalence ou d'inclusion (voir définition de concept atomique en TBox dans 2.2.2.2).  
 $C_1 = C_2$  définit une équivalence entre les concepts  $C_1$  et  $C_2$   
et  $C_1 \subseteq C_2$  indique que le concept  $C_1$  est inclus dans le concept  $C_2$

#### 3.2.2.2.2 Les assertions de l'ABox

Une assertion de l'ABox consiste principalement à définir les faits : des types d'individus ou des relations entre individus. Il s'agit donc :

- Soit d'une assertion individuelle pour définir le concept atomique auquel appartient un concept individuel (ex : Paul est le chef de région) de la même façon qu'une assertion de concept en DL définit qu'un nom d'individu désigne un certain concept atomique (voir assertion de concept en ABox dans 2.2.2.3). En effet, le concept individuel désigne un individu qui est assimilable à l'individu nommé en ABox. Une assertion individuelle est donc associée à un concept atomique et à un concept individuel et
 

$I_1 : C_1$  est une définition de concept individuel et indique que le concept individuel  $I_1$  est une instance du concept atomique  $C_1$  (ex : Pierre : homme)
- Soit d'une assertion relationnelle qui définit une relation entre concepts individuels quelconques (ex : le chef de région ordonne le chef du village) conformément à l'assertion de relation en ABox dans 2.2.2.3 qui décrit une relation entre deux individus. Une assertion relationnelle est donc associée à une relation et à deux concepts individuels et
 

$C_R(I_1, I_2)$  établit une relation  $C_R$  entre les concepts individuels  $I_1$  et  $I_2$

### 3.2.2.2.3 Les normes constitutives

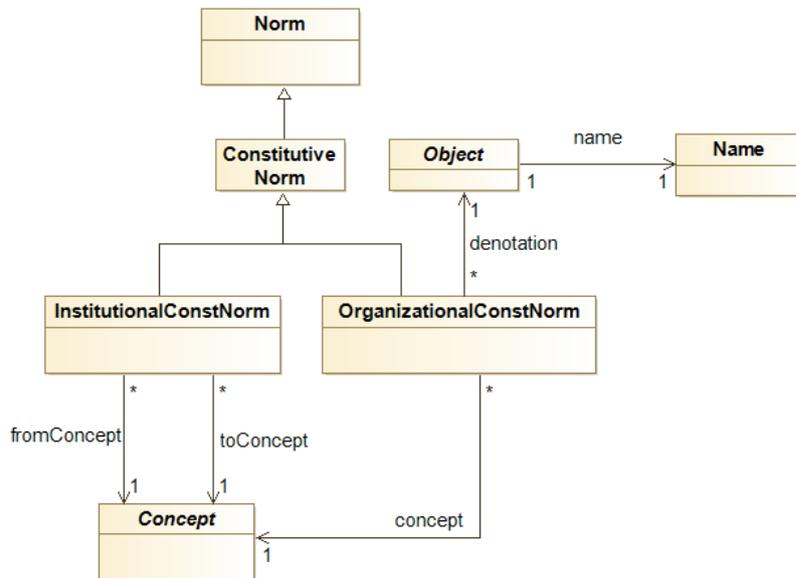


Figure 35 - Méta-modèle de la norme constitutive

Si les assertions permettent de définir des concepts à partir d'autres concepts, l'utilisation de ces concepts nécessite de les faire correspondre aux objets informatiques de la figure 30 qui les représentent dans le modèle. Cette définition des objets par la mise en correspondance des concepts avec les objets se fait par les normes constitutives. D'autre part, il est possible qu'un concept d'une institution compte-comme un concept d'une autre institution, cette mise en correspondance est également faite par l'intermédiaire des normes constitutives dans notre méta-modèle. Les normes constitutives peuvent donc être vues comme des assertions constitutives qui définissent soit des concepts par des objets, soit des concepts d'une institution par des concepts d'une autre institution.

Nous avons donc:

- $C_1$  count – as  $O_1$  est une norme constitutive qui indique que le concept  $C_1$  compte-comme

l'objet  $O_1$ .

- $C_1$  count – as  $C_2$  est une norme constitutive qui indique que le concept  $C_1$  d'une certaine institution compte-comme le concept  $C_2$  d'une autre institution, sachant que dans ce cas, le nom de concept sera préfixé par le nom de l'institution à laquelle il appartient.

La norme constitutive fait en effet la correspondance entre la réalité représentée comme un fait brut qui est ici l'objet, et sa signification au niveau de l'institution qui est le fait institutionnel, via la relation « compter-comme ».

Dans notre cas, le monde institutionnel est structuré sur la base de concepts tels que nous les avons décrits dans 3.2.2.1. Le monde réel utilisé par la norme constitutive représente dans la bibliographie la réalité physique telle qu'on l'aperçoit. En effet, un concept de « agriculteur » représente dans le monde réel un agriculteur qui est un être humain, un concept de « rizière » désigne la rizière qui est une zone de l'espace où on cultive des riz, le concept de « week-end » représente le Samedi et le Dimanche, etc. (figure 36).

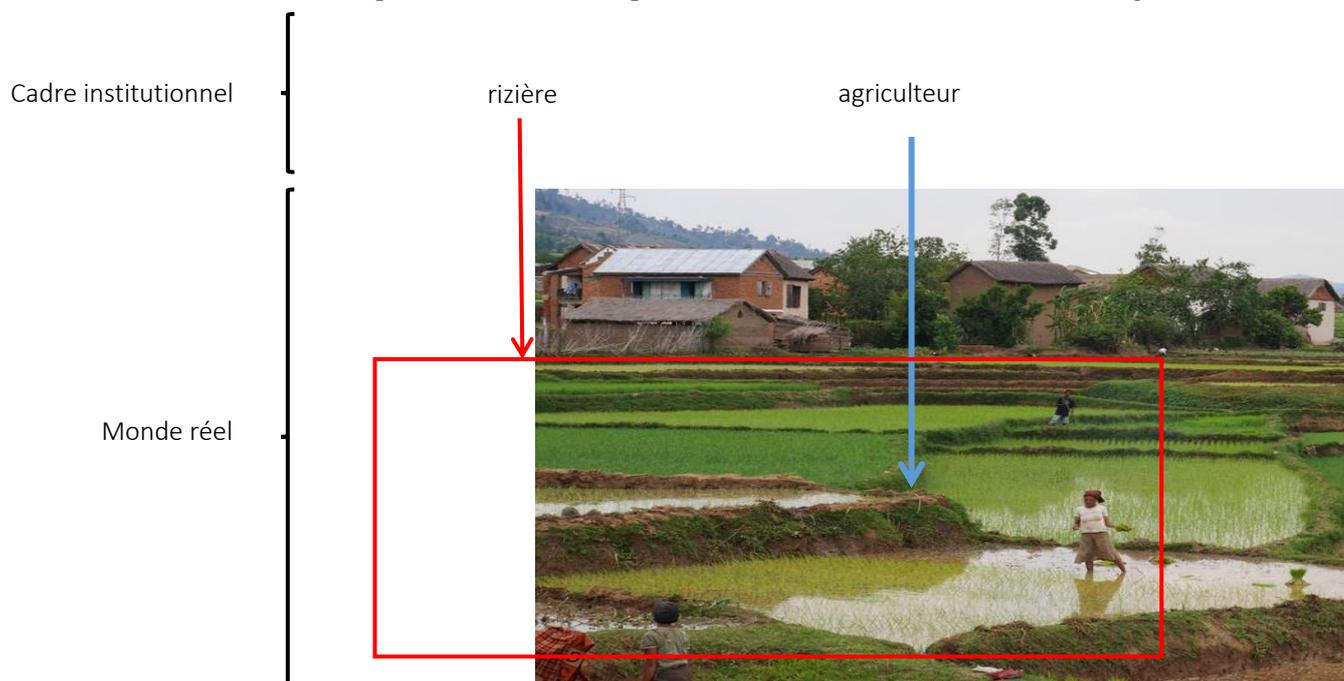


Figure 36 - Illustration de la correspondance entre cadre institutionnel et monde réel

Dans notre étude nous considérons que le monde réel est représenté à travers les organisations. Comme l'organisation contient les faits bruts, ces derniers ne peuvent être représentés dans le langage que si nous créons des objets informatiques pour les identifier et pour pouvoir calculer les normes applicables. Les concepts définis dans le niveau institutionnel sont donc mis en relation avec les objets appartenant à l'organisation via la relation « compter-comme ».

Par exemple, si dans l'institution « commune » nous avons la norme « il doit y avoir un maire qui dirige la commune », dans l'organisation « commune d'Antananarivo » qui met en œuvre l'institution commune, nous pourrions avoir la norme constitutive « agent1 compte-comme le maire de la commune d'Antananarivo ».

Pour ce faire, nous allons utiliser des structures de données informatiques capables de représenter les éléments du socio-écosystème, d'où la nécessité d'utiliser des noms et des unités de mesure. Les concepts spatiaux vont représenter des objets spatiaux qui sont des régions sous forme de polygones, les concepts

temporels vont représenter des objets temporels qui sont des intervalles de temps, les concepts sur les acteurs vont représenter des agents, etc. Nous les représentons ici par les URI qui sont des identifiants d'objets informatiques permettent par nature d'identifier un objet numérique. L'objet et la quantité sont des valeurs. La particularité des normes constitutives que nous utilisons réside donc dans le fait que les faits bruts dans notre système seront représentés, non pas par des objets physiques, mais des objets informatiques, comme le montre la figure 37.

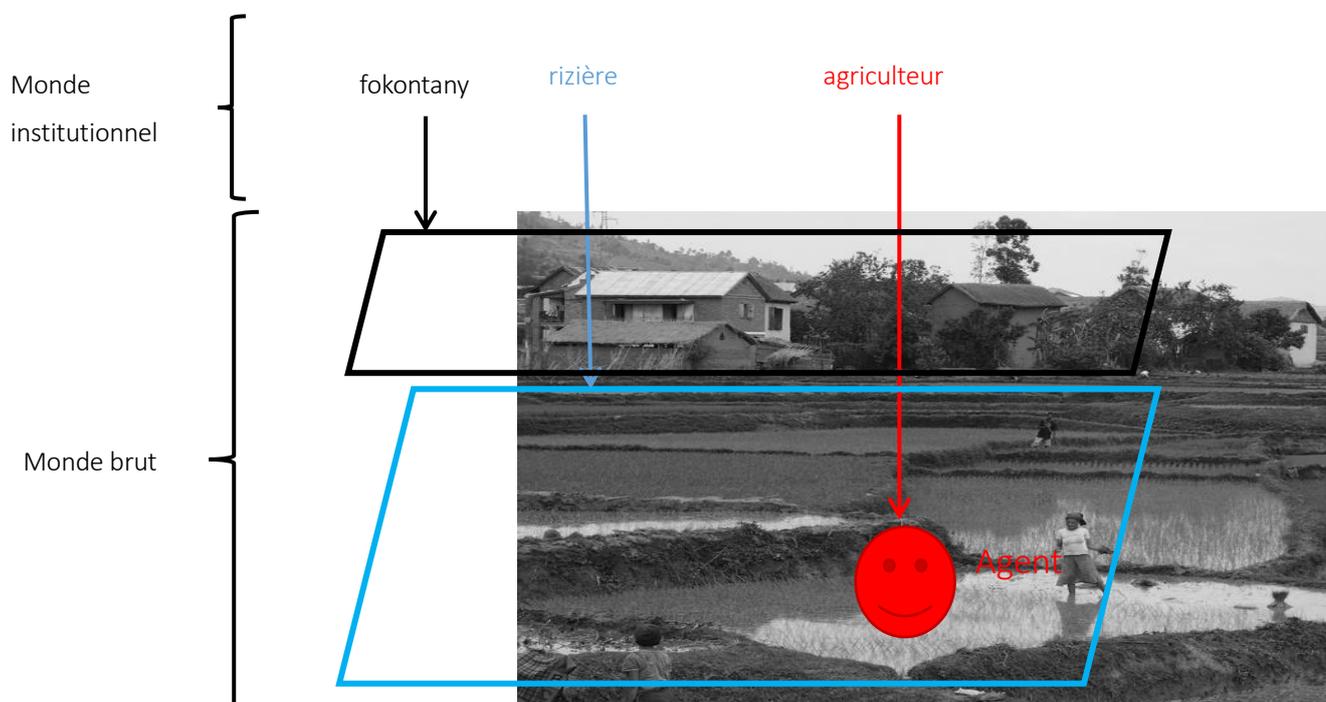


Figure 37 - Monde institutionnel et Monde brut utilisés dans les normes constitutives

Ainsi, la norme constitutive établit la correspondance entre les concepts utilisés dans le modèle d'institution et les objets appartenant au socio-écosystème et représentés dans l'organisation par des données informatiques, en affirmant qu'un certain concept compte comme un certain objet informatique.

### 3.2.2.3 La sémantique de la logique de description proposée

La sémantique de notre proposition de logique est définie dans un domaine de discours  $D$  qui contient l'ensemble des objets représentés par les concepts et définis par les assertions dans la structure conceptuelle de l'institution. Les concepts désignant des ressources humaines ou matérielles correspondent à des objets quelconques, les concepts désignant le temps à des objets temporels, les concepts désignant des zones spatiales à des objets spatiaux. En considérant qu'un objet temporel est un intervalle, et qu'un objet spatial est une région, le domaine  $D$  est donc le domaine des objets introduit dans 3.1 et est représenté par l'union des trois ensembles suivants qui correspondent aux méta-concepts (le temps, l'espace, et les autres types de concept contenant les actions, les ressources et les agents) :

- $O$  est un ensemble d'objets avec  $O = \{o_1, \dots, o_n\}$  et va correspondre aux concepts non spatio-temporels, nous considérons que l'agent est de type objet;

- $U$  est un ensemble d'intervalles avec  $U = \{int_1, \dots, int_m\}$  déterminant l'ensemble des objets temporels correspondant à des concepts temporels. On désigne par  $min(int_i)$  et  $max(int_i)$  la borne inférieure, resp. supérieure de  $int_i$  ;
- $R$  est un ensemble de régions avec  $R = \{r_1, \dots, r_p\}$  déterminant l'ensemble des zones spatiales décrites dans le système correspondant aux concepts spatiaux.

Une assertion peut être vraie ou fausse, et l'interprétation des assertions se fait par une fonction d'interprétation  $\Pi$  qui fait correspondre chaque assertion dans  $\{vrai, faux\}$ . Nous définissons une interprétation comme la donnée de  $Int = \{O, U, R, F_I, F_C, F_R\}$  et nous allons définir la fonction d'interprétation  $\Pi$  qui fait correspondre à toute interprétation  $Int$  et à toute assertion les valeurs *vrai* ou *faux*. Nous allons définir les fonctions utilitaires  $F_I$  et  $F_C$  pour l'interprétation respectivement des concepts individuels atomiques et des concepts catégoriques atomiques, et  $F_R$  pour l'interprétation des relations.

Pour tout concept individuel atomique  $I$  on a  $F_I(I) \in O \cup U \cup R$ , pour tout concept catégorique atomique  $C$  on a  $F_C(I) \subset O \cup U \cup R$ , et pour toute relation  $C_R$  on a  $F_R(C_R) \subset D \times D$ .

Or, nous savons qu'une norme constitutive dans l'organisation définit quel objet dans une organisation compte comme un certain concept de l'institution, ou de l'organisation. Ceci implique que la norme constitutive est équivalente à une fonction qui retourne la valeur de l'interprétation d'un concept. Soit  $E$  l'ensemble des concepts, et  $G$  la fonction qui représente la norme constitutive, telle que :  $G : E \rightarrow O \cup U \cup R$ . On a  $F_I(I) = G(I)$  et  $F_C(I) = G(I)$

- Interprétation des concepts individuels :

- Pour tout concept individuel atomique  $I_i$  :  $\Pi(Int, I_i) = F_I(I_i) = G(I_i)$  ;
- Soient les concepts individuels temporels  $I_1$  et  $I_2$  :
  - $\Pi(Int, before I_1) = ] - \infty ; min(\Pi(Int, I_1)) [ ;$
  - $\Pi(Int, after I_1) = ] max(\Pi(Int, I_1) ; +\infty [ ;$
  - $\Pi(Int, meets\_before I_1) = ] - \infty ; min(\Pi(Int, I_1)) ] ;$
  - $\Pi(Int, meets\_after I_1) = [ max(\Pi(Int, I_1)) ; +\infty [ ;$
  - $\Pi(Int, I_1 \cup I_2) = \Pi(Int, I_1) \cup \Pi(Int, I_2) ;$
  - $\Pi(Int, I_1 \cap I_2) = \Pi(Int, I_1) \cap \Pi(Int, I_2) ;$
- Soient les concepts individuels spatiaux  $I_1$  et  $I_2$  :
  - $\Pi(Int, EC I_1) = \cup \{r \in R \mid r \cap \Pi(Int, I_1) \neq \emptyset \text{ et } Interior(r) \cap Interior(\Pi(Int, I_1)) = \emptyset\}$  sachant que *Interior* est un opérateur qui définit une région sans sa frontière ;
  - $\Pi(Int, DC I_1) = \cup \{r \in R \mid r \cap \Pi(Int, I_1) = \emptyset\}$  ;
  - $\Pi(Int, I_1 \cup I_2) = \Pi(Int, I_1) \cup \Pi(Int, I_2)$  ;
  - $\Pi(Int, I_1 \cap I_2) = \Pi(Int, I_1) \cap \Pi(Int, I_2)$  ;

- Interprétation des concepts catégoriques :

- Pour tout concept catégorique atomique  $C_i$  :  $\Pi(Int, C_i) = F_C(C_i) = G(C_i)$  ;
- Pour les concepts d'énumération  $\{I_1, \dots, I_n\}$  :
  - $\Pi(Int, \{I_1, \dots, I_n\}) = \{\Pi(Int, I_1), \dots, \Pi(Int, I_n)\}$  ;
- Si  $C_1$  et  $C_2$  sont des concepts catégoriques :
  - $\Pi(Int, \neg C) = \{o \in O \mid o \notin \Pi(Int, C)\}$  ;
  - $\Pi(Int, C_1 \cup C_2) = \Pi(Int, C_1) \cup \Pi(Int, C_2)$  ;
  - $\Pi(Int, C_1 \cap C_2) = \Pi(Int, C_1) \cap \Pi(Int, C_2)$  ;

- Si  $C_I$  est un concept catégorique, le concept de ce qui est en relation (équivalent au rôle) avec un autre concept,  $\forall C_R(C_1)$  et  $\exists C_R(C_1)$  (ex :  $\exists voisin(C_1)$ ) comme concept de voisin d'au moins un  $C_1$ ) ;
  - $\Pi(Int, \exists C_R(C_1)) = \{o \in O \mid \exists o_i tq (o, o_i) \in F_R(C_R)\}$ ;
  - $\Pi(Int, \forall C_R(C_1)) = \{o \in O \mid \forall o_i, (o, o_i) \in F_R(C_R)\}$ ;
- Soient les concepts temporels  $C_1$  et  $C_2$  :
  - $\Pi(Int, before C_1) = \{int \in I \mid int \subseteq ] - \infty ; \min(\Pi(Int, C_1))[\}$  ;
  - $\Pi(Int, after I_1) = \{int \in I \mid int \subseteq ] \max(\Pi(Int, I_1) ; +\infty[\}$  ;
  - $\Pi(Int, meets\_before I_1) = \{int \in I \mid int \subseteq ] - \infty ; \min(\Pi(Int, I_1))[\}$  ;
  - $\Pi(Int, meets\_after I_1) = \{int \in I \mid int \subseteq ] \max(\Pi(Int, I_1) ; +\infty[\}$  ;
  - $\Pi(Int, I_1 \cup I_2) = \{int_1 \cup int_2 \mid int_1 \in \Pi(Int, I_1) \text{ et } int_2 \in \Pi(Int, I_2)\}$  ;
  - $\Pi(Int, I_1 \cap I_2) = \{int_1 \cap int_2 \mid int_1 \in \Pi(Int, I_1) \text{ et } int_2 \in \Pi(Int, I_2)\}$  ;
- Soient les concepts catégoriques spatiaux  $C_1$  et  $C_2$  :
  - $\Pi(Int, EC I_1) = \{r \in R \mid r \cap \Pi(Int, I_1) \neq \emptyset \text{ et } Interior(r) \cap Interior(\Pi(Int, I_1)) = \emptyset\}$  sachant que *Interior* est un opérateur qui définit une région sans sa frontière ;
  - $\Pi(Int, DC I_1) = \{r \in R \mid r \cap \Pi(Int, I_1) = \emptyset\}$  ;
  - $\Pi(Int, I_1 \cup I_2) = \{r_1 \cup r_2 \mid r_1 \in \Pi(Int, I_1) \text{ et } r_2 \in \Pi(Int, I_2)\}$  ;
  - $\Pi(Int, I_1 \cap I_2) = \{r_1 \cap r_2 \mid r_1 \in \Pi(Int, I_1) \text{ et } r_2 \in \Pi(Int, I_2)\}$  .

Pour les assertions :

- Interprétation des assertions de la TBox
  - o Définition de concepts
 
$$\Pi(Int, C_1 = C_2 \cup C_3) = \text{vrai si } \Pi(Int, C_1) = \Pi(Int, C_2 \cup C_3), \quad \text{faux sinon}$$
  - o Equivalence et inclusion de concepts
 
$$\Pi(Int, C_1 = C_2) = \text{vrai si } \Pi(Int, C_1) = \Pi(Int, C_2), \text{faux sinon ;}$$

$$\Pi(Int, C_1 \subseteq C_2) = \text{vrai si } \Pi(Int, C_1) \subseteq \Pi(Int, C_2), \text{faux sinon ;}$$
- Interprétation des assertions de l'ABox
  - o Assertion individuelle
 
$$\Pi(Int, I : C) = \text{vrai si } \Pi(Int, I) \in \Pi(Int, C), \text{faux sinon ;}$$
  - o Assertion relationnelle
 
$$\Pi(Int, C_R(I_1, I_2)) = \text{vrai si seulement si } (\Pi(Int, I_1), \Pi(Int, I_2)) \in F_R(C_R).$$
- Interprétation des normes constitutives
  - o  $\Pi(Int, O_1 \text{ count} - \text{as } C_1) = \text{vrai si } \Pi(Int, C_1) = O_1$
  - o  $\Pi(Int, C_1 \text{ count} - \text{as } C_2) = \text{vrai si } \Pi(Int, C_1) = \Pi(Int, C_2)$

La structure des concepts et de leurs définitions définis dans cette logique descriptive va alors traduire les mots dans l'expression des normes. Afin de donner la forme générale complète des expressions de description du SMA institutionnel, nous devons commencer par décrire l'ontologie du système proposé pour pouvoir discerner les éléments constitutifs pertinents du système, à travers le méta-modèle du SMA institutionnel en entier, qui représente par ailleurs la syntaxe abstraite du langage.

Pour pouvoir afficher les normes applicables à un agent, il nous faut donc bien expliciter principalement l'écriture des normes dans le système.

### 3.2.3 Les normes

#### 3.2.3.1 Forme générale

Nous nous intéressons dans cette étude aux normes auxquelles est soumis un agent. Notre proposition de SMA institutionnel est donc centrée organisation, et les agents agissent consciemment selon la structure organisationnelle, car les agents sont conscients des rôles qu'ils tiennent, et des normes que ces rôles impliquent selon le contexte spatio-temporel existant.

Comme nous l'avons énoncé dans l'état de l'art sur les normes dans 1.5, une norme est soit régulatrice, soit constitutive. Les règlements sociaux sont traduits principalement par les normes régulatrices que nous allons développer dans cette sous-partie.

L'étude bibliographique des normes que nous avons établie sur les normes régulatrices dans 1.5.3.1 nous a permis de conclure qu'une norme régulatrice spécifie essentiellement par une modalité déontique conditionnelle les comportements d'un agent en fonction de son rôle, par une récompense le respect de cette norme et par une sanction la violation correspondante. C'est la raison pour laquelle nous choisissons d'adopter le modèle de norme ADICO qui intègre déjà ces différents éléments, sur la base de la « stratégie partagée » dont la structure contient :

- (A)ttributes : à qui s'applique la norme
- a(I)m : quel est le but fixé pour cette norme
- (C)ondition : sous quelles conditions cette norme s'applique

ex: si les usagers cultivent un champ en une année, ils le laissent l'année suivante

Cette stratégie partagée devient « norme sociale » lorsqu'elle possède le (D)eontic : permis/interdit/obligé.

ex: il est obligatoire que si les usagers cultivent ...

Cette norme sociale devient une « règle » lorsqu'elle possède le (O)therwise : sanction

ex: il est obligatoire que ... sinon ils doivent payer une amende

Mais étant donné que notre contribution consiste à proposer un outil de description des institutions et des organisations sur le territoire pour que le modèle puisse être adapté au socio-écosystème, dans le temps et en fonction des rôles sociaux, comme nous l'avons énoncé dans l'introduction, alors il faut que notre modèle puisse tenir compte de l'espace, du temps, et des rôles sociaux. Or le rôle social est déjà intégré dans le modèle ADICO par le fait que le sujet de la norme qui est l'attribut A dans ADICO est précisé, nous avons donc besoin d'intégrer le paramètre spatio-temporel dans ce modèle, pour qu'il puisse représenter les normes dans le socio-écosystème.

L'intégration de la dimension spatio-temporelle dont nous avons besoin fait partie intégrante des conditions relatives aux normes. Plus précisément, soit la norme est constitutive, soit la norme est régulatrice et sa structure se base dans ce cas sur celle de la norme proposée dans ADICO, que nous avons adoptée pour tenir compte du temps et de l'espace. Cette modélisation des normes dans un contexte multi-institutionnel territorialisé a été publiée dans (Müller et Raharivelo 2017), et les détails de notre proposition de modèle de norme intégrant la dimension spatio-temporelle à travers les conditions d'application ont été publiés dans (Raharivelo et Müller 2018). Brièvement, une norme régulatrice s'exprime sous la forme :

*Si [Condition] alors [Modalité Déontique][Attribut][But]*

telle que [Condition] et [But] sont des expressions dont la structure sera détaillée plus tard. Le méta-modèle

de norme est décrit dans la figure 38.

Par exemple :

Si [il pleut dans le parc] alors [il est interdit][aux pêcheurs][de pêcher dans des zones extérieurement connectées au parc après 17h].

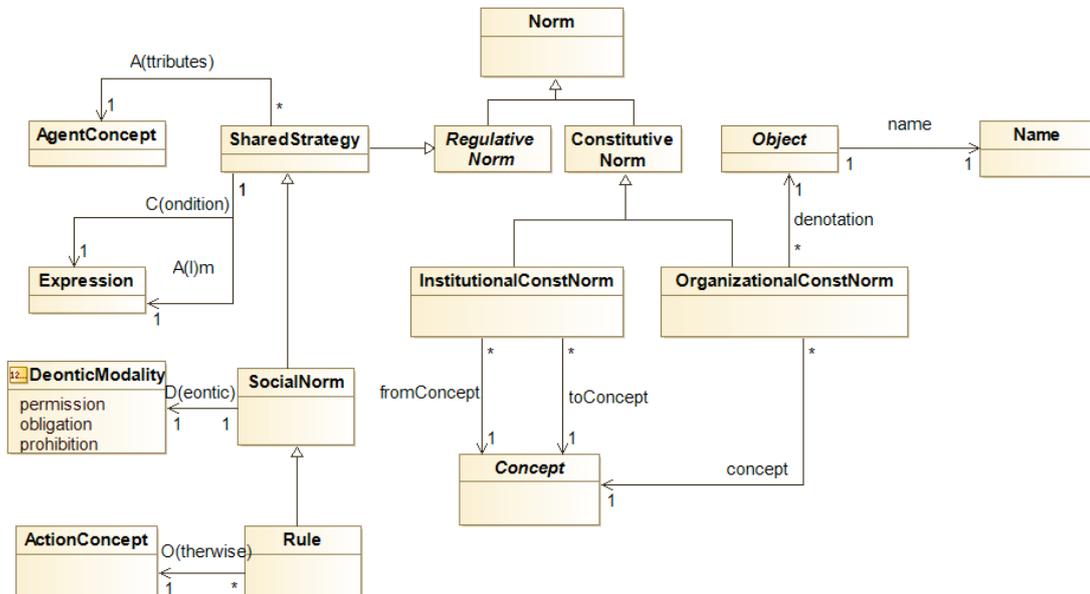


Figure 38 - Méta-modèle de la norme

### 3.2.3.2 Les conditions

Les conditions sont les éléments principaux qui permettent de déterminer l'applicabilité d'une norme. Le processus de vérification du sens des expressions du langage va se faire de manière formelle. Nous avons besoin de décomposer l'expression en de plus petits éléments. Pour cela, nous allons utiliser le calcul propositionnel qui permet de décomposer les propositions en atomes assez fins pour lui donner un ciment logique. Nous allons donc représenter le méta-modèle des conditions que nous avons proposé en utilisant le langage du premier ordre, puis nous en définirons la sémantique pour définir l'applicabilité des normes.

#### 3.2.3.2.1 Méthodologie utilisée : langage du premier ordre

Le langage du premier ordre nécessite en premier lieu des variables et des fonctions propositionnelles atomiques dépendant de certaines variables pour formuler une expression. Ensuite, l'assertion (ou prédicat) et les objets sur lesquels porte l'assertion sont nécessaires pour construire une phrase du langage. En outre, les opérations vont permettre de construire de nouveaux objets à partir d'autres objets.

Le langage du premier ordre issu d'une base  $B$ , noté  $L(B)$ , où  $B = \{F, R\}$  est un couple de sous-ensembles (le plus souvent fini), formé d'un ensemble  $F$  d'opérations et d'un ensemble  $R$  de prédicats. Les symboles non permanents de  $L(B)$  sont limités aux seuls éléments de  $F \cup R$ .

L'ensemble  $T$  des termes est défini comme suit :

- Toute variable est un terme
- Si  $t_1, t_2, \dots, t_k$  sont des termes, alors  $f_i^k(t_1, t_2, \dots, t_k)$  est un terme tel que  $f_i^k \in F$

L'ensemble des formules (ou énoncés)  $L$  est défini comme suit :

- Si  $t_1, t_2, \dots, t_k$  sont des termes, alors  $p_i^k(t_1, t_2, \dots, t_k)$  est une formule atomique avec  $p_i^k \in R$
- Soient  $P$  et  $Q$  des formules, et  $x$  une variable, alors  $\neg(P)$ ,  $(P) \vee (Q)$ ,  $(P) \wedge (Q)$ ,  $(P) \Rightarrow (Q)$ ,  $(P) \Leftrightarrow (Q)$ ,  $\forall x(P)$  et  $\exists x(P)$  sont des formules

On appelle interprétation d'un langage du premier ordre  $L(F, R)$  la donnée d'un triplet  $\Gamma = \langle D, \tau F, \tau R \rangle$  dans lequel  $D$  est un ensemble non vide et désigne le domaine de l'interprétation, et où :

- $\tau F$  est constitué d'applications  $\tau f (f \in F) : D^q \rightarrow D$  ( $q$  est l'arité de  $f$ )
- $\tau R$  est constitué d'applications  $\tau p (p \in R) : D^q \rightarrow 2$  ( $q$  est l'arité de  $p$ )

Pour une interprétation donnée  $\Gamma$  de  $L(F, R)$ , on appelle assignation relative à  $\Gamma$ , toute application  $s : X \rightarrow D$  ( $s(x)$  est la valeur assignée à la variable  $x$  par  $s$ ).

Ainsi, pour chaque terme  $t$  dans  $L(F, R)$ , on définit sa valeur  $s(t)$  dans  $D$  tel que :

- lorsque  $t = x$  alors  $s(t)$  n'est autre que  $s(x)$
- lorsque  $t = f(t_1, t_2, \dots, t_k)$  alors  $s(t) = \tau f(s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_k))$

De même,

- Pour une formule atomique  $A = p(t_1, t_2, \dots, t_k)$  alors

$$s(A) = \tau p(s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_k))$$

- Pour toute formule  $A$  qui se présente comme la négation d'une formule préalable ou la connexion de deux formules préalables,  $s(A)$  s'obtient en utilisant la table de vérité du connecteur correspondant
- Pour une formule  $A = \exists x(B)$ , la valeur logique  $s(A)$  vaut
  - o 1 s'il existe  $d \in D$  avec  $s[x \rightarrow d](B) = 1$
  - o 0 sinon
- Pour une formule  $A = \forall x(B)$ , la valeur logique  $s(A)$  vaut
  - o 1 si pour tout  $d \in D$  on a  $s[x \rightarrow d](B) = 1$
  - o 0 sinon

Sachant que la logique de description dont nous nous sommes inspirés pour décrire la syntaxe abstraite qui est le méta-modèle est un sous-ensemble des langages du premier ordre, nous allons utiliser cette syntaxe abstraite comme langage et la sémantique de ce langage sera définie de la même façon que pour la logique. Dans le cadre de notre étude, la partie à vérifier sera les conditions sur les normes, afin de déterminer l'applicabilité des normes à un moment donné et dans un certain lieu.

### 3.2.3.2.2 *Le méta-modèle des conditions*

Nous allons représenter formellement la condition par une formule logique, la vérification de l'applicabilité de la norme revient donc à vérifier la véracité de la condition à partir de la sémantique. Dans la figure 39 nous avons présenté le méta-modèle d'une expression pouvant représenter une condition, la formule logique que nous allons décrire sera donc juste une traduction de ce méta-modèle sous une autre forme.

Nous avons introduit la notion d'expression dans le modèle pour expliciter la manière de formuler les contenus des normes. Elle prend en compte par conséquent les notions de temps, d'espace, d'action en utilisant les concepts. Une expression peut être une simple expression unaire, une expression binaire

composée de deux expressions liées par les opérateurs « or » ou « and » ou « xor », une négation d'une expression, une expression de la forme « A until B » pour exprimer une condition A vérifiée au moins avant une autre B, ou une expression de la forme « X A » qui se lit dans la suite immédiate la condition A est vérifiée. Une simple expression peut décrire le temps, l'espace, une action, ou un fait qui est soit une catégorie soit une relation. A titre d'exemple, voici une norme :

« Il est interdit de cultiver pendant deux années successives à partir de 2020

Expression de temps

dans un même champ dans la commune de Fianarantsoa si

Expression d'espace

ce champ est entouré de forêts ou si ce champ est un champ de maïs ».

Expression d'espace

Expression de catégorie

Expression de la condition par un ensemble d'expressions

Le méta-modèle de l'expression est décrit par la figure 39.

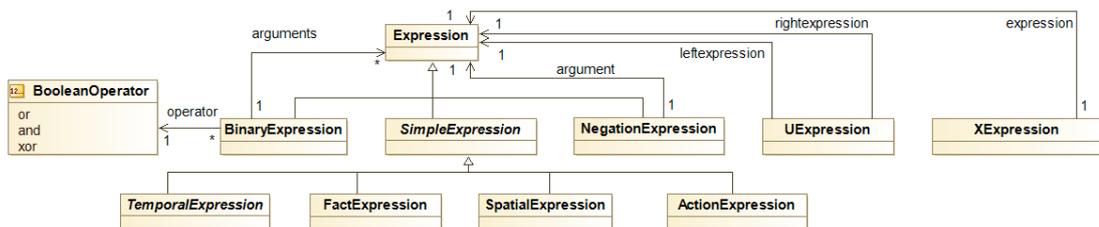


Figure 39 - Méta-modèle de l'expression

L'expression temporelle est décrite dans la figure 40. Il peut s'agir :

- de simple expression composée de concept de temps précédé de « at » (ex : « at hier », « at demain », « at ce week-end », etc. ). Notons en outre les deux concepts temporels spécifiques :
  - « sometimes » pour indiquer que la norme est valable quelquefois, c'est-à-dire pour un certain ensemble d'intervalles
  - « always » pour indiquer que la norme est toujours valable en tout temps, et représente la valeur par défaut de la condition temporelle dans une condition normative
- d'expression unaire : et décrit une ou un ensemble d'intervalles obtenus en se référant par rapport à un certain intervalle en utilisant l'un des noms de relations : *before*, *after*, *meets\_before*, *meets\_after* devant un nom de concept temporel (ex : *before* été)
- ou d'expression binaire utilisant une des 13 *relations de Allen* et deux concepts temporels

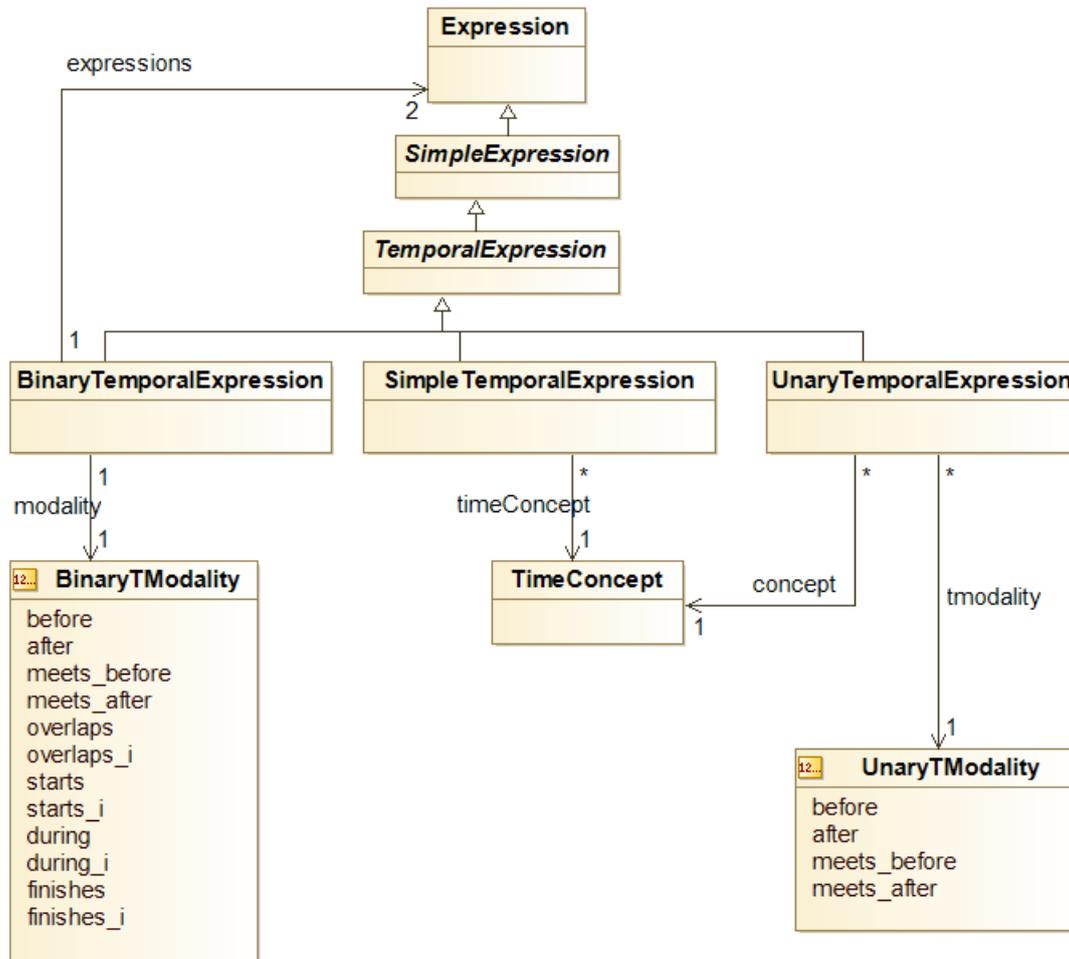


Figure 40 – Méta-modèle de l'expression temporelle

L'expression spatiale est décrite dans la figure 41. De la même façon, il peut s'agir

- de simple expression composée de concept d'espace précédé de « in » (ex : « in Antananarivo », « in Université de Fianarantsoa », « in le palais d'Iavoloha », etc.). Notons dans ce cas les deux concepts spatiaux particuliers :
  - « somewhere » pour indiquer que la norme est valable dans certains endroits seulement
  - ou « everywhere » pour indiquer que la norme est valable dans toute zone spatiale considérée, et qui est d'ailleurs la condition spatiale par défaut dans toute condition normative
- d'expression unaire : décrit une ou un ensemble de régions obtenues en se référant par rapport à une certaine région en utilisant l'un des noms de relations : *EC*, *DC* devant un nom de concept spatial (ex : *EC* Antananarivo)
- ou d'expression binaire utilisant une des relations dans le *RCC-8* reliant deux concepts spatiaux

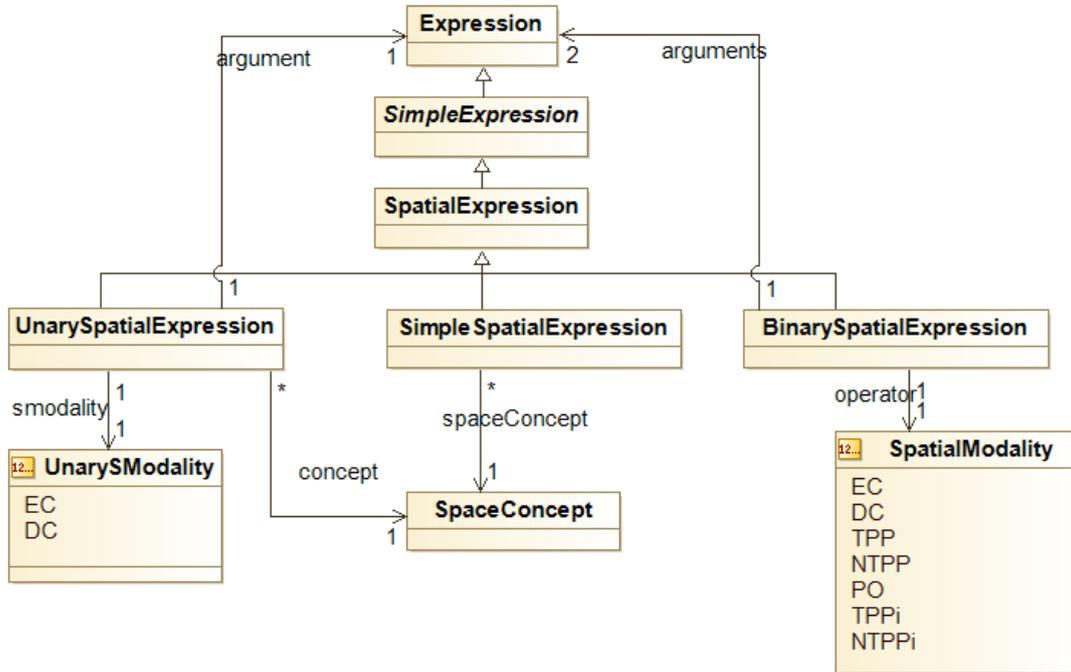


Figure 41 - Méta-modèle de l'expression spatiale

L'expression factuelle est décrite dans la figure 42. Une expression factuelle consiste : soit à une expression de catégorisation (le fait qu'un concept appartient à une catégorie de concept), soit à une expression de relation entre deux concepts, la relation étant elle-même un autre concept (dont le méta-concept est relation) dans l'expression, soit à une expression de comparaison entre deux concepts de mesure.

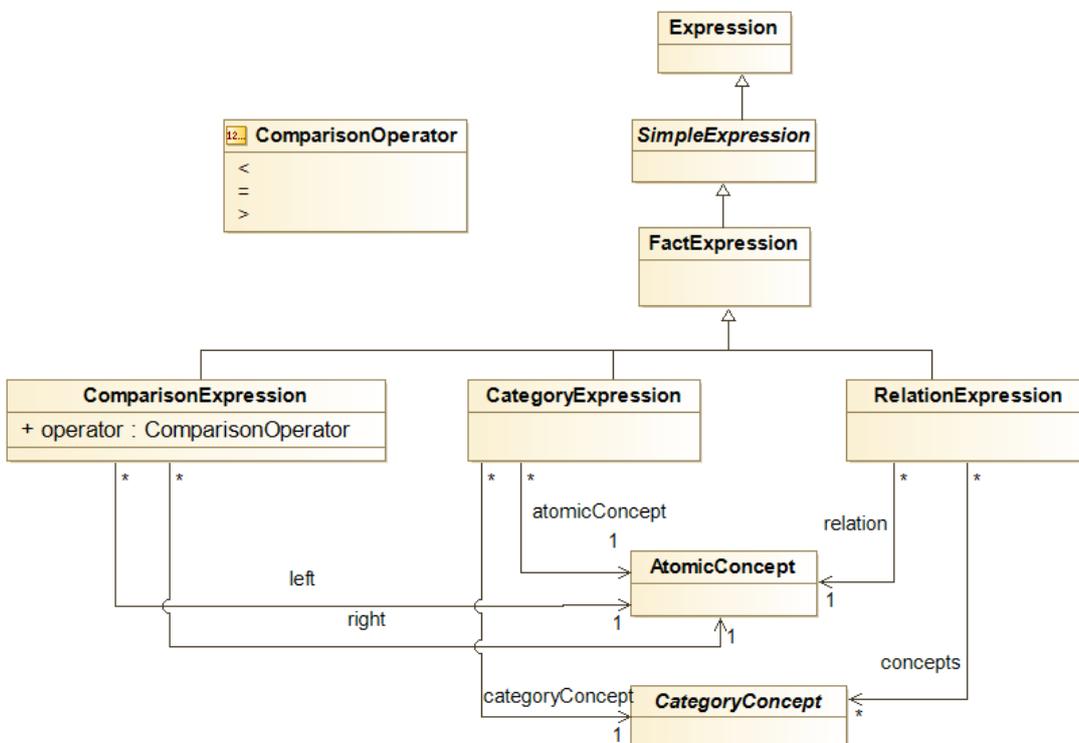


Figure 42 - Méta-modèle de l'expression factuelle

L'expression de l'action est constituée d'un concept désignant l'action, et d'autres concepts catégoriques qui servent de paramètres dans l'exécution de cette action, telle qu'elle est décrite dans la figure 43.

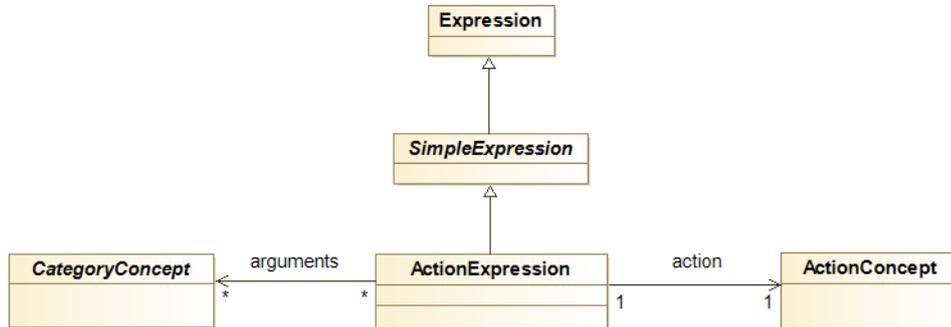


Figure 43 - Méta-modèle de l'expression de l'action

Conformément à la description du langage du premier ordre vu précédemment, et après avoir établi le méta-modèle des normes et des conditions normatives, il faut définir ensuite les termes, les fonctions, et les formules atomiques sur lesquelles repose le langage.

- **Les termes et les fonctions**

L'ontologie construite sur la base de ces concepts va doter l'institution d'un ensemble de mots  $B = \{C, P, A\}$  avec :

- $C$  : l'ensemble des constantes (désignant des objets) ;
- $P$  : l'ensemble des prédicats (les noms de relation) ;
- $A$  : l'ensemble des noms d'action.

Sur ces mots, et en utilisant certains noms de relations de l'algèbre d'Allen et de RCC-8, les termes et les fonctions ainsi que leurs sémantiques sont décrites dans notre proposition de DL dans 3.2.2, tel qu'un terme est :

- Soit une constante  $c \in C$  où  $c$  peut être une constante individuelle, temporelle ou spatiale ;
- Soit un terme temporel de la forme : *before t*, *after t*, *meets\_before t*, *meets\_after t*,  $t_1 \text{ inter } t_2$ ,  $t_1 \text{ union } t_2$ , où  $t$ ,  $t_1$  et  $t_2$  sont des termes temporels ;
- Soit un terme spatial de la forme *EC t* (extérieurement connecté à  $t$ ), *DC t* (déconnecté de  $t$ ),  $t_1 \text{ inter } t_2$ ,  $t_1 \text{ union } t_2$  où  $t$ ,  $t_1$  et  $t_2$  sont des termes spatiaux ;
- Il n'y a pas d'autres termes.

- **Les conditions bien formées (cbf) atomiques**

Les énoncés exprimant une condition normative et utilisant ces termes revêtent par conséquent plusieurs formes en fonction de ces types de concept :

- Des cbf atomiques exprimant :
  - o Une action : de la forme  $a(t_1, \dots, t_n)$  où  $a \in A$ , et  $t_1, \dots, t_n$  sont des termes, pour exprimer qu'une action a lieu  
Exemple : cultiver (agriculteurs, manioc) où travailler est un concept d'action, et les termes agriculteurs, manioc des concepts indiquant respectivement le sujet et l'objet.
  - o Un fait qui peut être :

- Une relation entre objets de la forme  $p(t_1, t_2)$  où  $p$  est un prédicat ( $\in P$ ) et  $t_1$  et  $t_2$  sont des termes individuels ;  
Exemple : voisins (agriculteurs, éleveurs) pour définir une relation « voisins » entre « agriculteurs » et « éleveurs »
- Une catégorisation de la forme  $p(t)$  où  $p$  est un prédicat ( $\in P$ ) et  $t$  est un terme individuel ;  
Exemple : villageois (agriculteurs) qui indique que les agriculteurs sont de villageois
- Une comparaison de la forme  $t_1 < t_2$ ,  $t_1 > t_2$  ou  $t_1 = t_2$  où  $t_1$  et  $t_2$  sont des termes individuels ;  
Exemple :  $prix\_riz < prix\_viande$  pour exprimer que le prix du riz est inférieur au prix de la viande
- o Une cbf temporelle
  - de la forme  $in\ t$  où  $t$  est un terme temporel, pour exprimer qu'on est dans cet intervalle de temps ;  
Exemple : « *in été* » pour exprimer une condition valable durant l'ensemble des intervalles de temps représentant la saison d'été
  - de la forme d'une relation temporelle :  $a\ before\ b$ ,  $a\ after\ b$ ,  $a\ meets\_before\ b$ ,  $a\ meets\_after\ b$ ,  $a\ overlaps\ b$ ,  $a\ overlaps\_i\ b$ ,  $a\ starts\ b$ ,  $a\ starts\_i\ b$ ,  $a\ during\ b$ ,  $a\ during\_i\ b$ ,  $a\ finishes\ b$ ,  $a\ finishes\_i\ b$  où  $a$  et  $b$  sont des termes temporels ;  
Exemple : « *Mardi before Noël* »
- o Une cbf spatiale
  - de la forme  $at\ t$  où  $t$  est un terme spatial, pour exprimer qu'on est dans cette région ;  
Exemple : « *at Fianarantsoa* » pour déterminer la région de Fianarantsoa
  - de la forme d'une relation spatiale :  $a\ DC\ b$ ,  $a\ EC\ b$ ,  $a\ TPP\ b$ ,  $a\ NTPP\ b$ ,  $a\ PO\ b$ ,  $a\ TPPi\ b$ ,  $a\ NTPPi\ b$  où  $a$  et  $b$  sont des termes spatiaux ;  
Exemple : « *forêt DC commune Antananarivo* » pour exprimer les forêts déconnectées à la commune d'Antananarivo
- Des cbf composés : de la forme  $\neg A$  pour la négation,  $A \wedge B$  pour la conjonction,  $A \vee B$  pour la disjonction,  $A\ U\ B$  qui se lit «  $A$  au moins jusqu'à ce que  $B$  »,  $X\ A$  qui se lit « dans la suite immédiate  $A$  » ;  
Exemple :  $\neg Antananarivo$  qui définit toute région qui n'est pas d'Antananarivo
- Il n'y a pas d'autres cbf.

Ces expressions logiques sont partiellement typées puisque nous distinguons les objets quelconques des objets temporels et spatiaux. Elles sont fondées (*grounded*) dans le sens qu'il n'y a pas de variables, et construites sur les logiques de descriptions dont nous supposons ici les possibilités de définition des prédicats et constantes utilisés (Baader, Horrocks, et Sattler 2005). Ainsi, la proposition n'est pas seulement spécifique aux normes d'un SMA mais elle permet de définir l'ontologie et les normes spatio-temporelles de toute institution.

### 3.2.3.3 La sémantique des conditions

Le processus de vérification du sens des expressions du langage va se faire de manière formelle. Nous avons besoin de décomposer l'expression en de plus petits éléments. Pour cela, nous allons utiliser le calcul des prédicats du premier ordre simplifié qui permet de décomposer les propositions en atomes assez fins pour lui donner un ciment logique.

La sémantique consiste à déterminer comment interpréter une proposition, et comment connaître sa véracité. Pour chaque proposition, nous devons distinguer les constantes et les prédicats, et déterminer comment ces éléments doivent être interprétés.

Pour définir la sémantique spatio-temporelle de la logique ci-dessus, le domaine sémantique ou domaine de discours auquel tous les concepts feront référence devra être défini en premier lieu. Or, la norme constitutive fait la correspondance entre le monde institutionnel caractérisé par les différents concepts qui le composent, et le monde réel caractérisé dans notre système par des données numériques.

Les intervalles sont munis de l'algèbre d'Allen qui offre une expressivité simple et complète des relations entre deux intervalles de temps pour pouvoir calculer la composition de deux expressions temporelles. De la même façon, nous allons utiliser *RCC-8* pour calculer des relations entre deux régions de façon complète.

Le domaine de discours est tel que nous l'avons défini dans 3.2.2.3, soit  $D = O \cup U \cup R$ .

Nous avons vu qu'une institution ne définit que le vocabulaire (et les normes), et que les normes constitutives définies établissent via la relation « compter-comme » la correspondance entre faits institutionnels et faits bruts. Nous allons concrétiser ces normes constitutives par les fonctions d'interprétation du langage qui vont lier le vocabulaire aux objets.

Nous allons définir les fonctions  $F_C$  pour interpréter les constantes,  $F_R$  pour interpréter les prédicats, et  $F_A$  pour interpréter les actions.

- $F_C : C \rightarrow O \cup U \cup R$  est la fonction d'interprétation des constantes dans le domaine de discours ;
- $F_R : P \rightarrow O^n \rightarrow \{2^U, 2^R\}$  est la fonction d'interprétation des prédicats qui associe à un prédicat la fonction qui associe à des n-uplets d'objets, l'ensemble des intervalles, resp. des régions où  $P$  est vrai de ces objets.
- $F_A : P \rightarrow O^n \rightarrow \{2^U, 2^R\}$  est la fonction d'interprétation des actions qui associe à une action la fonction qui associe à des n-uplets d'objets l'ensemble des intervalles, resp. des régions où l'action se produit.

Les fonctions  $F = F_C \cup F_R \cup F_A$  sont l'équivalent des normes constitutives faisant correspondre les concepts (constantes) aux objets du discours. En effet, les fonctions  $F$  renvoient pour chaque constante d'objet, d'intervalle, de région, ou d'action, quel objet appartenant au domaine sémantique « compte comme » cette constante (Searle et al. 1995). Cette correspondance entre attributs et valeurs caractérise donc l'état de l'environnement, et l'environnement dans lequel se trouvent les agents est ici l'organisation dont la structure sera détaillée plus tard. L'organisation va donc définir à la fois les objets dont elle parle et la sémantique du vocabulaire utilisé dans les normes de l'institution correspondante. Dans le cadre de la simulation utilisant cette logique, ces objets qui définissent le domaine sémantique sont représentés sous forme d'objets informatiques, et en particulier d'intervalles concrets (ex : intervalle de temps entre deux dates) ou de polygones représentant les propriétés temporelles et spatiales du monde physique.

L'applicabilité d'une norme varie en fonction du temps et du lieu, ainsi une norme va être applicable ou

pas (sa condition va être vraie ou fausse) dans le contexte d'une organisation particulière (définissant  $O$ ,  $U$ ,  $R$ ,  $F_C$ ,  $F_R$ , et  $F_A$ ), mais aussi dans un intervalle particulier « *now* » et dans la région définie par « *here* ». Donc, nous définissons une interprétation comme la donnée de  $Int = \{O, U, R, F_C, F_R, F_A, now \in U, here \in R\}$  et nous allons définir la fonction d'interprétation  $MAS$  qui fait correspondre à toute interprétation  $Int$  et à toute cbf, les valeurs *vrai* ou *faux*. Il s'agit donc de calculer si, étant donné le domaine de discours, y compris spatio-temporel, la condition est vraie ou fausse ici (*here*) et maintenant (*now*). L'intervalle *always* désigne l'intervalle  $[min\ now ; +\infty[$  et la région *everywhere* désigne  $R$ . Par défaut, la condition temporelle est *always* si elle n'est pas précisée, et la condition spatiale *everywhere*. Nous allons d'abord définir la sémantique des termes :

- pour toute constante  $c \in C$  :  
 $MAS(Int, c) = F_C(c) = G(c) \in O \cup U \cup R$   
car tout concept sera interprété soit par un objet informatique telle qu'une fonction, un chiffre, etc. dans  $O$ , soit par un intervalle dans  $U$ , soit par une région définie par un polygone dans  $R$  par la fonction  $G$  représentant la norme constitutive
- pour les termes temporels construits à partir des fonctions basées sur l'algèbre de Allen, soient  $(Int, t_i) = G(t_i) = int_i$ ,  $i = 1, 2$  où  $t_i$  est un terme temporel et  $int_i$  un intervalle :
  - o  $MAS(Int, after\ t_1) = ]max(int_1) ; +\infty[$   
Ex:  $MAS(Int, after\ saison\_sèche) = ]30\ Octobre ; +\infty[$
  - o  $MAS(Int, before\ t_1) = ]-\infty ; min(int_1)[$   
Ex:  $MAS(Int, before\ saison\_sèche) = ]-\infty ; 1\ Mai[$
  - o  $MAS(Int, meets\_before\ t_1) = ]-\infty ; min(int_1)[$   
Ex:  $MAS(Int, meets\_before\ saison\_sèche) = ]-\infty ; 1\ Mai[$
  - o  $MAS(Int, meets\_after\ t_1) = [max(int_1) ; +\infty[$   
Ex:  $MAS(Int, meets\_after\ saison\_sèche) = [30\ Octobre ; +\infty[$
  - o  $MAS(Int, t_1\ inter\ t_2) = int_1 \cap int_2$  et renvoie l'intervalle d'intersection entre  $int_1$  et  $int_2$   
Ex:  $MAS(Int, [Novembre ; Février] inter [Janvier ; Mars]) = [Janvier ; Février]$
  - o  $MAS(Int, t_1\ union\ t_2) = int_1 \cup int_2$  et renvoie l'intervalle qui unit  $int_1$  et  $int_2$   
Ex:  $MAS(Int, [Février ; Avril] union [Janvier ; Mars]) = [Janvier ; Avril]$
- pour les termes spatiaux construits à partir des fonctions basées sur l'algèbre RCC-8, soient  $(Int, t_i) = G(t_i) = r_i$ ,  $i = 1, 2$  où  $t_i$  est un terme spatial et  $r_i$  une région :
  - o  $MAS(Int, EC\ t_i) = \{r_j \in R \mid r_j \cap r_i \neq \emptyset \text{ et } Interior(r_j) \cap Interior(r_i) = \emptyset\}$  sachant que  
 $Interior$  est un opérateur qui définit une région sans sa frontière.
  - o  $MAS(Int, DC\ t_i) = \{r_j \in R \mid r_i \cap r_j = \emptyset\}$
  - o  $MAS(Int, t_1\ inter\ t_2) = r_1 \cap r_2$
  - o  $MAS(Int, t_1\ union\ t_2) = r_1 \cup r_2$
- pour les cbf atomiques temporelles :
  - o soit  $MAS(Int, t) = int$  où  $t$  est un terme temporel et  $int$  un intervalle :
    - $MAS(Int, in\ t)$  est vrai si et seulement si  $now \subset int$
  - o soient les termes temporels  $a$  et  $b$ ,  $MAS(Int, a) = G(a) = int_a$  et  $MAS(Int, b) = G(b) = int_b$ 
    - $MAS(Int, a\ before\ b)$  est vrai si  $max\ int_a < min\ int_b$
    - $MAS(Int, a\ after\ b)$  est vrai si  $max\ int_b < min\ int_a$

- $MAS(Int, a \text{ meets\_before } b)$  est vrai si  $\max int_a = \min int_b$
- $MAS(Int, a \text{ meets\_after } b)$  est vrai si  $\max int_b = \min int_a$
- $MAS(Int, a \text{ overlaps } b)$  est vrai si  $\min int_a < \min int_b$ ,  $\max int_a > \min int_b$  et  $\max int_a < \max int_b$
- $MAS(Int, a \text{ overlaps\_i } b)$  est vrai si  $\min int_b < \min int_a$ ,  $\max int_b > \min int_a$  et  $\max int_b < \max int_a$
- $MAS(Int, a \text{ starts } b)$  est vrai si  $\min int_a = \min int_b$  et  $\max int_a < \max int_b$
- $MAS(Int, a \text{ starts\_i } b)$  est vrai si  $\min int_b = \min int_a$  et  $\max int_b < \max int_a$
- $MAS(Int, a \text{ during } b)$  est vrai si  $\min int_a > \min int_b$  et  $\max int_a < \max int_b$
- $MAS(Int, a \text{ finishes } b)$  est vrai si  $\min int_a > \min int_b$  et  $\max int_a = \max int_b$
- $MAS(Int, a \text{ finishes\_i } b)$  est vrai si  $\min int_b > \min int_a$  et  $\max int_b = \max int_a$
- pour les cbf atomiques spatiales :
  - soit  $MAS(Int, t) = G(t) = r$  où  $t$  est un terme spatial et  $r$  une région :

$MAS(Int, at t)$  est vrai si et seulement si  $here \subset r$
  - soient les termes spatiaux  $a$  et  $b$ ,  $MAS(Int, a) = r_a$  et  $MAS(Int, b) = r_b$ , et *Interior* l'opérateur intérieur d'un ensemble défini précédemment :
    - $MAS(Int, a \text{ DC } b)$  est vrai si  $r_a \cap r_b = \emptyset$
    - $MAS(Int, a \text{ EC } b)$  est vrai si  $r_a \cap r_b \neq \emptyset$  et  $Interior(r_a) \cap Interior(r_b) = \emptyset$
    - $MAS(Int, a \text{ TPP } b)$  est vrai si  $r_a \subset r_b$
    - $MAS(Int, a \text{ NTPP } b)$  est vrai si  $r_a \subset Interior(r_b)$
    - $MAS(Int, a \text{ PO } b)$  est vrai si  $Interior(r_a) \cap Interior(r_b) \neq \emptyset$
    - $MAS(Int, a \text{ TPPi } b)$  est vrai si  $MAS(Int, b \text{ TPP } a)$  est vrai
    - $MAS(Int, a \text{ NTPPi } b)$  est vrai si  $MAS(Int, b \text{ NTPP } a)$  est vrai
- pour les cbf factuelles, soient  $(Int, t_i) = o_i$ ,  $i = 1, 2$  où  $t_i$  est un terme non temporel ou spatial,  $o_i$  un objet,  $int$  un intervalle,  $r$  une région, et  $p$  un fait
  - $MAS(Int, p(t_1, t_2))$  est vrai si et seulement si,  $F_R(p)(o_1, o_2) = \{int, r\}$  et  $now \subset int$  et  $here \subset r$ . La notation est définie par l'assertion de rôle en logique de description.

Ex : En supposant que  $F_r(\text{voisin\_de})(agent_1, agent_2) = \{hier, Antananarivo\}$ , la condition  $(agent_1 \text{ est voisin de } agent_2)$  est vraie si  $now \subset hier$  et si  $here \subset Antananarivo$
  - $MAS(Int, p(t_i))$  est vrai si et seulement si  $F_R(p)(o_i) = \{int, r\}$  et  $now \subset int$  et  $here \subset r$ . La notation correspond à l'assertion individuelle en logique de description.

Ex : En supposant que  $F_r(\text{cultivateur})(agent_1) = \{saison\_sèche, parc\_Isalo\}$ , la norme relative à cette condition (qui dit que  $agent_1$  est cultivateur) est applicable si  $now \subset saison\_sèche$  et  $here \subset parc\_Isalo$
  - $MAS(Int, t_1 < t_2)$  est vrai si et seulement si  $MAS(Int, t_1) < MAS(Int, t_2)$
  - $MAS(Int, t_1 > t_2)$  est vrai si et seulement si  $MAS(Int, t_1) > MAS(Int, t_2)$
  - $MAS(Int, t_1 = t_2)$  est vrai si et seulement si  $MAS(Int, t_1) = MAS(Int, t_2)$

- pour les cbf sur l'action, soient  $a$  une action,  $t_1, t_2, \dots, t_n$  des termes tels que  $MAS(Int, t_i) = G(t_i) = o_i$  et  $o_i$  un objet :
  - o  $MAS(Int, a(t_1, t_2, \dots))$  est vrai si  $F_A(a)(o_1, o_2, \dots) = \{int, r\}$  et  $now \subset int$  et  $here \subset r$ , tels que  $int$  est un intervalle et  $r$  une région

Exemple :  $agriculteurs(cultiver\_riz) = \{Mai, Fianarantsoa\}$  signifie que « les agriculteurs cultivent du riz » est vraie lorsque la région « here » est dans Fianarantsoa et le temps « now » considéré est inclus dans l'intervalle Mai. Outre ces conditions, cette *cbf* est fausse.
- pour les relations entre *cbf*,  $cbf_1$ ,  $cbf_2$  :
  - o  $MAS(Int, cbf_1 \wedge cbf_2)$  est vrai si  $MAS(Int, cbf_1)$  et  $MAS(Int, cbf_2)$  sont vrais
  - Exemple :  $agriculteurs(cultiver\_riz) \wedge agriculteurs(cultiver\_manioc)$  est vrai si durant *now*, et dans la région *here*, les deux *cbf* sont vraies
  - o  $MAS(Int, cbf_1 \vee cbf_2)$  est vrai si  $MAS(Int, cbf_1)$  est vrai ou si  $MAS(Int, cbf_2)$  est vrai
  - o  $MAS(Int, \neg cbf_1)$  est vrai si  $MAS(Int, cbf_1)$  est faux
  - o  $MAS(Int, cbf_1 \cup cbf_2)$  est vrai s'il existe un intervalle  $i$  tel que  $MAS(Int, cbf_2)$  est vrai dans  $i$  et  $MAS(Int, cbf_1)$  est vrai dans  $] - \infty; \min i[$
  - o  $MAS(Int, X cbf_1)$  est vrai s'il existe un intervalle  $t$  tel que  $t$  starts  $]max\ now, +\infty[$  et  $MAS(Int', cbf_1)$  est vrai où  $Int' = Int$  sauf que  $now = t$

Ainsi, le calcul de l'applicabilité d'une norme se fait principalement en comparant *here* et *now* aux régions et intervalles dans lesquels une proposition est vraie.

Une fois les institutions établies, il est nécessaire de décrire les organisations qui vont mettre en œuvre ces institutions, et dans lesquelles les agents vont pouvoir agir.

### 3.3 Les organisations

D'après l'état de l'art sur l'organisation et la synthèse dans 2.3, l'organisation se résume à un aspect structurel d'un SMA caractérisé principalement par les agents, leurs rôles et les relations entre agents. Nous proposons par la suite d'appeler organisation la mise en œuvre d'une institution, et donc de ses normes, comme nous sommes dans le cadre d'un SMA institutionnel.

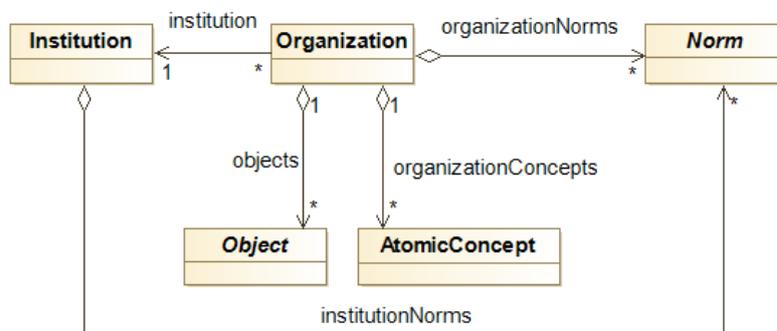


Figure 44 - Méta-modèle de l'organisation

Une institution peut être mise en œuvre par plusieurs organisations. Ainsi, une organisation met en œuvre une institution dans le sens où les concepts et les normes définis dans l'institution sont reconnus et utilisés dans l'organisation, qui doit définir les objets qu'elle utilise par les normes constitutives qui sont l'essentiel des normes dans les organisations (quel objet/agent joue quel rôle) et qui déterminent pour quel concept compte comme quel objet. En outre, il est possible que l'organisation possède d'autres concepts et d'autres normes régulatrices qui lui sont propres.

En prenant l'exemple de l'institution « commune », la « commune d'Antananarivo » est une organisation qui met en œuvre les normes définissant l'institution « commune ». Toutefois, la « commune d'Antananarivo » peut avoir d'autres normes qui lui sont propres. Le méta-modèle de l'organisation est décrit dans la figure 44.

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre a établi la syntaxe abstraite de notre proposition de modèle de SMA institutionnel et de norme à travers les diagrammes de classe représentant tous les concepts mis en jeu dans le modèle et leurs relations. Le concept d'objet désigne un objet physique que l'on peut percevoir dans le monde réel (temps, espace, action, agent, ressource). L'institution est décrite par une ontologie et contient des normes exprimées en fonction des concepts. L'organisation met en œuvre une institution en et définit par les normes constitutives les objets qui comptent comme les concepts dans l'institution. Un agent est libre de s'introduire dans toute organisation, et est soumis aux normes de l'organisation et de l'institution auxquelles il appartient.

Etant donné que notre but est de savoir les normes applicables à un agent situé, la vérification de l'applicabilité des normes nécessite de déterminer le sens d'une expression du langage. Nous avons adopté pour cela une proposition de langage du premier ordre capable d'écrire des faits et des actions dans le socio-écosystème, et dont la vérification se réfère à un instant et à une région quelconques.

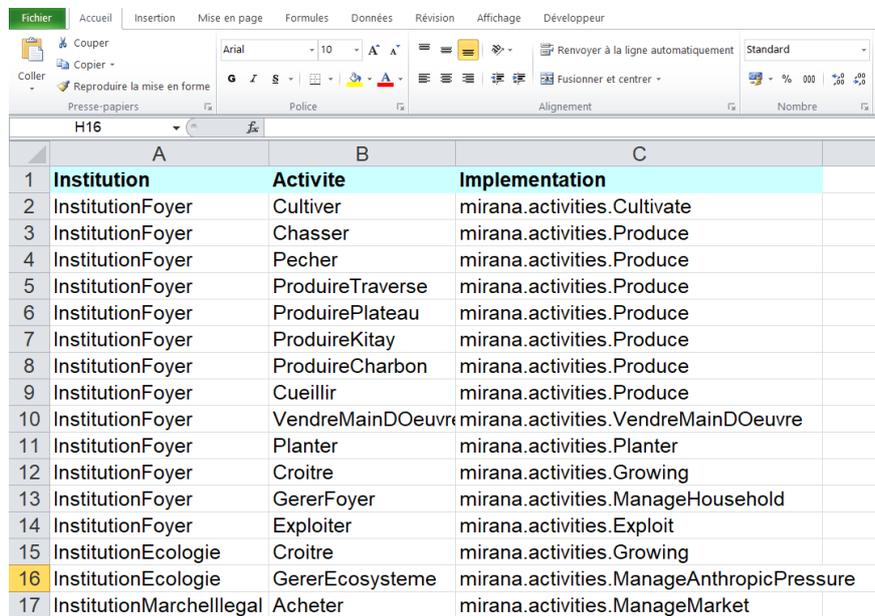
L'application avec le cas de la gestion forestière à Madagascar que nous avons effectuée ainsi que notre proposition de syntaxe concrète qui correspond à cette syntaxe abstraite seront détaillés dans le chapitre suivant.

# Chapitre 4

## IMPLEMENTATION

### 4.1 Cas d'étude : gestion forestière à Madagascar

Le cas modélisé dans la thèse est le système de gestion forestière à Madagascar, le sujet s'intéresse ainsi à informatiser les règlements établis au sein des communautés villageoises, communales, ou au niveau national. La description du modèle consiste globalement la description des objets du domaine du discours, suivi de la description des institutions et des organisations. Nous partons pour cela de données existantes décrites dans un fichier Excel. Les objets initiaux sont des nombres ou des uri, comme dans la figure 45 qui montre des uri de méthodes (java).



	A	B	C
1	<b>Institution</b>	<b>Activite</b>	<b>Implementation</b>
2	InstitutionFoyer	Cultiver	mirana.activities.Cultivate
3	InstitutionFoyer	Chasser	mirana.activities.Produce
4	InstitutionFoyer	Pecher	mirana.activities.Produce
5	InstitutionFoyer	ProduireTraverse	mirana.activities.Produce
6	InstitutionFoyer	ProduirePlateau	mirana.activities.Produce
7	InstitutionFoyer	ProduireKitay	mirana.activities.Produce
8	InstitutionFoyer	ProduireCharbon	mirana.activities.Produce
9	InstitutionFoyer	Cueillir	mirana.activities.Produce
10	InstitutionFoyer	VendreMainDOuvre	mirana.activities.VendreMainDOuvre
11	InstitutionFoyer	Planter	mirana.activities.Planter
12	InstitutionFoyer	Croitre	mirana.activities.Growing
13	InstitutionFoyer	GererFoyer	mirana.activities.ManageHousehold
14	InstitutionFoyer	Exploiter	mirana.activities.Exploit
15	InstitutionEcologie	Croitre	mirana.activities.Growing
16	InstitutionEcologie	GererEcosysteme	mirana.activities.ManageAnthropicPressure
17	InstitutionMarchelllegal	Acheter	mirana.activities.ManageMarket

Figure 45 - Extrait de représentation des données avant notre proposition de modèle de SMA institutionnel

La figure 46 indique par exemple que l'action « cultiver » est représentée par l'objet informatique URI de la méthode java dont voici le package « mirana.activities.Cultivate ».

```

Res methodeCultiver[miranaa.ctivities.Cultivate],
methodeProduire[miranaa.ctivities.Produce],
methodeVendreMainDoeuvre [miranaa.ctivities.VendreMainDoeuvre],
methodePlanter[miranaa.ctivities.Planter],
methodeCroitre[miranaa.ctivities.Growing],
methodeGererFoyer [miranaa.ctivities.ManageHousehold],
methodeExploiter [miranaa.ctivities.Exploit],
methodeGererEcosysteme [uriGererEcosysteme],
methodeAcheter [miranaa.ctivities.ManageMarket],
methodeTaxation[miranaa.ctivities.ManageTaxation],
methodeContractualiser[miranaa.ctivities.ManageContractVOI],
methodeGererPermis [miranaa.ctivities.ManagePermitVOI],
methodeGererVoi [miranaa.ctivities.ManageVOI],
methodeContractualiserAF [miranaa.ctivities.ManageContractFA],
methodeGererPermisCA [miranaa.ctivities.ManagePermitCA],
financeMarais[300000ar], kitayMarais[100kg], planteMedMarais[10kg], plateauMarais[10], poissonMarais[0kg], rizMarais[0kg], traverseMarais[0], viandeMarais[0kg],
financeForet[300000ar], kitayForet[200kg], planteMedForet[10kg], plateauForet[10], poissonForet[0kg], rizForet[300kg], traverseForet[10], viandeForet[50kg],
financeNonAut[0ar], kitayNonAut[0kg], planteMedNonAut[0kg], plateauNonAut[10], poissonNonAut[0kg], rizNonAut[300kg], traverseNonAut[0], viandeNonAut[50kg],
plateauVoi[90], traverseVoi[90], conservationVoi[20ha], controleMarche[10p], controlePatrouille[20p],
rizLeg[25000ar], traverseLeg[315000ar], plateauLeg[610000ar], animEndemLeg[0ar], orLeg[500000ar], quartzLeg[300000ar], planteMedLeg[0ar],
hazomanitraLeg[80000ar], kitayLeg[100000ar], charbonLeg[100000ar], viandeLeg[30000ar], poissonLeg[0ar], plantArbreLeg[100000ar], financeLeg[1ar],
rizilleg[1500ar], traverseilleg[2000000ar], plateauilleg[600000ar], animEndemilleg[100000ar], orilleg[2500000ar],
quartzilleg[1000000ar], planteMedilleg[400000ar], hazomanitrailleg[600000ar], kitayilleg[50000ar], charbonilleg[5000ar], viandeilleg[5000ar],
poissonilleg[20000ar], plantArbreilleg[0ar], financeilleg[1ar], t_rizForet[100ar], t_orForet[0ar], t_traverseForet[400ar], t_plateauForet[400ar],
t_endemForet[0ar], t_quartzForet[0ar], t_centellaForet[200ar], t_hazomanitraForet[200ar], t_kitayForet[0ar], t_charbonForet[200ar],
t_viandeForet[0ar], t_poissonForet[0ar], t_permisUsagerForet[0ar], t_permiExplForet[20000ar], t_permisConcessForet[2000000ar],
t_RizComm[0ar], t_OrComm[0ar], t_traverseComm[400ar], t_plateauComm[400ar], t_endemComm[0ar], t_quartzComm[0ar], t_centellaComm[200ar],
t_hazomanitraComm[200ar], t_kitayComm[0ar], t_charbonComm[200ar], t_viandeComm[0ar], t_poissonComm[0ar],
t_RizVoi[0ar], t_OrVoi[0ar], t_traverseVoi[1000ar], t_plateauVoi[1000ar], t_endemVoi[0ar], t_quartzVoi[0ar], t_centellaVoi[200ar],
t_hazomanitraVoi[200ar], t_kitayVoi[0ar], t_charbonVoi[200ar], t_viandeVoi[0ar], t_poissonVoi[0ar], t_permisUsagerVoi[100ar], t_permisExplVoi[1000ar],
nbViandeVoi[90], nbTraverseVoi[90], nbConservationVoi[20ha], nbControleMarche[10], nbControlePatrouille[20]
Agt favori[], fa[], fbvoi[], fb[], mavoi[], ma[], mbvoi[], mb[], n[], nvoi[], voi[], admfor[], ml[], mml[], a[], b[], eco[], demo[]

```

Figure 46 - Description des objets représentant des URI de méthode correspondant à des actions

Ensuite nous décrivons une à une les institutions et les organisations comme le montre la figure 47.

```

* Inst InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionAdminForet inherits InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionCommune inherits InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionVoi imports InstitutionCommune inherits InstitutionGestionForet {[]
* Inst InstitutionMarcheLegal inherits InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionMarcheIllegal inherits InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionEcologie inherits InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionFoyer inherits InstitutionGestionForet{[]
* Inst InstitutionCoutumiere inherits InstitutionGestionForet{[]
* Org Antontona from InstitutionVoi{[]

```

Figure 47 - Extrait de la liste des institutions et des organisations dans le modèle de la gestion forestière à Madagascar

Nous avons introduit une institution mère nommée InstitutionGestionForet (figure 48) qui possède quelques caractéristiques communes à toutes les institutions, notamment des concepts.

```

Inst InstitutionGestionForet {
  meta:
  ressource, agent, action, mesure, temps, espace
  atom:
  riz:ressource, lor:ressource, arbre:ressource, traverse:ressource,
  plateau:ressource, quartz: ressource, kitay:ressource, charbon:ressource,
  viande:ressource, poisson:ressource, plantArbre:ressource, finance:ressource,
  planteMed:ressource, feuillesHazomanitra:ressource, animalEndem:ressource, membre:agent
}

```

Figure 48 - Modèle d'institution mère de toutes les institutions dans le cas de la gestion forestière à Madagascar

Ensuite chaque institution va hériter de cette institution mère, car chaque institution va réutiliser ces même méta-concepts et concepts, à part les nouveaux concepts qui leur sont propres.

La figure 49 représente un extrait de code montrant les différents types de formalisation des normes dans l'institution Voi. Les normes sur la contractualisation consistent à contractualiser la production de ressource à quelqu'un d'autre, lui déléguant par ce fait un rôle adéquat. Par exemple, la ressource « plateau » peut être passée pour des quantités « nombrePlateauPermis » au prix « prixPlateau » lui déléguant le rôle de « exploitant ».

```

soc-norms:
//Quotas
if[at(zoneDroitU)] then usager permitted [and(exploiter(surface;quotaSurface);exploiter(arbre;quotaArbre);
exploiter(gibier;quotaGibier);exploiter(gibierEau;quotaGibierEau)
)],
if[at(zoneExploit)] then exploitant permitted [exploiter(arbre;quotaArbre)],

//Permissions
if[at (zoneCulture)] then surveillant permitted [controler(surveillant)],
if[at (zoneCulture)] then usager permitted [cultiver(usager)],
if[at (zoneCulture)] then exploitant permitted [cultiver(exploitant)],
if[at (zoneDroitU)] then surveillant permitted [controler(surveillant)],
if[at (zoneDroitU)] then usager permitted [prelever(usager)],
if[at (zoneDroitU)] then conservateur permitted [planter(conservateur)],
if[at (zoneExploit)] then exploitant permitted [prelever(exploitant)],
if[at (zoneExploit)] then surveillant permitted [controler(surveillant)],
if[at (zoneExploit)] then conservateur permitted [planter(conservateur)],
if[at (zoneProtection)] then surveillant permitted [controler(surveillant)],
if[at (zoneTavy)] then surveillant permitted [controler(surveillant)],
if[at (zoneTavy)] then usager permitted [cultiver(usager)],
if[at (zoneDroitU)] then usager permitted [prelever(usager)],
if[at (zoneDroitU)] then exploitant permitted [prelever(exploitant)],

//Contrats
if[signerContrat(membre;conservation;prixConservation)] then membre permitted [and(planter(membre;nombreConservationPermis);membre::conservateur)],

if[signerContrat(membre;plateau;prixPlateau)]
then membre permitted [and(prelever(membre;nombrePlateauPermis); membre::exploitant)],

if[signerContrat(membre;traverse;prixTraverse)]
then membre permitted [and(prelever(membre;nombreTraversePermis); membre::exploitant)],

if[signerContrat(membre;controleMarche;prixControleMarche)]
then membre permitted [and(prelever(membre;nombreControleMarchePermis); membre::surveillant)],

if[signerContrat(membre;controlePatrouille;prixControlePatrouille)]
then membre permitted [and(prelever(membre;nombreControlePatrouillePermis); membre::surveillant)],

if[signerContrat(membre;conservation;prixConservation)]
then gestionnaire obligated [and(taxer(gestionnaire);gererVoi(gestionnaire);gererPermis(gestionnaire))],

if[membre::contrevenant] then membre permitted [and(taxer(traverse; amendeTraverse);taxer(plateau; amendePlateau))]

```

Figure 49 - Extrait des normes dans l'institution Voi

```

Org Antontona from InstitutionVoi{
  const-norms:
    favoi=membre,
    fbvoi=membre,
    mavoi=membre,
    mbvoi=membre,
    nvoi=membre,
    voi=gestionnaire,
    methodeTaxer = taxer,
    methodeContractualiser=contractualiser,
    methodeGererPermis=gererPermis,
    methodeGererVoi = gererVoi,
    t_rizVoi=taxeRiz,
    t_orVoi=taxeOr,
    t_traverseVoi=taxeTraverse,
    t_plateauVoi=taxePlateau,
    t_endemVoi=taxeEspEndemCom,
    t_quartzVoi=taxeQuartz,
    t_centellaVoi=taxeCentella,
    t_hazomanitraVoi=taxeHazomanitra,
    t_charbonVoi=taxeCharbon,
    t_viandeVoi=taxeViande,
    t_poissonVoi=taxePoisson,
    nbViandeVoi=nombreViandePermis,
    nbTraverseVoi=nombreTraversePermis,
    nbConservationVoi=nombreConservationPermis,
    nbControleMarche=nombreControleMarchePermis,
    nbControlePatrouille=nombreControlePatrouillePermis,
    qSurfacAnt=quotaSurface,
    qArbreAnt=quotaArbre,
    qGibierAnt=quotaGibier,
    qGibierEauAnt=quotaGibierEau

```

Figure 50 - Des normes constitutives dans une organisation Voi

Une organisation de type Voi définit par conséquent les objets représentant les concepts utilisés ci-dessus, comme le montre la figure 50. Les institutions marché légal et marché illégal se caractérisent particulièrement par la description de prix comme le montre la figure 51 qui décrit des organisations de type marché légal et marché illégal.

```

Org MarcheLegal from InstitutionMarcheLegal{
  const-norms:
    ml=gestionnaire,
    methodeAcheter=acheter,
    rizLeg=prixRiz,
    traverseLeg=prixTraverse,
    plateauLeg=prixPlateau,
    animEndemLeg=prixAnimEndemique,
    orLeg=prixOr,
    quartzLeg=prixQuartz,
    planteMedLeg=prixPlanteMedicinale,
    hazomanitraLeg=prixFeuillesHazomanitra,
    kitayLeg=prixKitay,
    charbonLeg=prixCharbon,
    viandeLeg=prixViande,
    poissonLeg=prixPoisson,
    plantArbreLeg=prixPlantArbre,
    financeLeg=prixFinance
}
Org MarcheIllegal from InstitutionMarcheIllegal{
  const-norms:
    mnl=gestionnaire,
    methodeAcheter=acheter,
    rizIlleg=prixRiz,
    traverseIlleg=prixTraverse,
    plateauIlleg=prixPlateau,
    animEndemIlleg=prixAnimEndemique,
    orIlleg=prixOr,
    quartzIlleg=prixQuartz,
    planteMedIlleg=prixPlanteMedicinale,
    hazomanitraIlleg=prixFeuillesHazomanitra,
    kitayIlleg=prixKitay,
    charbonIlleg=prixCharbon,
    viandeIlleg=prixViande,
    poissonIlleg=prixPoisson,
    plantArbreIlleg=prixPlantArbre,
    financeIlleg=prixFinance
}

```

Figure 51 - Organisations "marché légal" et "marché illégal"

```

Inst InstitutionEcologie imports InstitutionFoyer inherits InstitutionGestionForet {
  atom:
    ecologue : agent, territoire : espace, habitat : espace, riviere :espace,
    minerai :espace, faune : ressource, flore : ressource, ressourceSol : ressource,
    ecologue :agent, croitre :action, gererEcosysteme :action,foyer : espace,
    tauxcroissance_babakoto :mesure,tauxcroissance_amalona :mesure,tauxcroissance_omby :mesure,
    tauxcroissance_rotra :mesure,tauxcroissance_varongy :mesure,tauxcroissance_hazomanitra :mesure,
    tauxcroissance_centella :mesure,tauxcroissance_fertilite :mesure,membre:agent

  indiv:
    babakoto::faune, amalona :: faune, omby :: faune, rotra :: flore, varongy ::faune,
    hazomanitra :: flore,centella :: flore, mineraiOr :: ressourceSol,mineraiQuartz :: ressourceSol,
    fertilite :: ressourceSol

  //Aobligations
  soc-norms:
    if[membre::ecologue] then ecologue obligated [and(croitre(ecologue); gererEcosysteme(ecologue))]
}

```

Figure 52 - Structure de l'institution "écologie"

L'institution écologie (figure 52) définit des concepts individuels particuliers dont la faune et la flore et des

obligations de l'écologue qui caractérisent généralement l'écologie.

L'institution foyer se distingue de la multiplicité des concepts décrivant les différents rôles pouvant être pris par les agents (marais, non autochtone, forêt, démographe, etc.) et les différentes valeurs relatives aux quantités de ressources que ces rôles doivent produire et aux quantités de ressources qu'il est possible de transporter à pied. La figure 53 représente un extrait des normes constitutives reliant certains concepts de l'institution foyer et les concepts des autres institutions

```
const-norms:
gibier = InstitutionEcologie.babakoto,
gibierEau = InstitutionEcologie.amalona,
kitay = InstitutionEcologie.rotra,
arbre=InstitutionEcologie.rotra,
arbre=InstitutionEcologie.varongy,
planteMedicinale=InstitutionEcologie.hazomanitra,
planteMedicinale=InstitutionEcologie.centella,
fertilité=InstitutionEcologie.fertilité,
mineraiOr=InstitutionEcologie.mineraiOr,
mineraiQuartz=InstitutionEcologie.mineraiQuartz,
riz=InstitutionMarcheLegal.riz,
riz=InstitutionMarcheIllegal.riz,
viande=InstitutionMarcheLegal.viande,
viande=InstitutionMarcheIllegal.viande,
traverse=InstitutionMarcheLegal.traverse,
traverse=InstitutionMarcheIllegal.traverse,
plateau=InstitutionMarcheLegal.plateau,
plateau=InstitutionMarcheLegal.plateau,
lor=InstitutionMarcheLegal.lor,
lor=InstitutionMarcheIllegal.lor,
quartz=InstitutionMarcheLegal.quartz,
quartz=InstitutionMarcheIllegal.quartz,
usager=InstitutionVoi.usager,
exploitant=InstitutionVoi.exploitant,
contrevenant=InstitutionVoi.contrevenant,
produireTraverse=InstitutionVoi.prelever,
produirePlateau=InstitutionVoi.prelever,
produireKitay=InstitutionVoi.prelever,
produireCharbon=InstitutionVoi.prelever,
chasser=InstitutionVoi.prelever,
pecher=InstitutionVoi.prelever,
cueillir=InstitutionVoi.prelever,
usager=InstitutionCoutumiere.exploitant,
exploitant=InstitutionCoutumiere.exploitant,
produireTraverse=InstitutionCoutumiere.prelever,
produirePlateau=InstitutionCoutumiere.prelever,
produireKitay=InstitutionCoutumiere.prelever,
produireCharbon=InstitutionCoutumiere.prelever,
chasser=InstitutionCoutumiere.prelever,
pecher=InstitutionCoutumiere.prelever,
cueillir=InstitutionCoutumiere.prelever,
```

Figure 53 - Normes constitutives montrant les correspondances entre concepts de différentes institutions

Les normes sont ici relatives aux rôles des agents comme le montre la figure 54. Les institutions commune et administration forestière consistent surtout à définir des taxes dont les valeurs sont fixées dans les organisations (figure 55). Les normes dans l'institution coutumière sont décrites dans la figure 56. Ainsi, les organisations sont décrites simplement par les normes constitutives qui font correspondre les objets aux concepts.

```

soc-norms:
if[membre::marais] then membre obligated [and(produire(membre;finance;quantiteFinanceMarais) ;
produireKitay(membre; kitay;quantiteKitayMarais) ;
produire(membre;planteMedicinale;quantitePMedicinaleMarais) ;
produirePlateau(membre;plateau;quantitePlateauMarais) ;
produire(membre;poisson;quantitePoissonMarais) ;
produire(membre;riz;quantiteRizMarais) ;
produireTraverse(membre;traverse;quantiteTraverseMarais) ;
produire(membre;viande;quantiteViandeMarais))],
if[membre::foret] then membre obligated [and(produire(membre;finance;quantiteFinanceForet) ;
produire(membre;kitay;quantiteKitayForet) ;
produire(membre;planteMedicinale;quantitePMedicinaleForet) ;
produire(membre;plateau;quantitePlateauForet) ;
produire(membre;poisson;quantitePoissonForet) ;
produire(membre;riz;quantiteRizForet) ;
produire(membre;traverse;quantiteTraverseForet) ;
produire(membre;viande;quantiteViandeForet))],
if[membre::nonAutochtone] then membre obligated [and(produire(membre;finance;quantiteFinanceNonAutoc) ;
produire(membre;kitay;quantiteKitayNonAutoc) ;
produire(membre;planteMedicinale;quantitePMedicinaleNonAutoc) ;
produire(membre;plateau;quantitePlateauNonAutoc) ;
produire(membre;poisson;quantitePoissonNonAutoc) ;
produire(membre;riz;quantiteRizNonAutoc) ;
produire(membre;traverse;quantiteTraverseNonAutoc) ;
produire(membre;viande;quantiteViandeNonAutoc))],

```

Figure 54 - Les normes dans l'institution "foyer"

```

Org Commune from InstitutionCommune{
const-norms:
methodeTaxation=taxer,
t_rizComm=taxeRiz,
t_orComm=taxeOr,
t_traverseComm=taxeTraverse,
t_plateauComm=taxePlateau,
t_endemComm=taxeEspEndemCom,
t_quartzComm=taxeQuartz,
t_centellaComm=taxeCentella,
t_hazomanitraComm=taxeHazomanitra,
t_charbonComm=taxeCharbon,
t_viandeComm=taxeViande,
t_poissonComm=taxePoisson
}

Org AdmForestiere from InstitutionAdministrationForestiere{
const-norms:
admfor=gestionnaire,
methodeTaxation=taxer,
methodeContractualiserAF= contractualiserAF,
t_rizForet=taxeRiz,
t_orForet=taxeOr,
t_traverseForet=taxeTraverse,
t_plateauForet=taxePlateau,
t_endemForet=taxeEspEndemCom,
t_quartzForet=taxeQuartz,
t_centellaForet=taxeCentella,
t_hazomanitraForet=taxeHazomanitra,
t_charbonForet=taxeCharbon,
t_viandeForet=taxeViande,
t_poissonForet=taxePoisson,
t_permisUsagerForet=taxeUsager,
t_permiExplForet=taxeExploitant,
t_permisConcessForet=taxeConcess,
}

```

Figure 55 - Description des organisations "commune" et "AdmForestiere"

```

soc-norms:
if[at (zoneDroitU)] then usager permitted [prelever(usager)],
if[at (zoneDroitU)] then exploitant permitted [prelever(exploitant)],
if[membre::gestionnaire] then gestionnaire obligated [gererPermis(gestionnaire)]

```

Figure 56 - Les normes dans l'institution "coutumière"

Les agents sont représentés par l'ensemble de la population habitant à Madagascar qui est défini dans le modèle, ces populations sont nommées dans le modèle : *eco*, *demo*, *adm-for*, *f-a-voi*, *f-a*, *f-b-voi*, *f-b*, *m-a-voi*, *m-a*, *m-b-voi*, *m-b*, *n*, *n-voi*, *voi*, *ml*, *mnl*, *a* et *b*. Nous avons créé un agent pour chaque type de population décrit dans le fichier Excel de description du système, et nous pouvons constater par exemple dans la figure 57 qu'un agent *f-a-voi* qui est nommé dans le code « favoi » a pour rôle « foret » dans une organisation de type Foyer, et a pour rôle « membre » dans une autre organisation coutumière.

```

Org A from InstitutionCoutmiere{
  const-norms:
    favoi=membre,
    fa=membre,
    mavoi=membre,
    ma=membre,
    methodeGererPermis=gererPermis
}
Org Foyer from InstitutionFoyer{
  const-norms:
    favoi=foret,
    fa=foret,
    fbvoi=foret,
    fb=foret,
    mavoi=marais,
    ma=marais,
    mbvoi=marais,
    mb=marais,
    n=nonautochtone,
    nvoi=nonautochtone,
    demo=demographe,
    methodeCultiver=cultiver,
    methodeProduire=chasser,
    methodeVendreMainDOeuvre = vendreMainDOeuvre,
    methodePlanter = planter,
    methodeCroitre = croitre,
    methodeGererFoyer = gererFoyer,
    methodeExploiter = exploiter
}

```

Figure 57 - Description d'organisations relatives aux institutions coutumière et foyer.

En effet, chaque personne peut appartenir en même temps à un foyer et y jouer un certain rôle (ex : père de famille dans son foyer), à une commune (ex : le secrétaire de la commune), à une coutume (celle de sa région), etc.

Bref, les organisations dans le système de gestion forestière à Madagascar sont :

- Les foyers : la plupart des règles qui gèrent les foyers ne sont pas écrites mais sont reconnues depuis le temps.  
Exemple : soit un foyer dont Rakoto est le père de famille, Rasoa la mère de famille, et Koto leur fils.
- Les marchés légaux : des règles existent sur ce que doivent faire les vendeurs et les acheteurs, et chaque marché peut avoir ses propres règles  
Exemple : le marché d'Andravoahangy
- Les marchés illégaux
- Toutes les communes à Madagascar
- Toutes les administrations forestières à Madagascar : comme les communes et les régions, les administrations forestières sont soumises à lois imposées par l'Etat, mais en outre il peut y avoir des lois particulières qui ont été mises en place localement.

- Les coutumes pour chaque région : les règles ne sont pas souvent formalisées, mais sont reconnues depuis le temps

## 4.2 Syntaxe concrète

Notre proposition de langage de description de modèle de SMA institutionnel permet : soit de décrire textuellement les institutions et les organisations dans un SMA à travers un fichier de description, soit d'afficher les normes applicables pour un agent socialement, spatialement et temporellement situé en mettant en paramètres les coordonnées spatiales et temporelles de l'agent en question. L'implémentation de ce langage nécessite d'établir dans un premier temps la structure des institutions et des normes, ensuite de définir des organisations qui utilisent ces institutions dans une deuxième partie ainsi que les normes propres à ces organisations et surtout les normes constitutives dans lesquelles des concepts (de rôle) peuvent définir des agents.

Ci-dessous la règle EBNF pour la description d'un modèle avec notre langage dédié :

```

Model = « Model » « { »
    [ « Pol » « : » SurfacePolygon { « , » SurfacePolygon } ]
    [ « Int » « : » Interval { « , » Interval } ]
    [ « Res » « : » Resource { « , » Resource } ]
    [ « Agt » « : » Agent { « , » Agent } ]
    { Institution }
    { Organization }
« } »

```

### 4.2.1 Le domaine de discours

Le domaine de discours est constitué d'objets, et un objet peut représenter une ressource, un agent, le temps, l'espace, ou une relation. Ci-dessous la règle EBNF pour la description d'un Objet du domaine de discours:

*Object = SituatedObject | Space | Time | Action | Relation*

*SituatedObject = Agent | Resource*

```

Agent = Name « [ »
    [ « uri » « = » STRING ]
    [ « time » « = » Time ]
    [ « loc » « = » Space ]
« ] »
Resource = Name « [ »
    [ Measure ]
    [ « uri » « = » STRING ]
    [ « time » « = » Time ]
    [ « loc » « = » Space ]
« ] »

```

« ] »

*Measure = Multitude | Magnitude*

*Multitude* = INT Unity  
*Unity* = STRING  
*Magnitude* =INT  
*Space* =Point / SurfacePolygon  
*Point* =Name «(» INT «:» INT «)»  
*SurfacePolygon* = Name «(» Point { «;»Point} «)»  
*Time* = Interval / Instant  
*Interval* = «[» Instant «;» Instant «]»  
*Instant* = INT «:» INT «:» INT «:» INT «:» INT «:» INT

Le domaine de discours est décrit par les objets qui s’y trouvent. Dans la figure suivante nous avons une liste de points *A,B,C,D,E*, et *F* avec leurs coordonnées respectives, deux polygones *surfaceAnkatso* et *villa\_Paul*, les intervalles précédés du mot-clé « int », les ressources et des agents situés (spatialement et temporellement) ou non. Un agent est donc un objet particulier. Nous pouvons voir la liste des objets dans la première partie du fichier de description dans la figure 58.

```

LangageInstitution.mydsl x
Model{
  Pol Ankatso(A(458:5620);B(823:4585);C(100:360)),Ambato(D(1001:2200);E(3527:2037);F(3452:4256);G(1456:4352))
  Int fete_nationale[25:06:00:00:11:11;27:06:00:59:11:45],noel[25:12:00:00:00:54;25:12:23:59:00:85]
  Res cocotier_A[uri:cocotierA;fete_nationale:Ankatso],cocotier_B[10m],quantite_arbre[25;Ankatso],tilapia[12kg;Ambato]
  Agt Paul[uri:Paul;fete_nationale;Ambato],Marie[uri:Marie;fete_nationale;Ankatso]
  Inst village {
    meta :
      temps, ressource, mesure, agent, espace, action
    atom:
      foret:ressource, nourriture:ressource, poisson:ressource, viande:ressource,
      riz:ressource, legume:ressource, fruit:ressource, surfaceCultivable:espace, chef:agent,
      pecher:action, travailler:action, animal:ressource, vegetal:ressource,villageois:agent,
      zone_reserve:espace, soir:temps,lac:espace,fete_village:temps,vendre:action,
      jour:temps,weekend:temps,marche:espace,controler:action,
      kitay:ressource, charbon:ressource,produire:action,zone_village:espace
    indiv:
      chef_village::chef, samedi::jour, dimanche::jour, poisson::animal, viande::animal,
      riz::vegetal, legume::vegetal, fruit::vegetal
    categ:
      ressources = union(animal;vegetal)
    soc-norms:
      if[or(in(dimanche);in(after-soir))] then villageois prohibited [and(pecher(villageois;lac):travailler(villageois))],
      if[at(zone_village)] then villageois permitted [xor(produire(kitay);produire(charbon))]
  }
  Inst commune inherits village {
  Inst foyer imports commune {
  Inst parc{
  Org chez_Paul from foyer {
  Org parcTana from parc{
}
  
```

Figure 58 - Structure générale du fichier de description d'un exemple de système multi-agent institutionnel

L’outil que nous avons créé est un utilitaire permettant de décrire textuellement un SMA institutionnel à partir des institutions et des organisations, sur la base du modèle que nous avons proposé, et d’afficher à un instant précis (date et heure exacte), à un lieu précis (coordonnées dans la totalité de la région étudiée) comme le montre la figure 59, les normes applicables à un agent existant dans le système. Le but est de faire promener un agent dans un paysage multi-institutionnel prédéfini, dans le temps et dans l’espace, et d’observer les normes applicables à un agent en fonction de ces paramètres. L’intérêt de ce prototype est de pouvoir utiliser ce module ainsi que la logique correspondante dans l’étude de la prise de décision d’agent soumis à des normes.

The image shows a 'New File' dialog box with the following fields and annotations:

- Folder:** Application (with a 'Browse...' button)
- Name:** Essai
- Abscisse:** 2000 (circled in red, with an arrow pointing to it from the text « here »)
- Ordonnée:** 3000
- Coordonnées temporelles:** 4:4:2:0:0:0 (circled in red, with an arrow pointing to it from the text « now »)
- Nom de l'agent:** Paul (dropdown menu)

At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Next >', 'Finish', and 'Cancel'. A help icon (?) is also present.

Figure 59 - Paramètres pour le calcul des normes applicables

## 4.2.2 Les institutions

Une institution peut hériter de toutes les propriétés d'une institution mère via le mot « inherits », et peut importer les concepts d'une autre institution via le mot « imports ». Ci-dessous les règles EBNF pour une institution :

*Institution* =

```

« Inst » Name [« imports » Institution] [« inherits » Institution] « { »
[« meta » « : » Metaconcept { « , » Metaconcept } ]
[« atom » « : » AtomicConcept { « , » AtomicConcept } ]
[« indiv » « : » IndividualConcept { « , » IndividualConcept } ]
[« categ » « : » CategoryConcept { « , » CategoryConcept } ]
[« const-norms » « : » ConstitutiveNorm { « , » ConstitutiveNorm } ]
[« soc-norms » « : » SocialNorm { « , » SocialNorm } ]
« } »

```

L' institution commune dans la figure 60 qui hérite de l' institution village hérite donc automatiquement des méta-concepts, des concepts et des normes de l' institution village. Nous constatons que cette institution définit en outre d' autres concepts et normes qui lui sont particuliers, dont des concepts atomiques et des

concepts catégoriques basés sur les concepts atomiques.

```

Inst commune inherits village {
  meta:
  relation
  atom:
  maire:agent, secretaire:agent, exploitant:agent, taxe:ressource, impot:ressource,
  fonctionnaire:agent,agent_communal:agent, zone_communale:espace,taxer:action,
  jour_ferie:temps,construire:action, personne:agent, permis:ressource,quota_surface:mesure,
  quota_arbre:mesure, quota_gibier:mesure, amende_surface:mesure,amende_arbre:mesure,
  amende_gibier:mesure,quantite_arbre:mesure,exploiter:action,arbre:ressource,
  surfaceCultivable:espace,couper:action,fruit:ressource,paysage:ressource,
  poisson:ressource,surface_permise:mesure,parc:espace,ordonner:relation
  soc-norms:
  if[or(at(zone_communale);at(EC-zone_communale);at(inter_s-zone_communale))] then maire permitted[ordonner(maire;agent_communal)],
  if[and(exploiter(exploitant;arbre;quantite_arbre);quantite_arbre > quota_arbre)] then agent_communal
    obligated [taxer(agent_communal;exploitant;quantite_arbre;amende_arbre)],
  if[or(arbre::fruit;at(EC-parc))] then exploitant prohibited [couper(exploitant;arbre)]
}

```

Figure 60 - Description de l'institution "commune"

```

Inst foyer imports commune {
  atom:
  pere:agent, mere:agent, enfant:agent, revenu:ressource, pecher:action,
  chasser:action, couper:action, membre:agent, nourriture:ressource,
  travailler:action, soir:temps, jour:temps, planter:action,construire:action,
  zone_vide:espace,arbre:ressource, lac:espace, personne:agent,
  maison:ressource, revenu_moyen:mesure
  indiv:
  samedi::jour, dimanche::jour
  categ:
  marier(pere-mere),
  ressource_famille = all nourriture(famille),
  weekend = {samedi; dimanche},
  famille = union(pere; mere; enfant),|
  adulte = not(enfant),
  parents = union(pere;mere),
  fond = revenu(parents)
  const-norms:
  CC pere = commune.villageois,
  CC mere = commune.villageois,
  CC enfant = commune.villageois,
  CC membre = commune.villageois
  soc-norms:
  if[not(at(zone_vide))] then famille prohibited [planter(arbre)],
  if[or(zone_vide EC lac;zone_vide TPP lac)] then adulte obligated [planter(arbre;adulte;zone_vide)],
  if[marier(pere-mere)] then mere permitted [travailler(soir)],
  if[until(planter(famille;arbre);construire(famille;maison))] then famille permitted [couper(arbre)],
  if[X revenu<revenu_moyen] then adulte permitted [pecher(lac)],
  if[at(zone_vide)] then pere permitted [planter(arbre)]
}
Inst parc{
  meta:
  personne,etat,espace,action,ressource, temps
  atom:
  citoyen:personne, montagne:espace, planter:action, arbre:ressource,
  jour_ferie:temps, visiter:action, lac:espace, pecher:action
  soc-norms:
  if[at(montagne)] then citoyen prohibited[planter(arbre)],
  if[in(jour_ferie)] then citoyen permitted [pecher(lac)]
}

```

Figure 61 - Description des institutions «foyer» et «parc»

L'institution foyer dans la figure 61 qui importe l'institution commune reconnaît donc tous les concepts de l'institution commune, et pourra les utiliser à sa façon.

### 4.2.3 Les organisations

L'organisation consiste principalement à mettre en œuvre une institution, et définit une liste de normes constitutives, et éventuellement de nouvelles normes qui lui sont propres. La syntaxe EBNF de l'organisation est la suivante.

```

Organization = « Org » Name « from » Institution «{»
  [«const-norms» «:» ConstitutiveNorm {«,» ConstitutiveNorm}]
  [ «actions» «:» Action {«,» Action }]
  [ «relations» «:» Relation {«,» Relation }]
  [«soc-norms» «:» SocialNorm {«,» SocialNorm }]
« } »
Action = Atomicconcept «(» Object {«,» Object} «)» «=»
  «[»[SurfacePolygon] «;» [Interval] «]»
Relation = RelationConcept «(» Object «-» Object «)» «=»
  «[»[SurfacePolygon] «;» [Interval] «]»

```

Ci-dessous un exemple d'application de cette syntaxe :

```

Org chez_Paul from foyer {
  const-norms:
    OC Paul=pere,
    OC Marie=mere,
    OC tilapia=nourriture,
    OC cocotier_A = nourriture,
    OC cocotier_B = nourriture,
    OC Ambato = zone_vide,
    OC fete_nationale = samedi,
    OC fete_nationale = jour_ferie
  relations:
    marier(Paul-Marie)=[Ambato;fete_nationale]
  soc-norms:
    if[in(jour_ferie)] then agent_communal prohibited [taxer(exploitant)]
}
Org parcTana from parc{
  const-norms:
    OC Paul=citoyen,
    OC Marie=citoyen,
    OC Ambato=montagne,
    OC fete_nationale=jour_ferie
}

```

Figure 62 - Description des organisations

Les normes constitutives dans le bloc « const-norms » définissent les concepts atomiques correspondant aux objets dont les actions, les objets situés, et les agents. Dans cet exemple, nous constatons que l'agent Paul appartient à deux organisations, et y tient des rôles différents. Si l'objet cocotier\_A compte comme un arbre pour l'organisation Commune\_Ankatso, nous pouvons remarquer qu'il compte comme de la nourriture pour l'organisation chez\_Paul. La relation définie dans l'organisation « chez\_Paul » indique que « Paul » et « Marie » sont reliés par la relation « marier », l'absence de région et d'intervalle indique que cette relation est vraie pour tous les intervalles de temps (« always ») et pour toutes les régions (« everywhere ») du système. Par contre, l'action définie dans l'organisation « Commune\_Ankatso » précise que l'action « couper » ayant pour paramètre « Paul » et « cocotier\_A est vraie seulement dans la région « sufaceAnkatso » et durant l'intervalle « noel ».

Les contraintes sur le méta-modèle concernent surtout la vérification des types de concept avant de les utiliser dans les expressions, comme le montre la figure 63 dans laquelle on vérifie que le concept atomique a

pour méta-concept « *temps* » avant d’instancier l’expression temporelle qui l’utilise.

```
class SimpleTExpression extends TemporalExpression
{
    property atomicconcept : Atomicconcept[1];
    invariant typeconcept: atomicconcept.meta.name='temps';
}
```

Figure 63 - Contrainte OCL pour l'expression de temps

#### 4.2.4 Les méta-concepts et les concepts

Les méta-concepts sont cités après le mot « meta », les concepts atomiques sont définis par leur nom suivi d’un « : » et du méta-concept auquel il appartient (ex : jour qui est un concept de temps, semaine qui est un concept de temps, région qui est un concept d’espace, etc.), chaque concept individuel est décrit par son nom suivi de « :: » et du concept atomique qui représente la catégorie à laquelle il appartient (ex : « riz\_blanc » qui est une catégorie de riz). Les concepts catégoriques peuvent avoir différentes formes selon qu’il s’agisse de concept d’énumération, de concept complémentaire, ou autre etc.

*Metaconcept* = *Name*

*Name* = *STRING*

*AtomicConcept* = *Name* «:» *Metaconcept*

*IndividualConcept* = *Name* «:» «:» *AtomicConcept*

*CategoryConcept* = *AtomicConcept* | *EnumerationConcept* | *ComplementaryConcept* | *ComposedConcept* | *RelationConcept* | *QualifiedConcept* | *FunctionConcept*

*EnumerationConcept* = «{» *IndividualConcept* {«,» *IndividualConcept* } «}»

*Complementaryconcept* = «not» «(» *Categoryconcept* «)»

*ComposedConcept* = *Name* «=» *ConceptOperator* «(» *CategoryConcept* {«,»*CategoryConcept*} «)»

*ConceptOperator* = « union » | « intersection »

*RelationConcept* = *Name* «(» *CategoryConcept* «-» *CategoryConcept* «)»

*QualifiedConcept* = *Name* «=» *QualificationOperator* *AtomicConcept* «(» *CategoryConcept* «)»

*QualificationOperator* = « all » | « exist »

*FunctionConcept* = *Name* «=» *AtomicConcept* «(» *CategoryConcept* «)»

#### 4.2.5 Les normes constitutives

D’après 3.2.2.2.3, la norme constitutive consiste à faire correspondre soit un objet à un concept dans une organisation, soit un concept d’une institution à un autre concept d’une autre institution.

*ConstitutiveNorm* = *Instconstnorm* | *Orgconstnorm*

*Instconstnorm* = «CC» *AtomicConcept* «=» *Name* «.» *Name*

*Orgconstnorm* = «OC» *Object* «=» *AtomicConcept* (Cette forme qui utilise les objets n’existe que dans une organisation)

## 4.2.6 Les normes

La norme est décrite sous la forme :

$$if[Condition]then[attribute][deontic][aim]$$

et la syntaxe EBNF est décrite comme suit :

*SocialNorm* = «If» «[» *Expression* «]» «then» [*AtomicConcept DeonticModality*] «[» *Expression* «]»

*DeonticModality* = «permitted » | «prohibited » | «obligated »

*Expression* = *SimpleExpression* | *NegationExpression* | *BinaryExpression* | *UExpression* | *XExpression*

*SimpleExpression* = *TemporalExpression* | *SpatialExpression* | *ActionExpression* | *FactExpression*

*TemporalExpression* = «in» «(» *UnaryTEExpression* «)» | «in» «(» *SimpleTEExpression* «)» |

*BinaryTEExpression*

*UnaryTEExpression* = *UnaryTModality* «-» *AtomicConcept*

*UnaryTModality* = «before» | «after» | «meets\_before» | «meets\_after»

*SimpleTEExpression* = *CategoryConcept*

*BinaryTEExpression* = *CategoryConcept BooleanTOperator CategoryConcept*

*BooleanTOperator* = «before » | «after » | «meets\_before » | «meets\_after » | «overlaps » | «

*overlaps\_i »* | «starts| «starts\_i | «during » | «during\_i » | «finishes » | «finishes\_i »

*SpatialExpression* = «at» «(» *UnarySEExpression* «)» | «at» «(» *SimpleSEExpression* «)» |

*BinarySEExpression*

*UnarySEExpression* = *UnarySModality* «-» *AtomicConcept*

*UnarySModality* = «EC » | «DC »

*SimpleSEExpression* = *CategoryConcept*

*BinarySEExpression* = *CategoryConcept BooleanSOperator CategoryConcept*

*BooleanSOperator* = «EC » | «DC » | «TPP » | «NTPP » | «PO » | «TPPi » | «NTPPi »

*ActionExpression* = *AtomicConcept* «(» *CategoryConcept* {«,» *CategoryConcept*} «) »

*FactExpression* = *RelationExpression* | *CategoryExpression* | *ComparisonExpression*

*RelationExpression* = *AtomicConcept* «(» *CategoryConcept* «-» *CategoryConcept* «)»

*CategoryExpression* = *AtomicConcept* « :: » *CategoryConcept*

*ComparisonExpression* = *AtomicConcept* *ComparisonOperator* *AtomicConcept*

*ComparisonOperator* = «<» | «=» | «>»

*NegationExpression* = «not» «(» *Expression* «)»

*BinaryExpression* = *BooleanOperator* «(» *SimpleExpression* {«;» *SimpleExpression* } «)»

*BooleanOperator* = «or» | «and» | «xor»

*UExpression* = «until» «(» *Expression* «;» *Expression* «)»

*XExpression* = «X» *Expression*

Afin de savoir si une norme est applicable ou non à un agent, il convient de vérifier l'attribut et les conditions de la norme.

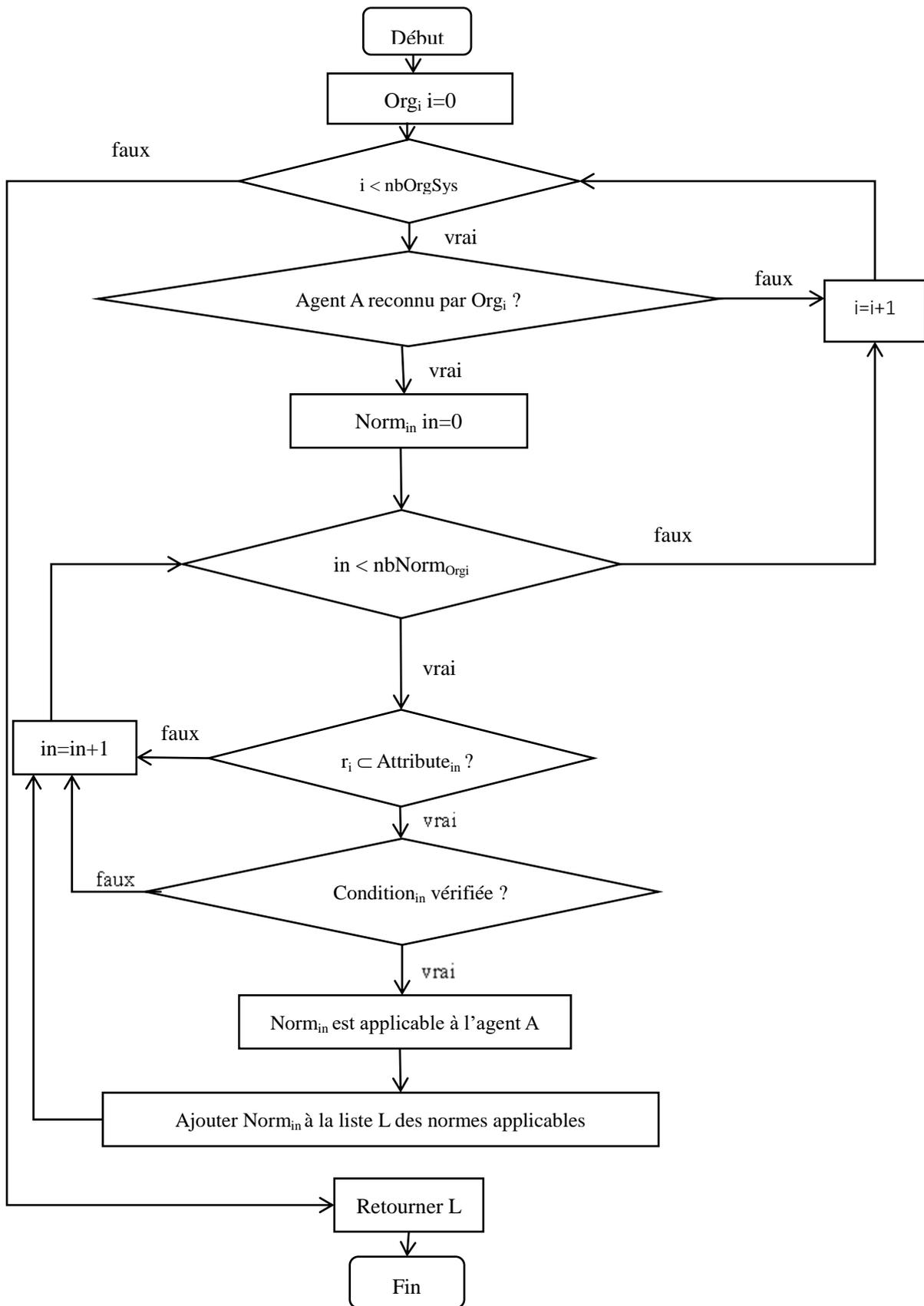


Figure 64 - Algorithme d'obtention de la liste des normes applicables à un agent

Supposons que nous avons un agent  $A$  qui appartient à des organisations  $Org_i, 0 < i < nbOrg_A$ , pour chaque organisation  $Org_i$  on a des normes  $N_{in}$  telle que :

$$N_{in} = \text{if}[Condition_{in}] \text{then } [Deontic_{in}][Aim_{in}][Attribute_{in}]$$

avec  $0 \leq in < \text{nombreNormes}$

Supposons que :

- $here = (x_{here}; y_{here})$  définit la région « here »
- $now = [min\ now; max\ now]$  définit l'intervalle « now »

La question qui se pose est de savoir, à quelles normes est soumis l'agent  $A$  qui appartient aux organisations  $Org_i$  ( $0 \leq i < nbOrg_A$ ) et qui y tient le rôle  $r_i$ , aux coordonnées  $(x, y)$  et durant l'intervalle  $int = [min\ int, max\ int]$ ?

L'algorithme correspondant est décrit dans la figure 64. Ainsi, on obtient la liste  $L$  des normes applicables en vérifiant la sémantique des normes des organisations et celles des institutions.

On remarque après des tests que des conflits peuvent exister entre les normes. En effet, un agent peut appartenir à plusieurs organisations et ainsi être soumis aux normes qu'elles contiennent, et au final, à un certain moment et à un certain endroit, être soumis à des normes contradictoires comme le montre la figure 65, ce qui soulève la question de gestion de conflits entre institutions qui n'est pas étudiée dans cette thèse.

```

LangageInstitution.mydsl  Essai.txt x
Les normes applicables à l agent Paul sont
if[at(zone_vide)] then pere permitted [planter(arbre)],
if[at(montagne)] then citoyen prohibited[planter(arbre)]
  
```

Figure 65 - Exemple d'obtention de liste de normes applicables

Prenons un exemple de norme :

« Il est interdit aux exploitants de pêcher pendant la période de pêche et en été dans toute zone déconnectée au parc s'ils sont cultivateurs. »

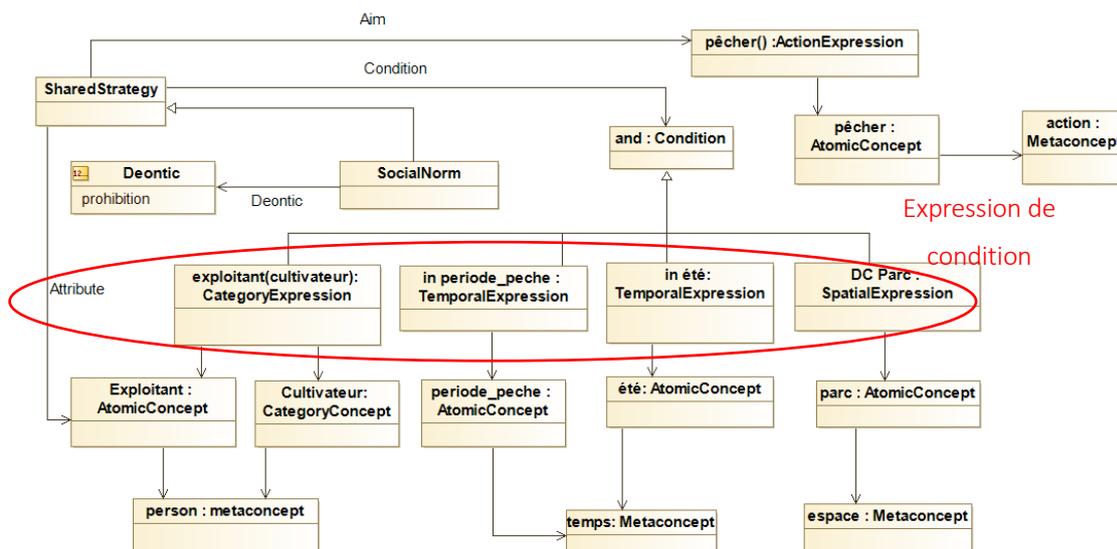


Figure 66 - Syntaxe abstraite de l'exemple

Cette norme s'écrit comme suit selon la syntaxe concrète que nous avons définie:

*If in(periode\_pêche) and in(été) and at (DC parc) and exploitants(cultivateurs) then exploitants prohibited pêcher*

Cette expression est représentée par le diagramme d'objets dans la figure 66 qui montre une instance de la syntaxe abstraite. L'expression de condition est la partie que nous devons vérifier pour la sémantique. Cette norme est applicable si la condition est vérifiée dans l'intervalle *now* et dans la zone *here*. La vérification de la sémantique nécessite de se référer au domaine de discours défini dans l'organisation, et par conséquent aux normes constitutives.

Supposons que nous avons le concept *exploitant* = *cultivateur*  $\cup$  *éleveur* et les normes constitutives suivantes, sachant que *R* désigne l'ensemble des zones spatiales dans le système et qu'on a un agent *A* :

- $MAS(Int, periode\_pêche) = [1\ Janvier; 31\ Janvier]$
- $MAS(Int, été) = [1\ Mai; 30\ Octobre]$
- $MAS(Int, DC\ parc) = \{r_j \in R \mid r_j \cap r_{parc} = \emptyset\}$  avec  $r_j$  et  $r_{parc}$  des régions

Nous avons  $r_j \cap r_{parc} = \emptyset$  si  $\forall (x, y) \in r_j, (x, y) \notin r_{parc}$

- $MAS(Int, cultivateurs(A))$  est vrai si  $A \subset cultivateurs$ 
  - Pour la condition temporelle :

$MAS(Int, in\ periode\_pêche)$  est vrai si  $now \subset [01\ Janvier; 31\ Janvier]$

$MAS(Int, in\ été)$  est vrai si  $now \subset [01\ Mai; 30\ Octobre]$

- Pour la condition spatiale :

$MAS(Int, DC\ parc)$  est vrai si  $\forall r_j \in here, \forall (x, y) \in r_j$  on a  $(x, y) \notin r_{parc}$

- Pour la condition factuelle :

$MAS(Int, cultivateurs(A))$  est vrai si  $A \subset cultivateurs$

La véracité de la totalité de la condition et l'applicabilité de la norme seront définies dans l'intersection de la véracité des sous-conditions.

En résumé, la norme est applicable si :  $now \subset [01\ Janvier; 31\ Janvier] \cap [01\ Mai; 30\ Octobre]$  ; et  $\forall r_j \in here, \forall (x, y) \in r_j$  on a  $(x, y) \notin r_{parc}$  ; et  $A \subset cultivateurs$ .

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons proposé dans cette thèse un modèle d'institution et de norme adapté au socio-écosystème. En effet, la littérature sur les normes en SMA ne s'est pas trop focalisée sur les conditions d'activation des normes et leurs structures, en particulier en situation spatio-temporelle. L'attention a surtout été portée sur les questions :

- De quoi parle une norme ? description de comportement, descriptive ou prescriptive
- De quoi est constituée « globalement » une norme ? le destinataire ou sujet, l'action qu'elle décrit, la condition, le bénéficiaire, la sanction, la récompense
- Sur quoi peut porter une norme ? sur un rôle, sur un groupe
- Qui peut créer ou modifier les normes ? Qui applique les normes ? Qui applique les sanctions ? Qui donne les récompenses ? des agents ayant des rôles spécifiques prédéfinis
- Comment appliquer les normes lors de l'implémentation ? par enforcement ou par régimentation

De même, la littérature sur les institutions en SMA a peu détaillé la dimension spatio-temporelle, mais s'est concentrée plutôt sur :

- Qu'est-ce qu'une institution ? une entité qui délivre les règles, ou un ensemble de normes
- Comment fonctionne une institution ? L'agent est soumis aux normes de l'institution à laquelle il appartient, il effectue une action, une action institutionnelle peut activer certaines normes, le contexte normatif détermine si son action est correcte ou non
- Qu'est-ce qu'une organisation ? un moyen de coordonner les tâches par la structuration de rôles dans un groupe

Or, dans la réalité, l'interaction de la société humaine avec l'écosystème met en évidence l'importance de la prise en compte de l'espace considéré et du temps concerné par un règlement. Plus concrètement, les règlements concernant l'accès aux parcs, aux champs, aux rizières, aux lacs, aux forêts, aux animaux, etc. et tout ce qui touche l'écosystème ne sont pas toujours les mêmes, mais varient en fonction de leurs situations géographiques, et du temps.

C'est dans cette optique que nous avons voulu répondre à la question : quel modèle d'institution et de norme peut prendre en compte une structure plus expressive des conditions relatives aux normes, pour un modèle plus adapté aux socio-écosystèmes ? Nous avons conçu pour cela le méta-modèle d'institution et de normes adapté à ces situations. Nous avons proposé de définir une organisation comme un contexte particulier constitué d'un ensemble de normes régulatrices et de normes constitutives, construits sur la base d'un ensemble de concepts définis relativement aux méta-concepts de l'institution, et contenant des assertions. Nous avons défini une organisation par un ensemble d'objets, pouvant être des objets temporels, spatiaux, de type action, des ressources, et principalement des agents possédant des rôles, mettant en œuvre une institution en adoptant les normes de celle-ci, et qui doit définir ses propres normes constitutives pour la définition des objets, et peut avoir ses propres normes régulatrices. Chaque objet a un identifiant et peut posséder une mesure.

Sachant que la norme est l'élément principal d'une institution, la structure du modèle de norme que nous avons proposé est basée sur ADICO, et se résume comme une modalité déontologique portant généralement sur une action, qui s'applique sur un sujet éventuellement sous certaines conditions, et qui implique dans certains cas des sanctions en cas de violation. La particularité de ce modèle réside dans la

formalisation des conditions sur les normes, qui prend en compte la dimension spatio-temporelle, et qui inclue en outre les conditions sur les faits et les actions.

Nous nous sommes inspirés de l'algèbre d'Allen pour calculer les relations temporelles et l'algèbre RCC-8 pour calculer les relations spatiales. Nous nous sommes basés sur la structuration par les intervalles pour représenter le temps dans le raisonnement temporel sur les conditions, et nous avons utilisé les relations basiques utilisées oralement pour décrire des relations entre intervalles de temps. De la même façon, nous nous sommes basés sur les régions pour la structuration de l'espace, car c'est plus proche de la réalité sur le socio-écosystème, étant donné que les normes s'appliquent généralement à des zones délimitées.

Il est possible avec ce méta-modèle de définir des normes qui s'appliquent par exemple sur les frontières d'une région, dans l'intersection de deux régions et durant un intervalle de temps, etc. La formalisation des conditions sur les normes permet de distinguer les situations dans lesquelles les normes sont applicables pour un agent, et l'intégration de la dimension spatio-temporelle dans les conditions sur les normes permet de modéliser des normes valables dans des lieux précis et pour certaines périodes. Ceci nous permet de connaître à un moment donné, dans un endroit précis, pour un agent qui tient des rôles précis dans une organisation, quelles sont les normes qui lui sont applicables.

Le modèle que nous proposons permet de modéliser un SMA spatialisé tel que le socio-écosystème, et peut fournir pour un agent donné, sous quelles normes est-il soumis selon sa position sociale, temporelle et spatiale, selon l'(ou les) organisation à laquelle il appartient, la zone où il se trouve et la période de temps dans laquelle il se situe.

Le langage dédié proposé à travers cette thèse représente un outil de description des normes et peut être utilisé pour la description de la gestion de tout système assimilable à un SMA institutionnel. Cet outil pourra être utilisé comme la base d'un utilitaire permettant à un agent de prendre des décisions, en tenant compte de plusieurs facteurs tels que les récompenses et les sanctions, dont la formalisation n'a pas été approfondie dans cette étude. Il est évident qu'il pourrait y avoir des conflits entre les normes auxquelles un agent est soumis à un moment donné, nous n'avons pas entamé dans cette étude la gestion de tels conflits.

En termes de perspectives :

- on peut envisager la gestion des sanctions et des récompenses relatives aux normes pour un modèle plus expressif ;
- Intégrer la dimension spatio-temporelle dans l'expression des actions des agents rendra le modèle de norme plus expressif ;
- Il est possible également d'approfondir le côté logique descriptive pour représenter de façon plus détaillée une situation ;
- Enfin, une question essentielle dans le domaine des SMA consiste à intégrer la prise de décision des agents en fonction des normes, des sanctions et des récompenses.

## Références bibliographiques

- Aldewereld, Huib, Sergio Álvarez-Napagao, Frank Dignum, et Javier Vázquez-Salceda. 2010. « Making norms concrete ». In , 807-14. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- Aldewereld, Huib, Frank Dignum, Andrés García-Camino, Pablo Noriega, Juan Antonio Rodríguez-Aguilar, et Carles Sierra. 2007. « Operationalisation of norms for electronic institutions ». In *Coordination, Organizations, Institutions, and Norms in Agent Systems II*, 163-76. Springer.
- Allen, James F. 1983. « Maintaining knowledge about temporal intervals ». *Communications of the ACM* 26 (11): 832-43.
- Amiguet, Matthieu. 2000. « MOCA: Un modele componentiel dynamique pour les systemes multi-agents organisationnels ».
- Aubert, Sigrid, Jean-Pierre Müller, et Julliard Ralihalizara. 2010. « MIRANA: a socio-ecological model for assessing sustainability of community-based regulations ». *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*, 8.
- Baader, Franz, Ian Horrocks, et Ulrike Sattler. 2005. « Description logics as ontology languages for the semantic web ». In *Mechanizing Mathematical Reasoning*, 228-248 Y. Springer.
- Balke, Tina, Célia da Costa Pereira, Frank Dignum, Emiliano Lorini, Antonino Rotolo, Wamberto Vasconcelos, et Serena Villata. 2013. « Norms in MAS: Definitions and related concepts ». In *Dagstuhl Follow-Ups*. Vol. 4. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- Balke, Tina, Stephen Cranefield, Gennaro Di Tosto, Samhar Mahmoud, Mario Paolucci, Bastin Tony Roy Savarimuthu, et Harko Verhagen. 2013. « Simulation and normas ». In *Dagstuhl Follow-Ups*. Vol. 4. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- Behrens, Heiko, Michael Clay, Sven Efftinge, Moritz Eysholdt, Peter Friese, Jan Köhnlein, Knut Wannheden, et Sebastian Zarnekow. 2008. « Xtext user guide ». *Dostupn é z WWW: [http://www.eclipse.org/Xtext/documentation/1\\_0\\_1/xtext.html](http://www.eclipse.org/Xtext/documentation/1_0_1/xtext.html)*, 7.
- Bennett, Brandon. 1996. « Modal logics for qualitative spatial reasoning ». *Logic Journal of the IGPL* 4 (1): 23-45.
- Bennett, Brandon, Anthony G Cohn, Frank Wolter, et Michael Zakharyashev. 2002. « Multi-dimensional modal logic as a framework for spatio-temporal reasoning ». *Applied Intelligence* 17 (3): 239-51.
- Bézivin, Jean. 2003. « La transformation de modèles ». *INRIA-ATLAS & Université de Nantes* 13.
- Biermann, Enrico, Claudia Ermel, et Gabriele Taentzer. 2006. « Tiger EMF model transformation framework (EMT) ». *TU Berlin EMT Project Team*.
- Boella, Guido, et Leendert van Der Torre. 2005. « Constitutive norms in the design of normative multiagent systems ». In , 303-19. Springer.
- . 2008. « Substantive and procedural norms in normative multiagent systems ». *Journal of Applied Logic* 6 (2): 152-71.
- Boella, Guido, et Leendert WN van der Torre. 2004. « Regulative and Constitutive Norms in Normative Multiagent Systems. » *KR* 4: 255-65.
- Boissier, Olivier, Jomi Fred Hübner, et Jaime Simão Sichman. 2006. « Organization oriented programming: From closed to open organizations ». In , 86-105. Springer.
- Broersen, Jan, Stephen Cranefield, Yehia Elrakaiby, Dov Gabbay, Davide Grossi, Emiliano Lorini, Xavier Parent, Leendert WN van der Torre, Luca Tummolini, et Paolo Turrini. 2013. « Normative reasoning and consequence ». In . Vol. 4. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.

- Cialdini, Robert B, Carl A Kallgren, et Raymond R Reno. 1991. « A focus theory of normative conduct: A theoretical refinement and reevaluation of the role of norms in human behavior ». In *Advances in experimental social psychology*, 24:201-34. Elsevier.
- Clarke, Bowman L. 1981. « A Calculus of Individuals based on ``Connection'' ». ».
- Clarke, Edmund M., et E. Allen Emerson. 1981. « Design and synthesis of synchronization skeletons using branching time temporal logic ». In *Workshop on Logic of Programs*, 52-71. Springer.
- Cliffe, Owen, Marina De Vos, et Julian Padget. 2007. « Specifying and reasoning about multiple institutions ». In *Coordination, Organizations, Institutions, and Norms in Agent Systems II*, 67-85. Springer.
- Combemale, Benoît. 2008. « Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM)--État de l' art ». ».
- Combemale, Benoît, Sylvain Rougemaille, Xavier Crégut, Frédéric Migeon, Marc Pantel, et Christine Maurel. 2006. « Expériences pour décrire la sémantique en ingénierie des modèles ». *Hermes SCIENCES/LAVOISIER, éditeur: 2ième journées sur l' Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM)*, 17-34.
- Conte, Rosaria. 2001. « Emergent (info) institutions ». *Cognitive Systems Research* 2 (2): 97-110.
- Couvet, Denis, et Anne Teyssède. 2013. « Sciences participatives et biodiversité: de l' exploration à la transformation des socio-écosystèmes ». *Cahiers des Amériques latines*, n° 72-73: 49-64.
- Crawford, Sue ES, et Elinor Ostrom. 1995. « A grammar of institutions ». *American Political Science Review* 89 (3): 582-600.
- Criado, Natalia, Estefania Argente, et V Botti. 2011. « Open issues for normative multi-agent systems ». *AI communications* 24 (3): 233-64.
- Criado, Natalia, Estefania Argente, Pablo Noriega, et Vicent Botti. 2014. « Reasoning about constitutive norms in BDI agents ». *Logic Journal of the IGPL* 22 (1): 66-93.
- Demolombe, Robert, et Vincent Louis. 2006. « Norms, institutional power and roles: Towards a logical framework ». In , 514-23. Springer.
- Dignum, MV. 2004. *A model for organizational interaction: based on agents, founded in logic*. SIKS.
- Dignum, Virginia, Javier Vázquez-Salceda, et Frank Dignum. 2004. « Omni: Introducing social structure, norms and ontologies into agent organizations ». In , 181-98. Springer.
- Emerson, E. Allen, et Joseph Y. Halpern. 1986. « "Sometimes" and "not never" revisited: on branching versus linear time temporal logic ». *Journal of the ACM (JACM)* 33 (1): 151-78.
- Esteva, Marc. 2003. « Electronic Institutions: from specification to development Ph. D ». ».
- Farail, Patrick, Pierre Gauffillet, Agusti Canals, Christophe Le Camus, David Sciamma, Pierre Michel, Xavier Crégut, et Marc Pantel. 2006. « The TOPCASED project: a toolkit in open source for critical aeronautic systems design ». *Embedded Real Time Software (ERTS)* 781 (54-59): 82.
- Fehr, Ernst, et Urs Fischbacher. 2004. « Social norms and human cooperation ». *Trends in cognitive sciences* 8 (4): 185-90.
- Ferber, Jacques, et Olivier Gutknecht. 1998. « A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems ». In , 128-35. IEEE.
- Ferber, Jacques, Olivier Gutknecht, et Fabien Michel. 2003. « Agent/group/roles: Simulating with organizations ». In . ».
- Fornara, Nicoletta, Henrique Lopes Cardoso, Pablo Noriega, Eugenio Oliveira, Charalampos Tampitsikas, et Michael I Schumacher. 2013. « Modelling agent institutions ». In *Agreement technologies*, 277-307. Springer.
- Fornara, Nicoletta, et Marco Colombetti. 2008. « Specifying and enforcing norms in artificial institutions ». In , 1-17. Springer.
- Fornara, Nicoletta, Francesco Viganò, et Marco Colombetti. 2004. « Agent communication and institutional reality ». In , 1-17. Springer.

- Freksa, Christian. 1992. « Temporal reasoning based on semi-intervals ». *Artificial intelligence* 54 (1): 199-227.
- García-Camino, Andrés, Pablo Noriega, et Juan A Rodríguez-Aguilar. 2005. « Implementing norms in electronic institutions ». In , 667-73. ACM.
- Gerevini, Alfonso, et Bernhard Nebel. 2002. « Qualitative spatio-temporal reasoning with RCC-8 and Allen' s interval calculus: Computational complexity ». In *Proceedings of the 15th European conference on artificial intelligence*, 312-16. IOS Press.
- Grossi, Davide, John-Jules Ch Meyer, et Frank Dignum. 2005. « Modal logic investigations in the semantics of counts-as ». In , 1-9. ACM.
- . 2008. « The many faces of counts-as: A formal analysis of constitutive rules ». *Journal of Applied Logic* 6 (2): 192-217.
- Hannoun, Mahdi, Olivier Boissier, Jaime S Sichman, et Claudette Sayettat. 2000. « MOISE: An organizational model for multi-agent systems ». In *Advances in Artificial Intelligence*, 156-65. Springer.
- Hübner, Jomi Fred, Jaime Simao Sichman, et Olivier Boissier. 2002. « A model for the structural, functional, and deontic specification of organizations in multiagent systems ». In , 118-28. Springer.
- Interis, Matthew. 2011. « On norms: A typology with discussion ». *American Journal of Economics and Sociology* 70 (2): 424-38.
- Ledeczi, Akos, Miklos Maroti, Arpad Bakay, Gabor Karsai, Jason Garrett, Charles Thomason, Greg Nordstrom, Jonathan Sprinkle, et Peter Volgyesi. 2001. « The generic modeling environment ». In , 17:1.
- Lemaître, Christian, Cora Excelente, et Amal El Fallah-Seghrouchni. 1999. « Multi-agent organization approach to electronic business automation ». In .
- López, Fabiola López y, Michael Luck, et Mark d' Inverno. 2006. « A normative framework for agent-based systems ». *Computational & Mathematical Organization Theory* 12 (2-3): 227-50.
- McGuinness, Deborah L, et Frank Van Harmelen. 2004. « OWL web ontology language overview ». *W3C recommendation* 10 (10): 2004.
- Mehta, Lyla, Melissa Leach, Peter Newell, Ian Scoones, Kalyanakrishnan Sivaramakrishnan, et Sally-Anne Way. 1999. « Exploring understandings of institutions and uncertainty: new directions in natural resource management ».
- Merks, Ed, R Eliersick, T Grose, F Budinsky, et D Steinberg. 2003. « The eclipse modeling framework ». *retrieved from, total*, 37.
- Mintzberg, Henry. 1989. « The structuring of organizations ». In *Readings in Strategic Management*, 322-52. Springer.
- Moratz, Reinhard, Frank Dylla, et Lutz Frommberger. 2005. « A relative orientation algebra with adjustable granularity ». In *Proceedings of the Workshop on Agents in Real-Time and Dynamic Environments (IJCAI 05)*, 21:22.
- Mosaic, XMF. 2007. « The Xactium XMF Mosaic ».
- Moszkowski, Benjamin C. 1983. « Reasoning about digital circuits. » STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE.
- Müller, Jean-Pierre, et Sitraka Oliva Raharivelo. 2017. « Un méta-modèle pour représenter les normes dans un contexte multi-institutionnel territorialisé ». In *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2017)*. Caen, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567280>.
- Muller, JP, et Sigrid Aubert. 2012. « Formaliser la multiplicité des constructions sociales de la réalité par les systèmes multi-agents institutionnels ».
- North, Douglass C. 1991. « Institutions ». *Journal of economic perspectives* 5 (1): 97-112.
- Nut, Franz Baader – Werner. 2003. « Basic description logics ».
- OMG. 2010. « The MDA Foundation Model ». <https://www.omg.org/mda/>.

- . 2016. «OMG (2016) Meta Object Facility (MOF) Core Specification Version 2.5. 1 ». <https://www.omg.org/spec>.
- Pahl-Wostl, Claudia. 2009. «A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes ». *Global Environmental Change* 19 (3): 354-65.
- Pnueli, Amir. 1977. «The temporal logic of programs ». In , 46-57. IEEE.
- Pope, Alan. 1998. *The CORBA reference guide: understanding the common object request broker architecture*. Addison-Wesley Reading.
- Raharivelo, Sitraka Oliva, et Jean-Pierre Müller. 2018. «Un modèle de norme intégrant les conditions spatio-temporelles ». In *Distribution et Décentralisation - Vingt-sixièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents, JFSMA 2018, Métabief, France, 10-12 Octobre 2018.*, 117-26.
- . 2021. «Modeling Institutions in Socio-Ecosystems ». In *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-21*, édité par Zhi-Hua Zhou, 4913-14. International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2021/688>.
- Randell, David A., Zhan Cui, et Anthony G. Cohn. 1992. «A spatial logic based on regions and connection. » *KR* 92: 165-76.
- Rubino, Rossella, Antonino Rotolo, et Giovanni Sartor. 2007. «An owl ontology of norms and normative judgements ». In , 173-87. Citeseer.
- Rudolph, Sebastian. 2011. «Foundations of description logics ». In *Reasoning Web. Semantic Technologies for the Web of Data*, 76-136. Springer.
- Rumbaugh, James, Ivar Jacobson, et Grady Booch. 2004. *Unified modeling language reference manual, the*. Pearson Higher Education.
- Salazar, Norman, Juan A Rodriguez-Aguilar, et Josep Lluís Arcos. 2008. «Infection-based self-configuration in agent societies ». In , 1945-52. ACM.
- Sandholtz, Wayne. 2008. «Dynamics of international norm change: Rules against wartime plunder ». *European Journal of International Relations* 14 (1): 101-31.
- Savarimuthu, Bastin Tony Roy, Maryam Purvis, Stephen Cranefield, et Martin Purvis. 2007. «Mechanisms for norm emergence in multiagent societies ». In , 173. ACM.
- Scott, W Richard. 2013. *Institutions and organizations: Ideas, interests, and identities*. Sage publications.
- Searle, J. 1995. «Social Reality ».
- Searle, John R, Willis, et S. 1995. *The construction of social reality*. Simon and Schuster.
- So, Young-pa, et Edmund H Durfee. 1993. «An organizational self-design model for organizational change ». *Ann Arbor* 1001: 48109.
- Soley, Richard. 2000. «Model driven architecture ». *OMG white paper* 308 (308): 5.
- Therborn, Göran. 2002. «Back to norms! On the scope and dynamics of norms and normative action ». *Current Sociology* 50 (6): 863-80.
- Uphoff, Norman. 1986. *Local institutional development: an analytical sourcebook with cases*. Kumarian Press.
- Vázquez-Salceda, Javier, HM Aldewereld, et FPM Dignum. 2005. «Norms in multiagent systems: from theory to practice ». *International Journal of Computer Systems Science & Engineering* 20 (4): 225-36.
- Vázquez-Salceda, Javier, et Frank Dignum. 2003. «Modelling electronic organizations ». In , 584-93. Springer.
- Viganò, Francesco, et Marco Colombetti. 2007. «Specification and verification of institutions through status functions ». In *Coordination, Organizations, Institutions, and Norms in Agent Systems II*, 115-29. Springer.
- Vilain, Marc, Henry Kautz, et Peter Van Beek. 1990. «Constraint propagation algorithms for temporal reasoning: A revised report ». In *Readings in qualitative reasoning about physical systems*, 373-81. Elsevier.

- Viyović, Vladimir, Mirjam Maksimović, et Branko Perisić. 2014. « Sirius: A rapid development of DSM graphical editor ». In , 233-38. IEEE.
- White, Jules, Douglas C Schmidt, et Sean Mulligan. 2007. « The generic eclipse modeling system ». In , 7:82. Citeseer.
- Yue, Jianan. 2014. « Transition from EBNF to Xtext ». *Alternation* 1: 1.

## Glossaire

<b>Agent</b>	Entité autonome intelligente capable de communiquer et d'interagir avec l'environnement
<b>Axiome</b>	Proposition admise par défaut
<b>Assertion</b>	Définition d'un nom de concept
<b>Concept</b>	Mot pour introduire la terminologie utilisée dans le langage de description d'institution et de norme
<b>Méta-concept</b>	Méta-modèle d'un concept, désignant le type d'objet introduit par le concept comme le temps, l'espace, etc.
<b>Méta-modèle</b>	Structure conceptuelle d'un modèle
<b>Modèle</b>	Représentation d'un point de vue sur un système, sur la base d'un méta-modèle
<b>Norme constitutive</b>	Relation de correspondance établie entre un concept (resp. un fait) brut et un concept (resp. un fait) institutionnel
<b>Norme régulatrice</b>	Enoncé déontique conditionnel
<b>Prédicat</b>	Enoncé dont les acteurs varient
<b>Socio-écosystème</b>	Système humain en interaction avec l'écosystème
<b>Règle</b>	Loi ou principe établi par une relation de cause à effet, une norme peut être exprimée par une règle
<b>Fait</b>	Ce qui existe déjà à un moment donné
<b>Fait institutionnel</b>	Fait qui existe et n'a de sens que dans une certaine institution
<b>Fait normatif</b>	Fait se rapportant aux normes
<b>Fait brut</b>	Fait qui existe et est reconnu indépendamment de toute institution
<b>Rôle</b>	Statut attribué à une entité, regroupant un ensemble d'actions et de devoirs, lié à une organisation
<b>Action</b>	Effort physique effectué par un individu ou une entité
<b>Action institutionnelle</b>	action qui ne peut être considérée comme telle qu'à l'intérieur d'une institution spécifique
<b>Action normative</b>	action qui ne peut être considérée comme telle que dans un contexte normatif

## Annexes

Annexe 1 – Extrait de représentation du modèle de normes (obligations) dans le système de gestion forestière à Madagascar utilisé dans Faritra

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Institution	Role	Ressource	Quantite	Unite	Preference		
1	InstitutionFoyer Marais	Marais	Finance	300000	ariary/p	6		
2	InstitutionFoyer Marais	Marais	Kitay	100	kg/p	4		
3	InstitutionFoyer Marais	Marais	PlanteMedicinale	10	kg/p	3		
4	InstitutionFoyer Marais	Marais	Plateau	10	unite/p	5		
5	InstitutionFoyer Marais	Marais	Poisson	0	kg/p	2		
6	InstitutionFoyer Marais	Marais	Riz	0	kg/p	1		
7	InstitutionFoyer Marais	Marais	Traverse	0	unit/p	5		
8	InstitutionFoyer Marais	Marais	Viande	0	kg/p	2		
9	InstitutionFoyer Foret	Foret	Finance	300000	ariary/p	6		
10	InstitutionFoyer Foret	Foret	Kitay	200	kg/p	4		
11	InstitutionFoyer Foret	Foret	PlanteMedicinale	10	kg/p	3		
12	InstitutionFoyer Foret	Foret	Plateau	10	unite/p	5		
13	InstitutionFoyer Foret	Foret	Poisson	10	kg/p	2		
14	InstitutionFoyer Foret	Foret	Riz	300	kg/p	1		
15	InstitutionFoyer Foret	Foret	Traverse	18	unite/p	5		
16	InstitutionFoyer Foret	Foret	Viande	50	kg/p	2		
17	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	Finance	0	ariary/p	6		
18	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	Kitay	0	kg/p	4		
19	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	PlanteMedicinale	0	kg/p	3		
20	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	Plateau	10	unite/p	5		
21	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	Poisson	0	kg/p	2		
22	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	Riz	0	kg/p	1		
23	InstitutionFoyer NonAutochtone	NonAutochtone	Riz	0	kg/p	1		

## Annexe 2 –Code de description du langage proposé

```
grammar org.xtext.example.instdsl.InstDsl with org.eclipse.xtext.common.Terminals
import "http://www.example.org/ecoremodel"
import "http://www.eclipse.org/emf/2002/Ecore" as ecore
DomainModel returns DomainModel:
{DomainModel}
'Model'
'{'
('Pt' points+=Point (',' points+=Point)*)?
('Pol' polygons+=SurfacePolygon (',' polygons+=SurfacePolygon)*)?
('Int' intervals+=Interval (',' intervals+=Interval)*)?
('Res' resources+=Resource (',' resources+=Resource)*)?
('Agt' agts+=Agent (',' agts+=Agent )*)?
((institutions+=Institution)*)
((organizations+=Organization)*)?
'}'
;
Institution returns Institution:
{Institution}
'Inst' name=EString ('imports' imports=[Institution])? ('inherits'
inherits=[Institution])?
'{'
('meta' ':' metaconcepts += Metaconcept (',' metaconcepts += Metaconcept)* )?
('atom' ':' atomicconcepts+=Atomicconcept (',' atomicconcepts+=Atomicconcept)* )?
('indiv' ':' individualconcepts+=Individualconcept (','
individualconcepts+=Individualconcept)* )?
('categ' ':' categoryconcepts+=Categoryconcept (','
categoryconcepts+=Categoryconcept)* )?
('const-norms' ':' cnorms+=Instconstnorm (',' cnorms+=Instconstnorm)* )?
('soc-norms' ':' norms+=Norm (',' norms+=Norm)* )?
'}'
;
Organization returns Organization:
{Organization}
'Org' orgname=EString 'from' name=EString
'{'
('const-norms' ':' orgcnorms+=Orgconstnorm (',' orgcnorms+=Orgconstnorm)* ) ?
('actions' ':' actions+=Action (',' actions+=Action )*) ?
('relations' ':' relations+=Relation (',' relations+=Relation)* ) ?
('soc-norms' ':' norms+=Socialnorm (',' norms+=Socialnorm )*) ?
'}'
;
```

```

Categoryconcept:
Atomicconcept | Enumerationconcept | Complementaryconcept | Composedconcept |
RelationConcept | QualifiedConcept | FunctionConcept
;
Metaconcept returns Metaconcept:
name=EString (':' prefixedmetaconcept=[Identifier])?
;
Object returns Object:
SituatedObject | Space | Time | Action
;
Individualconcept returns Individualconcept:
name=EString '::' atomicconcept=[Atomicconcept]
;
Measure returns Measure:
(Multitude | Magnitude )
;
Magnitude returns Magnitude:
number = Integer
;
Multitude returns Multitude:
number = Integer
unity = EString
;
Atomicconcept returns Atomicconcept:
name=EString ':' meta=[Metaconcept]
("("actionparams+=[Atomicconcept] (";"actionparams+=[Atomicconcept])*")")?
("("relationparams+=[Atomicconcept] ";"relationparams+=[Atomicconcept]")")?
;
enum Conceptoperator returns Conceptoperator:
union='union' | intersection='inter'
;
FunctionConcept returns FunctionConcept:
name=EString '=' functionconcept=[Atomicconcept] '('
paramconcept=[Categoryconcept] ')'
;
Composedconcept returns Composedconcept:
name=EString '=' operator=Conceptoperator '(' concepts+=[Categoryconcept] (';'
concepts+=[Categoryconcept])* ')'
;
RelationConcept returns RelationConcept:
name=EString '(' concept1=[Categoryconcept] '-' concept2=[Categoryconcept] ')'
;
QualifiedConcept returns QualifiedConcept:

```

```

name=EString '=' operator=QualificationOperator functionconcept=[Atomicconcept]
 '(' param=[Categoryconcept] ')'
;
enum QualificationOperator returns QualificationOperator:
all='all' | exist='exist'
;
Complementaryconcept returns Complementaryconcept:
name=EString '=' 'not' '(' categoryconcept=[Categoryconcept] ')'
;
Enumerationconcept returns Enumerationconcept:
name=EString '=' '{' concepts+=[Individualconcept] (';'
concepts+=[Individualconcept])* '}'
;
Norm returns Norm:
Socialnorm
;
enum DeonticModality returns DeonticModality:
permitted='permitted' | obligated='obligated' | prohibited='prohibited'
;
Socialnorm returns Socialnorm:
{Socialnorm}
'if' '[' condition=Expression ']' 'then' (attribute=[Categoryconcept]
deonticmodality=DeonticModality)? '[' aim=Expression ']' //SharedStrategy ou
SocialNorm
;
Expression returns Expression:
SimpleExpression | Negation | BinaryExpression | UExpression | XExpression
;
UExpression returns UExpression:
'until' '(' leftexpression=Expression ';' rightexpression=Expression ')'
;
XExpression returns XExpression:
'X' expression=Expression
;
BinaryExpression returns Binaryexpression:
operator = BooleanOperator '(' expressions+=Expression (';'
expressions+=Expression)* ')' //TODO simple or negation
;
enum BooleanOperator returns BooleanOperator:
or='or' | and='and' | xor='xor'
;
Negation returns Negation:
'not' '(' expression=Expression ')'

```

```

;
SimpleExpression returns SimpleExpression:
TemporalExpression | SpatialExpression | ActionExpression | FactExpression
;
TemporalExpression returns TemporalExpression:
'in' '(' UnaryTExpression ')' | 'in' '(' SimpleTExpression ')' | BinaryTExpression
;
enum UnaryTModality returns UnaryTModality:
before='before' | after='after' | meets_before='meets_before' |
meets_after='meets_after' | inter_t='inter_t' | union_t='union_t'
;
UnaryTExpression returns UnaryTExpression:
tmodality=UnaryTModality "-" concept=[Categoryconcept]
;
SimpleTExpression returns SimpleTExpression:
categoryconcept=[Categoryconcept]
;
BinaryTExpression returns BinaryTExpression:
to=[Categoryconcept] operator=BooleanTOperator from=[Categoryconcept]
;
enum BooleanTOperator returns BooleanTOperator:
before='before' | after='after' | meets_before='meets_before' |
meets_after='meets_after' | overlaps='overlaps' | overlaps_i='overlaps_i' |
starts='starts' | starts_i='starts_i' | during='during' | during_i='during_i' |
finishes='finishes' | finishes_i='finishes_i'
;
SpatialExpression returns SpatialExpression:
'at' '(' UnarySExpression ')' | 'at' '(' SimpleSExpression ')' | BinarySExpression
;
enum UnarySModality returns UnarySModality:
EC='EC' | DC='DC' | inter_s='inter_s' | union_s='union_s'
;
UnarySExpression returns UnarySExpression:
smodality=UnarySModality "-" concept=[Categoryconcept]
;
SimpleSExpression returns SimpleSExpression:
categoryconcept=[Categoryconcept]
;
BinarySExpression returns BinarySExpression:
to=[Categoryconcept] operator=BooleanSOperator from=[Categoryconcept]
;
enum BooleanSOperator returns BooleanSOperator:
EC='EC' | DC='DC' | TPP='TPP' | NTPP='NTPP' | PO='PO' | TPPi='TPPi' | NTPPi='NTPPi'

```

```

;
ActionExpression returns ActionExpression:
atomicconcept = [Atomicconcept] '(' params+=[Categoryconcept] ( ';'
params+=[Categoryconcept] )* ')'
;
FactExpression returns FactExpression:
RelationExpression | CategoryExpression | ComparisonExpression
;
RelationExpression returns RelationExpression:
relationconcept=[RelationConcept] '(' from=[Categoryconcept] '-'
to=[Categoryconcept] ')'
;
CategoryExpression returns CategoryExpression:
category=[Atomicconcept] '::' categoryconcept=[Categoryconcept]
;
enum ComparisonOperator returns ComparisonOperator:
inf("<" | equal="=" | sup(">")
;
ComparisonExpression returns ComparisonExpression:
left=[Atomicconcept] operator=ComparisonOperator right=[Atomicconcept]
;
Orgconstnorm returns Orgconstnorm:
object=[Object] "=" categoryconcept=[Categoryconcept]
;
Instconstnorm returns Instconstnorm:
categoryconcept=[Categoryconcept] "=" name=EString'.EString
;
Constitutivenorm returns Constitutivenorm:
Instconstnorm | Orgconstnorm
;
Identifier returns Identifier:
name = EString
;
Action returns Action:
{Action}
actionconcept = [Atomicconcept] '(' params+=[Object] ( ';'params+= [Object] )* ')'
'='
[' space = [Space] ';' time = [Time] ']
;
Relation returns Relation:
ObjectRelation
;
ConceptRelation returns ConceptRelation:

```

```

{ConceptRelation}
relationconcept = [Atomicconcept] '('
fromCateg=[Categoryconcept] ';' toCateg=[Categoryconcept]
')' '=' '['
spaceconcept = [Space] ';'
timeconcept = [Time]
']'
;
ObjectRelation returns ObjectRelation:
{ObjectRelation}
relationconcept = [RelationConcept] '('
from = [Object] '-' to = [Object]
')' '=' '['
(spaceobject = [Space])? ';'
(timeobject = [Time])?
']'
;
Categorization returns Categorization:
{Categorization}
('concept' individualconcept=[Individualconcept] | 'obj' object=[Object]) '<'
categoryconcept=[Categoryconcept] '=' '['
space = [Space] ';'
time = [Time]
']'
;
Space returns Space:
Point | SurfacePolygon
;
SurfacePolygon:
name=EString '(' points+=Point (';' points+=Point)* ')'
;
Point:
name=EString '(' x=Integer ':' y=Integer ')'
;
Integer returns ecore::EInt:
INT
;
EString returns ecore::EString:
STRING | ID
;
BigInteger returns ecore::EBigInteger:
INT
;

```

```

Time returns Time:
Interval
;
Interval returns Interval:
{Interval}
name=EString '[' debut=Instant ';' fin=Instant ']'
;
Instant returns Instant:
{Instant}
weekday=Integer ':' day=Integer ':' month=Integer ':' year=Integer ':'
hour=Integer ':' min=Integer
;
SituatedObject:
Agent | Resource
;
Agent returns Agent:
{Agent}
name=EString
 '['
 (uri=URI)?
 (';' (now = [Time]))?
 (';' (here = [Space]))?
 ']'
;
Resource returns Resource:
{Resource}
name=EString '['
 (measure = Measure)?
 (';')? (uri=URI )?
 (';')? ((now = [Time]))?
 (';')? ((here = [Space]))?
 ']'
;
QualifiedName:
EString ('.' EString)*
;
URI:
EString ('.' EString)*
;

```

**Auteur:** RAHARIVELO Sitraka Oliva  
sitraka\_oliva@yahoo.fr / +261 34 29 062 06

## **Modéliser les institutions dans les socio-écosystèmes – Application à la gestion forestière à Madagascar**

**Résumé:** Cette thèse propose une structure conceptuelle capable de représenter les différentes formes d'organisation, les différentes ressources et surtout les différentes lois dans le socio-écosystème, de manière à pouvoir visualiser les relations entre ces éléments, et évaluer la cohérence et la conformité des lois à la réalité du système en entier. Nous utilisons pour cela les Systèmes Multi-Agents qui sont une approche permettant de modéliser les systèmes complexes par un ensemble d'agents artificiels interagissant entre eux, situés dans un environnement, organisés selon une certaine structure organisationnelle pour accomplir leurs tâches, et soumis à des lois appelés normes dont un ensemble forme une institution. Le méta-modèle d'institution et de norme proposé est concrétisé par un langage dédié capable de décrire les institutions, les organisations et les normes, et permet de consulter à travers un paysage multi-institutionnel les normes applicables à un agent temporellement et spatialement situé, en fonction de ses appartenances organisationnelles.

**Mots-clés:** Espace, institution, norme, organisation, socio-écosystème, Systèmes Multi-Agents, temps

**Abstract:** This thesis proposes a conceptual structure capable of representing the different forms of organization, the different resources and especially the different laws in the socio-ecosystem, so as to be able to visualize the relationships between these elements, and to evaluate the coherence and the conformity of the laws to the reality of the whole system. We use Multi-Agent Systems, an approach that allows complex systems to be modeled by a set of artificial agents interacting with each other, located in an environment, organized according to a certain organizational structure to accomplish their tasks, and subject to laws called norms, a set of which forms an institution. The proposed institution and norm metamodel is concretized by a domain-specific language capable of describing institutions, organizations and norms, and allows to consult through a multi-institutional landscape the applicable norms to a temporally and spatially located agent, according to its organizational memberships.

**Keywords:** Institution, Multi-Agent Systems, norm, organization, socio-ecosystem, space, time

### **Co-directeurs de thèse:**

Pr Arthur RANDRIANARIVONY (arthur.randrianarivony@gmail.com)

Pr Jean-Pierre MÜLLER (jean-pierre.muller@cirad.fr)