HAL
open science

Contribution à une architecture de modélisation et de simulation à événements discrets : application à la propagation d'information dans les réseaux sociaux

Youssef Bouanan

To cite this version:

Youssef Bouanan. Contribution à une architecture de modélisation et de simulation à événements discrets : application à la propagation d'information dans les réseaux sociaux. Ordinateur et société [cs.CY]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0166 . tel-01398756

HAL Id: tel-01398756

https://theses.hal.science/tel-01398756

Submitted on 17 Nov 2016

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

SPECIALITE : PRODUCTIQUE

Par Youssef BOUANAN

CONTRIBUTION A UNE ARCHITECTURE DE MODELISATION ET DE SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS : APPLICATION A LA PROPAGATION D'INFORMATION DANS LES RESEAUX SOCIAUX

Sous la direction de : Bruno VALLESPIR
(Co-directeur : Gregory ZACHAREWICZ)

Soutenue le 18 Octobre 2016

Membres du jury :

1. M. BOURRIERES, Jean-Paul	Professeur, Université de Bordeaux	Président
2. Mme FRYDMAN, Claudia	Professeur, Université d'Aix Marseille	Rapporteur
3. M. ARCHIMEDE, Bernard	Professeur, ENIT, Tarbes	Rapporteur
4. M. VALLESPIR, Bruno	Professeur, Université de Bordeaux	Directeur
5. M. ZACHAREWICZ, Gregory	MCF (H.D.R), Université de Bordeaux	Co-directeur
6. M. DIALLO, Saikou	Associate Professor, Old Dominion University	Examinateur
7. M. QUESNEL, Gauthier	Chercheur, INRA de Toulouse	Examinateur
8. M. ZERGUINI, Seghir	MCF, Université de Bordeaux	Examinateur

Titre : Contribution à une Architecture de Modélisation et de Simulation à Evénements Discrets : Application à la Propagation d'Information dans les Réseaux Sociaux.

Résumé : L'étude des phénomènes de la diffusion d'information à grand échelle est un domaine récent. La diffusion d'information est définie comme le processus de communication par lequel une idée ou une information se propage dans une population et qui peut impacter le comportement des individus. Les institutions, tout comme les entreprises, cherchent à comprendre et à prévoir l'impact de la propagation d'information sur les individus. Une approche de modélisation et simulation permet de mieux comprendre ce processus social et de répondre à ces questions. La modélisation et la simulation à base d'agents offre une approche puissante pour modéliser un tel processus social. Toutefois, les modèles actuels simplifient fortement les facteurs culturels et les informations représentées dans le modèle ainsi que les différents liens interconnectant les individus. Ces éléments sont centraux et déterminants pour le processus de propagation. Afin d'améliorer les modèles de propagation, nous explorons dans cette thèse une représentation de la population plus réaliste. Nous proposons une architecture de modélisation et simulation permettant de simuler les phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux multiplexes et dynamiques basée sur le formalisme DEVS.

Mots clés : Modélisation formelle, Multi-modélisation, Simulation, DEVS, Evènements discrets, propagation d'information, Réseau Social.

Title: Contribution to a Modelling and Discrete Event Simulation Framework: Application to the Information Spreading in Social Networks.

Abstract: The study of information dissemination phenomena of large-scale is a new field. Diffusion of information is defined as the communication process by which an idea or information spreads within a social system and that can impact the behaviour of individuals. Institutions and firms search to understand and predict the impact of information propagation on individuals. Agent-based modelling is a powerful approach for studying such a collective process. However, existing models oversimplify adopters' cultural attributes, different type of link and information content, despite the evidence of their central role in diffusion process. In this thesis, we challenge the feasibility and utility of a more realistic representation of population. We use the DEVS formalism, extended by DS-DEVS and PDEVS in order to simulate the propagation phenomena within a multi-layer social network (MSN).

Keywords : Formel modelling, multi-modelling, simulation, DEVS Formalism, discrete events, diffusion process, information propagation, social network.

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système

[IMS, CNRS UMR 5218, Bât. A31 - 351 Cours de la Libération - 33400 Talence]

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée au sein du groupe Productique du Laboratoire de *l'Intégration du Matériau au Système (*IMS*, CNRS UMR5218) de l'Université de Bordeaux. Ce travail a été réalisé dans le cadre* du projet SICOMORES (*Simulation Constructive et Modélisation des effets des Opérations d'influence dans les réseaux Sociaux) financé par la DGA (Direction Générale de l'Armement).*

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma plus profonde gratitude à M. Gregory ZACHAREWICZ, Maître de conférence titulaire d'une H.D.R. à l'Université de Bordeaux et M. Bruno VALLESPIR, professeur à l'Université de Bordeaux, pour m'avoir fait confiance depuis mon Master, avoir accepté de diriger ces travaux de thèse et m'avoir soutenu tout au long de cette étude. Leurs conseils ont été indispensables à la concrétisation de ce travail.

À Mme Claudia FRYDMAN, professeur à l'Université d'Aix-Marseille, Marseille et M. Bernard ARCHIMEDE, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, j'adresse ma plus respectueuse reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être les rapporteurs dans ce jury. Je tiens aussi à remercier mes examinateurs, M. Saikou DIALLO de l'Université Old Dominion, M. Seghir ZERGUINI de l'Université de Bordeaux et M. Gauthier QUESNEL de l'INRA de Toulouse, qui ont bien voulu examiner ce travail.

Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance à M. Saikou DIALLO qui m'a accueilli comme chercheur invité au sein du VMASC (Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center) à l'Université d'Old Dominion et pour avoir accepté de participer à ma soutenance.

Je tiens également à remercier M. Judicaël RIBAULT pour son aide précieuse tout au long de ma thèse. Il m'a permis de m'orienter, de développer et de mettre au point mes idées et d'améliorer ainsi, la qualité de mon travail.

Je remercie tous les doctorants, chercheurs et personnels du Laboratoire IMS pour leur grande gentillesse et pour l'ensemble des échanges que nous avons eu. Je remercie particulièrement M. Yves DUCQ, Professeur à l'Université de Bordeaux, Responsable du groupe de recherche en productique, pour son accueil

Ma gratitude éternelle va à mes Parents, ma sœur, mon Frère et à toute ma famille pour leur soutien sans faille durant toutes ces années d'études. Finalement, un grand merci à Soumaya, Nabil, Sara, Fouad, Jihane, Hajar, Nassim, Faiçal, Mariem et tous ceux dont j'oublie les noms qui m'ont été d'un soutien indispensable dans des moments quelquefois difficiles.

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction, Enjeux de recherche et Structure 1
1> Introduction générale 1
2> Enjeux de recherche et contributions 4
2.1 Modéliser et prévoir la propagation de l'information 4
2.2 Formalisation des agents 5
2.3 Maquette de simulation des phénomènes de propagation 5
3> Structure du manuscrit 6
4> Publications 8
Chapitre 2 : Etat de l'art 11
1> Théorie de la Modélisation et de la Simulation 12
1.1 Introduction à la modélisation et simulation 12
1.2 Les formalismes de spécification des systèmes 13
1.2.1 Les Formalismes de spécification 14
1.2.2 Le Formalisme DEVS 15
1.2.2.1 Modèles DEVS 15
1.2.2.2 Spécialisation de DEVS 17
1.2.2.3 Environnements de modélisation et simulation DEVS 17
1.3 Modélisation basée agents 20
1.3.1 Systèmes Multi-Agents 20
1.3.2 Simulation sociale orientée agents 23
1.3.3 Etudier le lien micro-macro 24
1.4 Vérification et Validation des modèles de simulation 25
2> Propagation et interaction sociale au sein d'un réseau 27
2.1 Structure et réseaux sociaux 27
2.1.1 Définitions et notations 27
2.1.2 Mesure 27
2.1.2.1 Mesures locales 28
2.1.2.2 Mesure globale 29
2.1.3 Structures et modèles de génération 29
2.1.3.1 Réseaux réguliers 30
2.1.3.2 Réseaux aléatoires 30
2.1.3.3 Réseaux petit-monde 30
2.1.3.4 Réseaux scale-free 31
2.2 Modélisation des phénomènes de propagation 32
2.2.1 Les modèles à compartiments 33

2.2.1.1 Le modèle SI 33
2.2.1.2 *Le modèle SIR* 34
2.2.2 Les modèles basés sur les réseaux 36
3> Synthèse 40
Chapitre 3 : Simulation des phénomènes de propagation au sein des réseaux multiplexes . 43
1> Modélisation Formelle des Réseaux Sociaux 44
1.1 Introduction 44
1.2 Du paradigme d'agents vers le Formalimse DEVS 44
1.2.1 Concepts généraux 45
1.2.1.1 Formalisme DEVS 45
1.2.1.2 Extension DS-DEVS 46
1.2.2 Spécification d'un agent avec DEVS 48
1.2.2.1 Perception 49
1.2.2.2 Action et Pro-action 49
1.2.2.3 Autonomie 50
1.2.3 Formalisation de l'environnement 50
1.3 Spécification des réseaux Sociaux 52
1.3.1 Concept généraux 52
1.3.2 Spécification 54
1.3.3 Formalisation d'un réseau Multiplexe 55
1.4 Conclusion 56
2> Phénomène de Propagation au sein des Réseaux Sociaux 57
2.1 Modèles de diffusion et d'influence existants 57
2.2 Modèle proposé 59
2.2.1 Description du modèle 59
2.2.2 Mécanisme de propagation dans les réseaux multiplexes 63
2.3 Conclusion 64
Chapitre 4 : Architecture de modélisation et de simulation des phénomènes de propagation 65
1> Contexte et architecture générale 67
1.1 Contexte 67
1.2 Architecture générale 67
2> Génération de population pour la simulation de réseaux 68
2.1 Présentation générale 68
2.2 Dimensions et Algorithmes 69
2.2.1 Les nœuds 69
2.2.2 La dimension familiale 70
2.2.3 La dimension amicale 72
2.2.4 La dimension de voisinage 72

2.3 Conclusion 74
3> Module de la simulation de la propagation d'information: Simulation 75
3.1 Modélisation Opérationnelle Agent 75
3.2 Représentation de Comportement d'Agents 76
3.3 Environnement de simulation 77
3.3.1 Présentation de l'environnement VLE 77
3.3.2 Implémentation de modèles opérationnels de phénomène de propagation dans un réseau social multicouche. 79
3.3.2.1 Generator 79
3.3.2.2 GraphLoader 80
3.3.2.3 Observer 80
4> Traitement et Analyse des résultats de simulation: Post Simulation 82
4.1 Projet R 82
4.2 Analyse de sensibilité 83
4.3 Analyse Exploratoire des Données 85
4.4 Conclusion 85
Chapitre 5. Applications 87
I. Contexte militaire : Opérations de stabilisation 89
1> Projet SICOMORES 90
2> Conceptualisation de la Persuasion 91
2.1 Les effets de la source du message 92
2.2 L'impact des caractéristiques du message 93
2.3 Impact des caractéristiques du récepteur 93
2.4 L'effet du medium de diffusion 95
3> Description et formalisation des opérations militaires d'influence 96
3.1 OMI/PsyOps 96
3.1.1 Modèle DEVS d'une OMI/PSYOPS 96
- **Modèle DEVS de générateur d'une action OMI/PsyOps** 97
- **Modèle DEVS d'un individu récepteur pour une action OMI/PsyOp** 98
- **Modèle de la communication persuasive pour les missions PsyOps** 100
3.2 Key Leader Engagement 103
3.2.1 Concepts généraux 103
3.2.2 Modèle de KLE de bon voisinage 104
3.3 Co-opération Civilo-Militaire 105
3.3.1 Concepts 105
3.3.2 Théories et Modèles conceptuels de besoins pour la modélisation d'une CIMIC 106
4> Un cas d'étude : Intervention dans la vie civile d'une population virtuelle. 109

4.1 Reconstitution d'un scénario militaire 109
4.2 Etude de terrain : Génération d'une population sur une zone désignée 110
4.2.1 Elaboration des actions d'influence 114
4.2.1.1 Mission OMI/PsyOps 115
4.3 Résultats Macroscopiques 118
4.3.1 Plan d'expériences du modèle PSYOP 118
4.3.2 Résultats de la simulation et discussion 119
4.3.3 Conclusion 125
II. Management des organisations 126
1> Etude de la communication dans les plans d'urgence lors d'un accident nucléaire. 126
1.1 Introduction 126
1.2 Définition d'un Plan d'Urgence Nucléaire 127
1.3 Modélisation et Simulation d'un Plan d'Urgence Nucléaire 130
1.4 Conclusion 134
2> Etude de la propagation d'information au sein des organisations par la simulation 135
2.1 Introduction 135
2.2 Propagation de l'information au sein des organisations 136
2.3 Analyse des réseaux au sein des organisations 137
2.4 Simulation de la propagation d'information formelle et informelle au sein d'une organisation 138
2.5 Conclusion 140
Chapitre 6. Conclusion 141
1> Résumé de nos travaux 141
2> Perspectives 143

Liste des figures

Figure 1. Structuration des travaux de thèse. 7
Figure 2. Relations de Modélisation. 14
Figure 3. Différents types de modèles. 14
Figure 4. Exemple de modèle atomique. 16
Figure 5. Modèle Watts-Strogatz : D'un réseau régulier vers un réseau aléatoire. 31
Figure 6. Comparatif des différentes structures et mesures associées. 32
Figure 7. Modèle SIR. 34
Figure 8. Courbes de diffusion dans le modèle SIR 35
Figure 9. Le simulateur abstrait d'un modèle atomique. 46
Figure 10. Exemple d'un réseau social multicouche. 53
Figure 11. Représentation de la structure d'un réseau multiplexe 55
Figure 12. Représentation de la structure d'un agent composé d'un serveur et trois modèles proxies. 56
Figure 13. Description du modèle de propagation. 60
Figure 14. Algorithme de propagation. 62
Figure 15. Exemple de propagation d'information dans un réseau multicouche. 63
Figure 16. Maquette opérationnelle de phénomène de propagation. 67
Figure 17. Cycle de modélisation et de simulation 68
Figure 18. Vision globale de l'étape de génération de la population. 69
Figure 19. Graphe représentant la famille nucléaire. 70
Figure 20. Exemple d'une famille étendue. 71
Figure 21. Représentation d'une famille élargie. 71
Figure 22. Dimension familiale d'une population de 550 individus avec 10% des individus seuls. 72
Figure 23. Réseau d'amitié d'une population de 550 individus. 73
Figure 24. visualisation de la dimension de voisinage sans la localisation géographique sur une carte. 73
Figure 25 . Visualisation des individus sur une carte géographique. 74
Figure 26. Architecture du modèle agents dans un réseau social multiplexe. 76
Figure 27. Exemple d'un modèle DEVS du comportement simple d'un agent. 77
Figure 28.Interface graphique de l'environnement de modélisation GVLE. 78
Figure 29. Diagramme de classe UML simplifié de l'arborescence d'héritage pour le développement du comportement des modèles atomiques. 79
Figure 30. Modélisation et simulation des phénomènes de propagation sous VLE. 79
Figure 31. Transformation d'un graphe en DEVS. 80
Figure 32. Diagramme UML simplifié de module de simulation. 81

Figure 33. Transformation d'un graphe statique en un réseau DEVS par le modèle GraphLoader. 81
Figure 34. Représentation simplifiée du couplage VLE-R Project..... 82
Figure 35. Interface graphique développée sous R. 83
Figure 36. Exemple d'un tableau ANOVA sous R 85
Figure 37. Descriptions du projet SICOMORES. 91
Figure 38. Graphe DEVS de générateur PSYOPS. 98
Figure 39. Graphe DEVS d'une action PSYOPS. 99
Figure 40. La phyramide des besoins selon Maslow. 106
Figure 41. Carte des arrondissements et quartiers de la ville 112
Figure 42. Emplacement de la station Radio dans la zone de conflit. 115
Figure 43. Mécanisme de changement d'opinion. 116
Figure 44. Eléments de la mission PsyOp du scénario 1. 117
Figure 45. Eléments de la mission PSYOPS du scénario 2. 117
Figure 46. Exemple de simulation de la propagation d'information pour 1200 agents. 120
Figure 47. Le nombre d'agents intéressés ou impactés par le message en fonction des liens d'interactions. 121
Figure 48. . Le nombre d'agents intéressés en fonction des info-sources. 123
Figure 49. Proportion de l'opinion des agents 124
Figure 50. Visualisation des leaders de la population sur une carte géographique. 124
Figure 51. Aperçu de la structure de plan d'urgence nucléaire espagnole 128
Figure 52. Le niveau supérieur d'abstraction du modèle PUN. 129
Figure 53. Décomposition de l'équipe CREW 129
Figure 54. Décomposition de l'équipe radiologique. 130
Figure 55. Aperçu d'un modèle DEVS avec 3 couches et 4 nœuds. 131
Figure 56. Représentation des trois différents modèles du PUN et la description des liens. 133
Figure 57. Résultats de simulation de la propagation d'information dans Le PUN. 134
Figure 58. Nombre d'agent actif en fonction des moyens de communication. 135
Figure 59. Représentation de l'entreprise. 138
Figure 60. Exemple d'un réseau représentant une organisation. 139

Index des tableaux

Tableau 1: Définition de la modélisation. 12

Tableau 2. Comparaison Générale de quelques simulateurs DEVS (Van Tendeloo 2013). 19

Tableau 3. Méthodes de validation des modèles de simulation. 26

Tableau 4. Liste de quelques notations utilisées dans le chapitre 3. 59

Tableau 5. Différentes possibilités pour la propagation d'un article au sein un réseau multicouche. 64

Tableau 6. Paramètres de modèle d'individu. 98

Tableau 7. Paramètres dynamique du modèle (Bergier and Faucher 2016)..... 102

Tableau 8. Description des paramètres d'une opération KLE. 104

Tableau 9. Besoins retenus pour la simulation d'une CIMIC dans le système SICOMORES. 107

Tableau 10. Paramètres démographiques et socio-culturels de la population générée 113

Tableau 11. Paramètres statiques du modèle et leurs valeurs 118

Chapitre 1 : Introduction, Enjeux de recherche et Structure

1> Introduction générale

Aujourd'hui, le mot réseau est utilisé dans plusieurs champs d'activité (informatique, télécommunications, énergie, transport, social, etc.). On appelle réseau un ensemble de nœuds reliés entre eux par des liens (ou canaux) afin d'échanger des informations, de partager des ressources, de transporter de la matière ou de l'énergie. Les nœuds peuvent avoir des comportements plus au moins complexes tandis que les liens assurent une fonction de transport. Ces réseaux deviennent de plus en plus complexes avec les données massives ce qui empêchent l'observateur de prévoir leurs comportements ou leurs évolutions par une simple étude typologique. Les réseaux sociaux, les réseaux Internet, les réseaux d'énergie, les réseaux de transport ainsi que de nombreuses classes de graphes du monde réel font partie de la catégorie des systèmes ou des réseaux complexes. Plus particulièrement, un réseau social est un ensemble de personnes, d'associations, d'établissements, d'organismes ou d'entités sociales qui sont en relation pour agir ensemble. Pour un individu, faire partie d'un réseau social ou relationnel est considéré comme un moyen privilégié de partager des idées, d'obtenir des conseils ou d'élargir ses contacts. Dans ce contexte, plusieurs systèmes du monde réel peuvent être modélisés par des réseaux sociaux. Dans ces systèmes, les entités sont généralement interconnectées par plusieurs types de relations. Par exemple, dans un groupe de personnes, on trouve des individus liés entre eux par le lien d'amitié, de voisinage ou de relation professionnelle. Le concept de réseau social avec plus d'un type de relations n'est pas nouveau (Wasserman and Faust 1994). Ces réseaux ont été analysés principalement à petite échelle (McPherson, Smith-Lovin et al. 2001, Entwisle, Faust et al. 2007).

Depuis une trentaine d'années, les organisations ont été parmi les ensembles sociaux les plus observés par les analystes de réseaux : hôpital, communauté, entreprise, banque, agence de publicité, etc. (Lazega 1994). L'approche réseau social considère les organisations dans la société comme un système d'objets (par exemple des personnes, des groupes, des organisations) reliées par une variété de relations. Les paires d'objets ne sont pas toute directement reliée, et certains sont liés par de multiples relations. Il existe de nombreux modèles de systèmes sociotechniques. Cependant, les techniques classiques de la modélisation d'entreprise et d'organisation considèrent peu les échanges informels. Même si cette communication ou échange est une partie du fonctionnement de l'organisation. Chaque effort dans le développement d'une organisation doit prendre en considération la composante humaine dans son développement, et la communication directe contribue à la façon dont les gens peuvent coordonner leurs efforts. Tout

changement structurel implique un changement de comportement des acteurs et cela est le plus difficile à appréhender. Dans ce contexte, l'étude de l'influence des relations sur la prise des décisions ainsi que l'analyse des variables influençant l'attitude des individus sont des facteurs clés de la recherche dans le domaine de l'étude et du management des organisations.

Un grand nombre d'études ont montré l'importance des réseaux sociaux dans des domaines connexes tels que la puissance économique (Krackhardt 1990, Brass and Burkhardt 1992), la performance individuelle (Granovetter 1973, Burt 2009), la performance organisationnelle (Greve and Salaff 2001), la coopération (Lindenberg 2000), et la satisfaction professionnelle (Kilduff and Krackhardt 1994). L'analyse de réseaux sociaux se rapporte à la théorie des réseaux qui conçoit les relations sociales en termes de nœuds et de liens. Les nœuds sont habituellement les acteurs sociaux dans le réseau mais ils peuvent aussi représenter des institutions, et les liens sont les relations entre ces nœuds. Il peut exister plusieurs sortes de liens entre les nœuds. L'analyse considère que le comportement des individus d'une société résulte des relations d'interdépendance existant entre eux, et s'intéresse à la forme que prend l'ensemble de ces relations, des conditions ayant amené à cette structure, aux propriétés que le groupe peut en tirer. Cette vue est une représentation plutôt statique et structurelle.

Bien qu'il existe de nombreux usages pour la simulation, la plupart des recherches dans les domaines de la gestion et les études organisationnelles utilisent peu la simulation pour comprendre comment les organisations ou les entreprises opèrent. Cependant, la simulation est une approche en devenir dans les études organisationnelles et de gestion. Elle pourra permettre d'apporter une vue dynamique (Adner and Levinthal 2001). Récemment, les chercheurs ont aussi commencé à appliquer la simulation pour comprendre le comportement organisationnel au niveau micro, en se concentrant sur la cognition et le comportement individuel et interpersonnel (Carley 2001). La communication (formelle ou informelle) entre les acteurs d'une organisation est un élément critique pour l'accompagnement du changement dans le cadre de l'amélioration de la structure (Iosim, Iancu et al. 2010). Cette voie permet de rendre les acteurs plus motivés et peut changer leur comportement et leur attitude. Dans ce contexte, les études des phénomènes de diffusion et de propagation au sein des réseaux visent à analyser le comportement des acteurs et à étudier l'impact des différents scénarios de changement sur les individus ou groupe d'individus au sein d'un réseau.

Le phénomène de propagation est observé et étudié depuis longtemps dans de nombreux domaines de la science : propagation des maladies (Bailey 1975, Anderson, May et al. 1992, Hethcote 2000) ou des virus informatiques (Serazzi and Zanero 2004), diffusion des innovations technologiques (Valente 1995, Greenhalgh, Robert et al. 2004, Rogers 2010), déplacements humains (Brockmann, Hufnagel et al. 2006), etc. En particulier, le phénomène de propagation d'information - que l'on définit comme l'action

de propager des événements ou des éléments de l'information auprès d'un groupe de personne - suscite depuis plusieurs années un intérêt accru au sein de la communauté scientifique. Les modèles de propagation ont pour but de reproduire les phénomènes que l'on peut observer dans les réseaux sociaux, mais aussi dans le marketing viral ou dans la propagation de maladies. La communication entre les utilisateurs, acteurs de ces réseaux donne lieu à un certain nombre de problématiques comme la découverte de pôles d'influence, le choix des diffuseurs initiaux pour une diffusion maximale, ou encore l'identification des vecteurs de communication entre les acteurs à supprimer pour limiter la diffusion.

L'informatique, en tant que science du traitement automatique des informations, est une des nombreuses branches de la science – telles que la sociologie, la psychologie cognitive ou encore les sciences de la communication et de l'information – qui cherchent à apporter des solutions au problème de l'étude des phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux. Grâce à l'augmentation des capacités de calcul, la simulation sociale orientée agents est devenue une technologie de choix pour construire des outils d'analyse pour la gestion des systèmes sociaux complexes. Les modèles produits sont utilisés pour produire des résultats de plus en plus réalistes. La question de l'intégration de grand volume de données (démographiques, environnementales ou géographiques) dans ces modèles devient de plus en plus cruciale. Dans ces modèles, l'évolution des simulations est en grande partie due aux agents sociaux qui représentent des individus dont le comportement est fortement déterminé par leurs attributs, leurs liens avec les autres agents et leur position dans les mondes artificiels qu'ils peuplent. La modélisation multidimensionnels est appropriée aux réseaux sociaux multiplexes dont les dimensions représentent chacune une des relations sociales entre deux individus. Un autre domaine très important après la phase de simulation des phénomènes de diffusion est celui de l'exploitation de données générées. Il permet de mieux comprendre l'évolution humaine (Aggarwal and Wang 2011). L'analyse et le traitement de données peut nous aider à développer des outils favorisant une distribution et une consommation plus efficace de l'information.

En résumé, les aspects de la modélisation d'organisation et de processus sont traités en recherche. Mais, fréquemment, les échanges informels sont ignorés où la formalisation des mécanismes d'interaction entre les entités est peu détaillée. De plus, ces modèles ne présentent généralement qu'une vue statique des problèmes. De ce constat, nous nous intéressons aux communications informelles et en détail, à la manière dont se propage l'information dans le temps au sein des réseaux sociaux et plus particulièrement à la façon dont les acteurs agissent pour diffuser cette information ainsi que l'impact de cette dernière sur leur comportement. Nous présenterons dans ces travaux une architecture de simulation permettant de simuler la propagation et l'influence d'information au sein d'un réseau social multiplexe.

2> Enjeux de recherche et contributions

Dans nos travaux, nous nous intéressons à quatre problématiques qui découlent du phénomène de la propagation d'information au sein d'un réseau social : (i) modéliser la diffusion de l'information, (ii) formaliser le comportement des individus afin de simuler l'évolution et la dynamique de leurs comportements, (iii) identifier des utilisateurs influençant la diffusion de l'information par la simulation et (iv) étudier le processus de la diffusion dans un réseau social multiplexe par la simulation. Les contributions apportées par nos travaux sont les suivantes :

- Une librairie de modèles formels des différents acteurs impliqués dans un processus de diffusion.
- Un modèle qui combine les deux processus dynamiques (réseau et diffusion) et qui permet de modéliser différents types de propagation.
- Une architecture de simulation pour simuler l'interaction des acteurs au sein d'un réseau multidimensionnel.
- Une maquette qui permet de générer, de modéliser et de simuler les phénomènes de propagation au sein d'un réseau social.

Les problèmes identifiés ci-dessus seront détaillés dans les sections suivantes.

2.1 Modéliser et prévoir la propagation de l'information

Le travail sur la modélisation et la simulation des phénomènes de propagation est motivé par l'utilité et l'intérêt de pouvoir anticiper la réaction des individus à un évènement spécifique. La prédiction du phénomène de propagation de l'information au sein d'un réseau social est une tâche qui suscite un fort intérêt de la part des chercheurs en sociologie ou fouille de données. Cependant, la manière dont cette tâche est abordée dans la littérature fait que nous en savons encore peu à propos des facteurs qui sous-tendent le processus de diffusion au sein des réseaux sociaux. Egalement, l'étude des phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux dynamiques et multiplexes par la simulation est très peu exploitée. Cela nous amène donc à formuler les questions suivantes. D'une part, quels facteurs influent sur la diffusion de l'information au sein d'une population ? D'autre part, comment la structure des réseaux impacte le processus de diffusion ? Répondre à ces questions nous permettrait de mieux comprendre le phénomène de propagation au sein des réseaux sociaux et nous permettrait de mieux l'anticiper – ce qui serait utile dans le cadre de la communication de crise, du marketing viral, de la gestion stratégique des organisations, etc. Dans ce contexte de recherche, nous proposons un modèle de propagation basé sur les caractéristiques des individus et de la structure du réseau pour

prévoir la propagation de l'information et son impact sur les récepteurs. Le modèle est séparé en deux parties ; la première consiste à modéliser le processus de diffusion et la deuxième partie modélise l'influence et l'impact de processus sur le comportement des récepteurs. Notre objectif et de modéliser et simuler les différents liens d'interconnexions entre les individus, à savoir les liens d'amitiés, de voisinage, de famille, de travail, etc.

2.2 Formalisation des agents

En utilisant un modèle à base d'agents, nous démontrons que l'individu est très important pour modéliser, simuler et expliquer les phénomènes de propagation. Nous constatons que les librairies d'agents prédéfinies limitent la réutilisabilité de ces modèles dans d'autres applications. Nous nous intéressons à la formalisation des modèles d'agents par un formalisme hiérarchique, qui manipule les concepts de structure et qui s'appuie sur la notion du temps dans le but de réaliser des modèles qui n'accomplissent qu'un seul type d'action afin de diminuer sa complexité. Le couplage des modèles va gérer alors les interactions entre ces différentes entités. Ce cadre de bas niveau permet un contrôle complet des modèles des agents; il favorise également la modularité et la réutilisabilité de ces modèles.

2.3 Maquette de simulation des phénomènes de propagation

De nombreux acteurs de la société comme les entreprises, les organismes (gouvernementaux, communautaires, privés), la défense cherchent à exploiter et analyser les phénomènes de propagation à des fins diverses (ex. analyser la réaction des consommateurs à propos de certains produits et les promouvoir, détecter des informations et utilisateurs dangereux, détecter des évènements importants et interroger les utilisateurs). Cependant, nous constatons que peu d'outils permettent une analyse des réseaux dynamiques (structure de réseau dynamique ou comportement de nœud variable) et les chercheurs qui développent de telles méthodes proposent des implémentations différentes. Cela nous amène à formuler les deux questions suivantes. D'une part, comment permettre à des non-experts de modéliser et de simuler efficacement des phénomènes de propagation et aussi d'analyser les résultats de la simulation ? D'autre part, comment favoriser le partage et la réutilisation des implémentations des méthodes nécessaires à cette opération ? Les réponses à ces questions vont permettre aux utilisateurs de partager leurs nouvelles méthodes et de réutiliser les méthodes existantes. L'impact souhaité de ce travail est de proposer une structure de simulation pour les réseaux multicouches basée sur un formalisme séparant la phase de modélisation et celle d'implémentation. Ce cadre de bas niveau permet un contrôle complet des modèles à base d'agents; il favorise également la modularité et la réutilisabilité des modèles. Cette

nouvelle architecture est entièrement dédié à simuler, de manière aussi transparente que possible, la propagation de l'information au sein d'une population ainsi qu'elle permet de séparer le comportement individuel et la perception de l'environnement. A ce niveau, les mécanismes mis en œuvre dans les modèles sont facilement extensibles par les modélisateurs.

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du projet **SICOMORES**[1] (*Simulation Constructive et Modélisation des effets des Opérations d'influence dans les réseaux Sociaux*) financé le dispositif RAPID DGA (Direction Générale de l'Armement).

3> Structure du manuscrit

La Figure 1 présente l'organisation du document en réponse aux problèmes étudiés. La suite de ce manuscrit est organisée comme suit. Le chapitre 2 aborde des notions générales à propos de la théorie de la modélisation et de la simulation, des réseaux sociaux, de la propagation de l'information et de la recherche menée sur ces sujets dans plusieurs domaines. Nous consacrons ensuite deux chapitres pour les problématiques évoquées précédemment. À chaque fois, nous développons l'état de l'art avant de présenter notre contribution. Le chapitre 3 présente la contribution concernant la spécification des entités d'un réseau social et aussi la modélisation du phénomène de propagation de l'information au sein des réseaux sociaux dynamiques et multiplexes. Le chapitre 4 est consacré à la maquette de simulation des phénomènes de propagation à base d'agents et qui permet aussi de visualiser et d'analyser les résultats de simulation afin d'identifier les membres jouant des rôles importants dans la diffusion de l'information. Dans le chapitre 5 nous présentons deux cas d'étude ; le premier consiste à modéliser et simuler des opérations d'influence militaires et de prédire la réaction des agents face à la propagation de ces opérations au sein d'un réseau social. Le deuxième est consacré au management des organisations et de la gestion des crises. Enfin, le chapitre 6 conclut ce manuscrit de thèse.

[1] Description du projet SICOMORES : http://masa-group.biz/projects/sicomores/

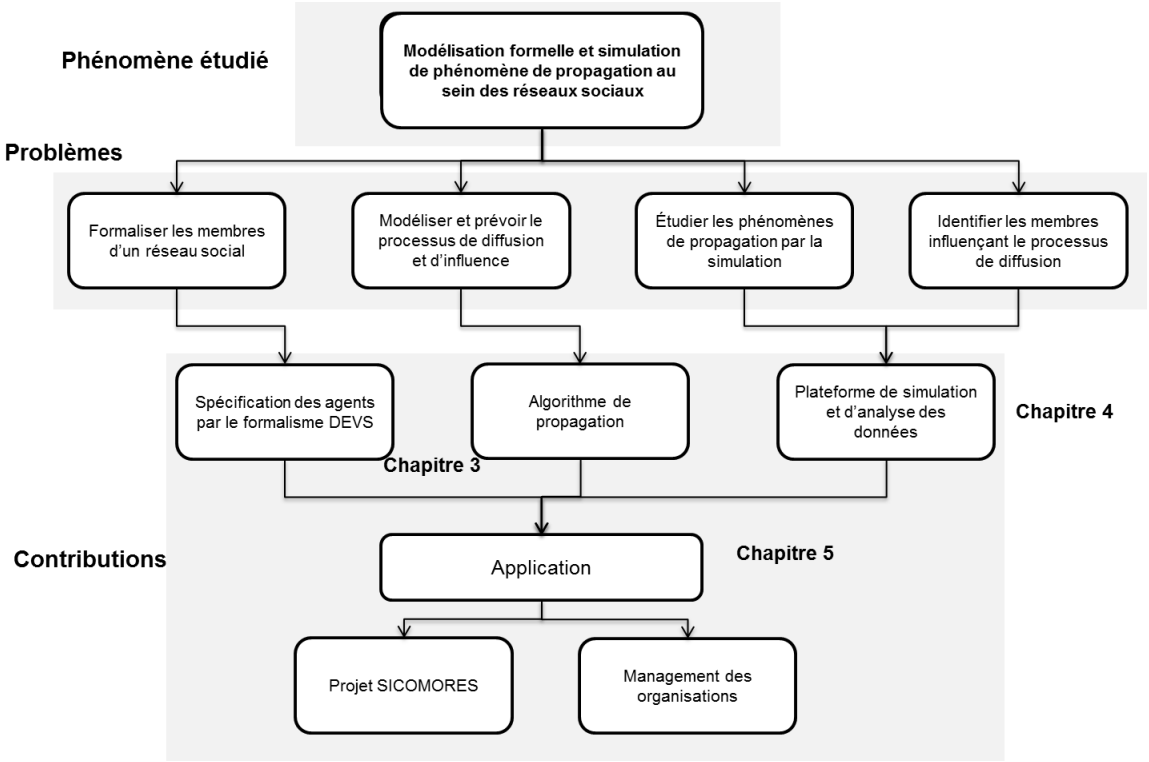


Figure 1. Structuration des travaux de thèse. De haut en bas : le phénomène étudié, les problématiques de recherche et les contributions apportées.

4> Publications

Les idées et résultats présentés dans ce manuscrit ont été validés par des publications citées ci-dessous. L'idée concernant l'utilisation du formalisme DEVS pour la représentation des acteurs d'un réseau social a été présentée dans la publication C1. Les publications C2 et J1 valident l'idée d'utiliser un niveau bas et hiérarchique de modélisation détaillée dans la première partie du chapitre 3. Ensuite, nous avons proposé une architecture flexible et extensible basée sur le formalisme DEVS pour la modélisation et la simulation d'un réseau social multicouche. Cette idée a été discutée avec différentes applications dans les publications C3, C4, C5 et C6. Nous avons aussi travaillé sur un algorithme de propagation au sein des réseaux sociaux multicouches que nous avons publié dans B1et C8. La partie génération des réseaux sociaux multicouches pour la simulation a été publiée dans C7. Finalement, les derniers travaux concernant la modélisation et la simulation de la propagation d'information et son impact dans le cadre d'une opération militaire détaillé dans notre manuscrit dans le chapitre 5 ont été soumis dans le journal J2.

- **Revues internationales**

J1 Youssef Bouanan, Grégory Zacharewicz, Bruno Vallespir. *DEVS modelling and simulation of human social interaction and influence*. (Impact Factor. 2014 : 2.21).
Engineering Applications of Artificial Intelligence – Vol. 50, P. 83-92, 2016.

J2 Youssef Bouanan, Grégory Zacharewicz, Bruno Vallespir. *DEVS-based framework for message dissemination in multi-layer networks*. (submitted in February 2016)
Simulation : Transaction of the Society for Modeling and Simulation International.

- **Chapitres d'ouvrage**

B1 Youssef Bouanan, Mathilde Forestier., Judicael Ribault, Gregory Zacharewicz, Bruno Vallespir, 2016. *Diffusion Process in a Multi-dimension Networks: Generating, Modelling and Simulation*. (approved with minor modifications).
Lecture Notes in Social Networks (LNSN), Springer International Publishing.

- **Conférences internationales**

C1 Youssef Bouanan, Merouane Bouhamidi El Alaoui, Grégory Zacharewicz, Bruno Vallespir, *Using DEVS and CELL-DEVS for Modelling of Information Impact on Individuals in Social Network*, in Advances in Production Management Systems. 2014, Springer. p. 409-416.

APMS'14 – Proceding of Springer International Conference on Advances in Production Management Systems.

C2 Youssef Bouanan, Grégory Zacharewicz, Bruno Vallespir. *Modelling Of Social Influence With Devs And Cell-Devs Formalism*.
I3M'14 - The 11th International Multidisciplinary M&S Multiconference. 2014.

C3 Youssef Bouanan, Judicael Ribault, Mathilde Forestier., Gregory Zacharewicz, Bruno Vallespir*, Modeling and simulation of human reaction in a Multidimensional Social Network*. IFAC, Vol. 48, N. 3, P. 592-597, 2015.
INCOM'15 - 15th IFAC Symposium on Information Control in manufacturing,

C4 Youssef Bouanan, Mathilde Forestier., Judicael Ribault, Gregory Zacharewicz, Bruno Vallespir*, DEVS-based framework for message dissemination in multi-layer networks*.
I3M'15 - The 12th International Multidisciplinary Modelling & Simulation Multiconference, Sep 2015, Bergeggi, Italy.

C5 Youssef Bouanan, Mathilde Forestier., Judicael Ribault, Gregory Zacharewicz, Bruno Vallespir., Saikou Diallo, *DEVS based Network: Modeling and Simulation of Propagation Processes in a Multi-Layers Network.*
SpringSim'16 - SMSCIAAS, 2016, Pasadena, CA, USA.

C6 Cristina Ruiz-Martin, Youssef Bouanan, Gabriel Wainer, Gregory Zacharewicz, Adolfo López Paredes, *A Hybrid Approach to Study Communication in Emergency Plans*.
Winter Simulation Conference. 2016, Washington, D.C. VA, USA.

C7 Mathilde Forestier, Jean-Yves Bergier, Youssef Bouanan, Judicael Ribault, Gregory Zacharewicz, Bruno Vallespir, Colette Faucher, *Generating Multidimensional Social Network to Simulate the Propagation of Information***.** In Proceedings of the 2015 IEEE/ACM.
ASONAM 2015 - Advances in SOcial Networks Analysis and Mining, 2015, Paris, France.

- **<u>Conférence nationale</u>**

C8 Youssef Bouanan, Judicael Ribault, Gregory Zacharewicz, Bruno Vallespir., 2016 *Phénomènes de Diffusion au sein des Réseaux Sociaux Multicouches: Modélisation et Simulation.*
JDF'16 - Les journées DEVS francophones : Théorie et Applications, 2016, Corse, France.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Résumé

Ce chapitre propose un état de l'art de la modélisation et de la simulation des phénomènes de propagation. D'abord, nous présenterons les principaux concepts de la modélisation et de la simulation. Ensuite, nous développerons, en particulier, la modélisation à événements discrets et la simulation de ces modèles. Enfin, présenterons les modèles de propagation et d'influence.

Table des matières

Chapitre 2 : Etat de l'art....11
1> Théorie de la Modélisation et Simulation....12
1.1 Introduction à la modélisation et simulation....12
1.2 Les formalismes de spécification des systèmes....13
1.2.1 Les Formalismes de spécification....14
1.2.2 Le Formalisme DEVS....15
1.3 Modélisation basée agents....20
1.3.1 Systèmes Multi-Agents....20
1.3.2 Simulation sociale orientée agents....23
1.3.3 Etudier le lien micro-macro....24
1.4 Vérification et Validation des modèles de simulation....25
2> Propagation et interaction sociale au sein d'un réseau....27
2.1 Structure et réseaux sociaux....27
2.1.1 Définitions et notations....27
2.1.2 Mesure....27
2.1.3 Structures et modèles de génération....29
2.2 Modélisation des phénomènes de propagation....32
2.2.1 Les modèles à compartiments....33
2.2.2 Les modèles basés sur les réseaux....36
3> Synthèse....40

1> Théorie de la Modélisation et de la Simulation

1.1 Introduction à la modélisation et simulation

La première étape vers le développement d'un système est de construire un modèle de ce système. On ne résout pas un problème directement sur un système réel, mais toujours au travers d'un modèle que nous construisons de ce système. « Un modèle M d'un système S pour une expérimentation E est toute chose à laquelle on peut appliquer E pour répondre à des questions concernant S » (Minsky 1970). Le terme modèle désigne potentiellement plusieurs choses différentes, comme par exemple la description abstraite ou concrète du phénomène à simuler, la technique mise en œuvre pour le faire, etc.

Les chercheurs offrent des définitions légèrement différentes de la modélisation : Parmi eux nous citons : Fishman (Fishman 1973), Fishwick et al (Fishwick and Zeigler 1992), Zeigler (Zeigler, Praehofer et al. 2000) et Kelton et al. (Kelton and Law 2000).

Tableau 1: Définition de la modélisation.

Chercheurs	Définition
Fishman (1973)	*« Une représentation formelle de la théorie d'une observation empirique »*
Fishwick et al (1992)	*« Modéliser c'est abstraire de la réalité une description d'un système dynamique »*
Zeigler et al (2000)	*« La modélisation est un processus par lequel on organise les connaissances portant sur un système donné »*
Kelton et al (2007)	*« Un modèle est juste un ensemble d'approximations et des hypothèses, à la fois structurelles et quantitatives sur la façon dont le système fonctionne ou va fonctionner. »*

Cependant, ils semblent arriver à la même conclusion : « *La modélisation est un processus d'abstraction d'un problème du monde réel grâce à des outils de modélisation en vue de résoudre les problèmes qui vont survenir dans le monde réel.* »

Dans le contexte de la modélisation et de la simulation (M&S), les spécifications des systèmes sont classiquement décrites à un haut niveau. Ces spécifications peuvent être décrites par un jeu d'instructions, de règles, d'équations, ou de contraintes pour produire un comportement

d'entrée/sortie, ce comportement a pour objectif de produire des données de valeurs proches des données observées sur le système réel.

Une modélisation « réussie » peut être vue comme une simplification valide. Il est nécessaire de simplifier, ou de réduire la complexité d'un modèle, pour que celui-ci puisse être exécuté sur un simulateur vu comme une ressource de calcul limitée. Une relation de préservation ou morphisme d'un système établit une correspondance entre un système « concret » et un système « abstrait » ou simplifié, le modèle abstrait étant le substitut du modèle concret. B.P. Zeigler utilise les notions de base model et lumped model. Le modèle concret est ici un modèle plus capable dans le sens qu'il est utilisable pour un plus grand nombre de cadres expérimentaux.

1.2 Les formalismes de spécification des systèmes

Il existe deux classes de méthodes de résolution de problèmes. Les méthodes analytiques et les méthodes basées sur la simulation. Les premières permettent de rechercher une solution générale mais se heurtent au problème de la complexité du modèle. Les méthodes basées sur la simulation permettent de traiter des modèles plus complexes, mais se limitent à des solutions particulières (ex. la connaissance des phénomènes ne peut être obtenue que par l'expérimentation).

B.P. Zeigler (Zeigler, Praehofer et al. 2000) présente une structure pour la M&S (Figure 2), il y définit les entités essentielles et leurs rapports primordiaux dans la définition d'une M&S. En effet, les termes « modèle » et « simulateur » sont souvent utilisés dans la pratique actuelle sans toujours un réel fondement ; cette structure identifie les questions de base et les problèmes rencontrés dans l'exécution des activités de M&S, ils peuvent ainsi être mieux compris et générer des solutions plus cohérentes. Il est donc important de comprendre ce qui est inclus et exclu des définitions. Les entités de la structure sont : le *système source*, le *cadre expérimental*, le *modèle,* et le *simulateur* ; ils sont reliés par les relations de *modélisation* et de *simulation*. Chaque entité est formellement caractérisée comme un système à un niveau approprié de spécification d'un système dynamique générique.

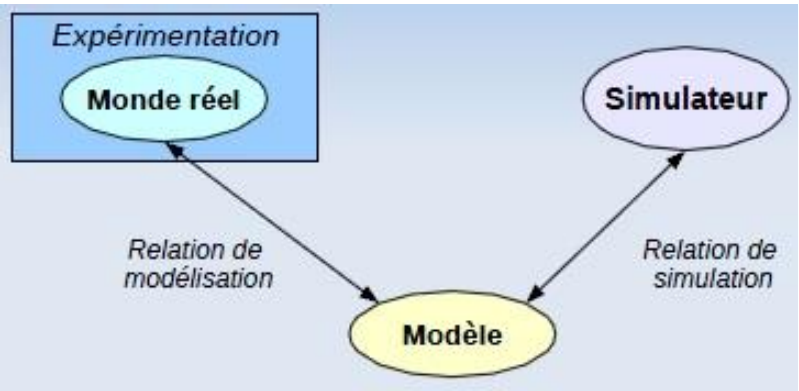


Figure 2. Relations de Modélisation.

1.2.1 Les Formalismes de spécification

Les différents formalismes pour représenter un système résultent de la combinaison des classifications de l'espace et du temps. La Figure 3 extraite des cours de N.Giambiasi et citée dans (Zacharewicz 2006) présente ces formalismes.

Formalisme à équations différentielles : Association d'une base de temps et de variables également continues, les équations définissent les changements d'états.

Formalisme à temps discret : Les variables sont ici continues, l'évolution est définie par pas temporels discrets. Ce formalisme est également nommé équation aux différences.

Formalisme à événements discrets : Association d'une base de temps continue et de changements d'états discrets. Les changements de valeurs des variables, appelés « **événements** », se produisent à des instants nommés « **date d'occurrence** » d'événements, ces dates sont des nombres réels non négatifs. L'évolution de l'état du modèle survient suite au traitement d'un événement à un instant quelconque.

Formalisme à états discrets et temps discret : Association d'une base de temps discrète et de variables d'état discrètes, également nommé machine à états finis synchrones.

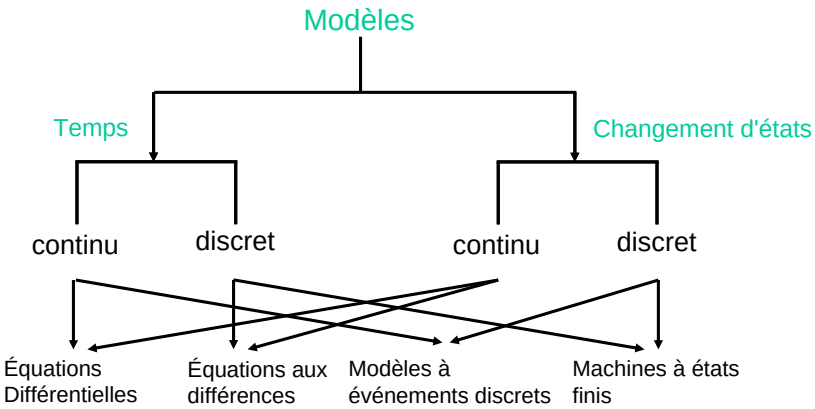


Figure 3. Différents types de modèles.

Il faut garder à l'esprit que la simulation sur calculateur implique la discrétisation du temps, de l'espace ou des deux (Giambiasi and Ghosh 2001). Certains formalismes présentés ci-dessus possèdent déjà une composante discrète, dans le cas contraire, il faudra réaliser la discrétisation du temps ou de l'espace. Pour les modèles décrits par des équations différentielles, le temps est discrétisé dans les techniques d'intégration numérique.

Les théories de la modélisation et de la simulation s'appuient sur une approche systémique où un système est considéré comme une entité traversée par la matière, l'énergie ou les flux d'information. Cette entité est spécifiée dans une formalisation mathématique sous la forme d'un ensemble d'état et de fonctions affectant cet état. Cette structure est appelée modèle atomique dans le sens où il ne peut être décomposé. Ces modèles atomiques peuvent être combinés par couplage pour former un modèle couplé. Les modèles atomiques sont utilisés pour développer le comportement des modèles ; les modèles couplés, sont utilisés pour coupler des modèles entre eux et définir une hiérarchie de modèles. Le formalisme DEVS par exemple est un formalisme abstrait qui offre une vision modulaire et hiérarchique des systèmes dynamiques. Les principales caractéristiques de DEVS sont décrites dans la section suivante.

1.2.2 Le Formalisme DEVS

B.P. Zeigler (Zeigler, Praehofer et al. 2000) proposa le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification) dans les années 70 pour permettre la formalisation de modèles modulaires et hiérarchiques. Ce formalisme est basé sur la théorie des systèmes; il permet une représentation formelle de modèles susceptibles de manipulations mathématiques comparables aux équations différentielles pour les systèmes continus. Il est possible de procéder à des vérifications formelles de modèles DEVS, ce qui est une aide précieuse lors de la conception du modèle (Freigassner, Praehofer et al. 2000) .

1.2.2.1 Modèles DEVS

Zeigler définit deux types de modèles différents :

Modèle atomique, il décrit l'aspect comportemental des systèmes. Il est non décomposable et constitue l'objet fondamental pour la modélisation DEVS. Il est défini par un ensemble d'états et de transition entre ces états. (Figure 4)

Les modèles atomiques sont définis comme ci-dessous :

$$AM :< X ; Y ; S ; ta ; \delta_{ext} ; \delta_{int} ; \lambda >$$

Avec:

- X : est l'ensemble des valeurs d'entrée du modèle caractérisé par les informations suivantes port, temps, valeur. Le port dit sur qui l'évènement

arrive, le temps est la date d'occurrence de l'évènement, il est vide pour des évènements internes et la valeur symbolise les données de l'évènement ;

- Y : est l'ensemble des valeurs des évènements sortants ;
- S : est l'ensemble des états partiels ou séquentiels incluant les variables d'états ;
- ta : S → τ/∞ : est la fonction d'avancement du temps qui est utilisée pour déterminer la durée de vie de l'état ;
- δ_{ext} : Q → X → S : est la fonction de transition externe qui définit comment un message d'entrée X peut changer l'état du système, ou Q = (s, te) | s ∈ S, te ∈ (T ∩ [0, ta(s)] est l'ensemble des états, et te est le temps écoulé depuis le dernier évènement ;
- δ_{int} : S → S : est la fonction de transition interne qui définit comment un état du système change de façon interne quand le temps écoulé atteint la durée de vie de l'état ;
- λ : S → Yι : est la fonction de sortie qui définit comment un état du système génère des évènements de sortie quand le temps écoulé atteint la durée de vie de l'état.

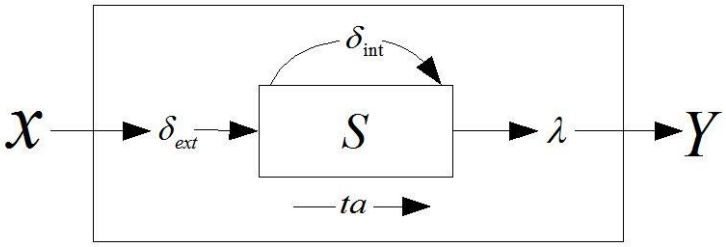


Figure 4. Exemple de modèle atomique.

Modèle couplé, il représente l'aspect structurel. Il est possible pour un modèle couplé de comprendre un ou plusieurs modèles atomiques ou couplés. Il peut aussi être représenté par un modèle atomique unique.

Les modèles couplés sont définis comme ci-dessous :

CM :< XM, YM, CM, EIC, EOC, IC, Select >

Avec :

- *XM* : tous les ports d'entrée ;
- *YM* : tous les ports de sortie ;
- *CM* : la liste des modèles formant le modèle couplé ;
- *EIC* : tous les couplages qui connectent les entrées du modèle couplé à ses composants ;
- *EOC* : tous les couplages qui connectent les sorties du modèle couplé à ses composants ;

- *IC* : tous les couplages internes qui connectent les composants entre eux ;
- Select : définit une priorité entre événements simultanés destinés à des composants différents.

1.2.2.2 Spécialisation de DEVS

Le formalisme DEVS est fréquemment adapté ou spécialisé lorsqu'il est placé dans le contexte spécifique d'un domaine d'application. Le formalisme étant souvent trop abstrait, il est nécessaire d'enrichir sa syntaxe pour permettre de cadrer et simplifier la spécification de types de modèles particuliers.

Pour cela un grand nombre de techniques dérivées sont l'objet de recherche. Parmi ces techniques, certaines se révèlent utiles pour le domaine d'étude des systèmes complexes : FDEVS (Kofman, Giambiasi et al. 2000) pour l'étude de modèles pouvant admettre des comportements ou une structure tolérante aux fautes, DS-DEVS (Barros 1997) pour la modélisation et la simulation de modèles à structure variable, G-DEVS (Giambiasi, Escude et al. 2001) pour l'étude par abstraction polynomiale de systèmes hybrides continus/discrets ou encore Fuzzy-DEVS (Kwon, Park et al. 1996) qui permet l'expression de modèles DEVS en utilisant la logique floue. Les formalismes dérivés ont tous été développés pour aider à résoudre des problèmes dans des domaines spécifiques. Certaines de ces techniques, telles que Cell-DEVS (Wainer and Giambiasi 2001) pour la simulation d'automates cellulaires ou JAMES (Schattenberg and Uhrmacher 2001) pour la modélisation de systèmes multi-agents, sont l'adaptation de techniques de modélisation au formalisme DEVS. Elles prouvent qu'une grande variété de techniques peuvent être adaptées dans ce formalisme. Néanmoins, malgré les possibilités évidentes de couplage entre ces différentes techniques utilisant une sémantique semblable, une seule est généralement disponible dans chaque outil de modélisation actuel. Or plus la complexité et la taille du système à modéliser augmente, plus il est nécessaire d'associer les techniques de modélisation.

Un modèle d'un type spécifique est en général mieux adapté pour la simulation d'une partie du système ou pour une vue spécifique du système. La composition de différents types de modèles et leur abstraction à différents niveaux est donc indispensable pour pouvoir étudier un système dans son ensemble. Une telle association de modèles est appelée multi-modélisation.

1.2.2.3 Environnements de modélisation et simulation DEVS

Il existe plusieurs simulateurs DEVS. Chaque simulateur DEVS a une certaine particularité qui le rend plus performant dans certains domaines, tout comme les spécialisations de DEVS (Parallèle DEVS, Dynamique DEVS, Cell-DEVS, etc.). L'existence d'un simulateur DEVS abstrait donne plus de liberté aux chercheurs pour l'amélioration des performances des environnements de modélisation et simulation DEVS. Un simulateur ne met pas en œuvre le formalisme si les résultats de simulation ne sont pas

conformes aux résultats du simulateur abstrait. Dans la suite de cette partie, nous détaillerons les spécificités de quelques simulateurs DEVS.

- ***Simulateurs***

ADEVS (A Discrete EVent Simulation) (Nutaro) est un simulateur principalement centré sur la performance et la légèreté. Le noyau de simulation est codé en C ++ et réutilise intensivement les modèles. Cet outil a été développé par l'équipe de Zeigler à l'université d'Arizona. Il offre un ensemble de librairies extensibles pour l'implémentation des modèles DEVS spécifiés.

CD ++ est un outil développé en C ++, qui permet la définition de modèles DEVS atomiques et Cell-DEVS (Wainer 2002). Cet outil permet également la définition de modèles DEVS et Cell-DEVS couplés en utilisant un langage de spécification de haut niveau. Différentes versions sont proposées incluant des simulateurs à temps réel, parallèles ou centralisés. Cet outil a été développé par Gabriel Wainer et son équipe, en partenariat avec les universités de Carleton (Canada), et Buenos Aires (Argentine).

DEVS-Suite (Kim, Sarjoughian et al. 2009) est développé en Java. Il est le successeur du DEVSJava. DEVS-Suite contient un Viewer de simulation supplémentaire et un environnement de suivi. Comme il est codé en Java, il présente une portabilité beaucoup plus élevée à la fois pour le simulateur et les modèles générés.

MS4 Me (Seo, Zeigler et al. 2013) est basé sur la plate-forme Eclipse. Cet outil est commercial et ses sources sont fermées. Ce simulateur est codé en Java et contient de nombreuses fonctionnalités, comme une interface graphique, IDE, Viewer de simulation, etc.

JDEVS (Filippi and Bisgambiglia 2004) permet d'utiliser des modèles à événements discrets, dans un but général. Il peut être utilisé pour des représentations objet, la modélisation basée sur les composants, le développement de modèles de simulation connectés avec des systèmes d'information géographique (SIG), ou des systèmes collaboratifs. Il intègre un outil de modélisation et d'exécution visuel. Il a été développé par l'équipe de Jean-Baptiste Filippi de l'Université Pascal Paoli à Corte.

Python DEVS (Van Tendeloo and Vangheluwe 2014) est un simulateur codé en Python tout comme les modèles. Il a une petite base de code et il est extrêmement léger. Cet outil a été développé au sein du Modelling, Simulation and Design Lab (MSDL) de l'Université McGill à Montréal, Canada.

L'environnement VLE (Virtual Laboratory Environment) (Quesnel, Duboz et al. 2009), développé au sein du Laboratoire d'Informatique du Littoral (LIL) de l'Université du Littoral, offre un gain majeur en temps pour le développement des modèles à moindre erreur de codage. D'autres fonctionnalités font partie de cet environnement comme la définition des schémas d'expérimentation pour le chargement des données de la simulation,

la sauvegarde des modèles en XML, etc. Il permet de spécifier des systèmes complexes en termes d'objets et d'agents réactifs, de simuler la dynamique du système et d'analyser les résultats des simulations. Les librairies fournies permettent également le développement de programmes personnalisés.

- ***Analyse***

Pour tester la performance et la spécificité de chaque simulateur, il faut implémenter un modèle spécifique sous chaque environnement. Nous présentons ici les résultats de l'étude faite par Y. Van Tendeloo qui compare l'efficacité de quelques simulateurs DEVS (Van Tendeloo 2013).

Dans (Van Tendeloo 2013), l'auteur s'est basé sur plusieurs critères afin de comparer l'efficacité de quelques environnements DEVS. Le résultat général de la comparaison est résumé dans le Tableau 2. Le détail de cette étude est décrit dans le rapport (Van Tendeloo 2013).

Tableau 2. Comparaison Générale de quelques simulateurs DEVS (Van Tendeloo 2013).

	ADEVS	CD++	DEVS-Suite	MS4 Me	PyDEVS	VLE
Formalisme	DynDEVS	Cell-DEVS	PDEVS	PDEVS	CDEVS	DSDE
Environnement de développement	Non	Optionnel	Non	Oui	Non	Optionnel
Interface Graphique	Non	Optionnel	Oui	Oui	Non	Optionnel
Parallèle	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Distribué	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui
Condition d'arrêt	Temps	Temps	Evènement	Temps/Even	Fonction	Temps
Performance	Rapide	Moyen	Long	Moyen	Long	Rapide
interactivité	Non	fichier	GUI	GUI	Non	Non
débogage	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Simple	Simple
Mise en application	Non	Non	Non	Partiel	Non	Oui

1.3 Modélisation basée agents

1.3.1 Systèmes Multi-Agents

Les Systèmes multi-agents (SMA) relèvent plus généralement d'une approche dite individu-centrée, qui considère que les phénomènes que l'on observe à un certain niveau d'organisation sont le résultat des interactions qui se produisent entre les entités élémentaires qui composent ce niveau. Dans le cas des SMA, l'accent est mis sur la modélisation des entités, agents, et sur les relations qu'ils entretiennent entre eux et avec l'environnement dans lequel ils se situent. Ils sont à ce titre un outil privilégié des sciences sociales, naturelles et cognitives pour modéliser et simuler des phénomènes dynamiques. Selon Ferber, un agent peut être considéré comme une entité autonome capable d'agir sur elle-même et sur son environnement. Son comportement est la conséquence de ses observations, de ses compétences et des interactions avec les autres agents (Ferber and Perrot 1995).

L'utilisation des Systèmes Multi-Agents (SMA) présente un ensemble d'avantages (Brandolese, Brun et al. 2000):

- *Système dynamique.* Les SMA héritent des bénéfices de l'Intelligence Artificielle au niveau du traitement symbolique (au niveau des connaissances). En revanche, contrairement aux approches traditionnelles de l'Intelligence Artificielle qui simulent, dans une certaine mesure, les capacités du comportement humain, les SMA permettent de modéliser un ensemble d'agents qui interagissent. Les agents sont structurés afin d'exercer une influence sur chacun pour faire évoluer le système dans son ensemble (système dynamique). On rencontre de nombreuses interactions entre agents telles que la coordination (organiser la résolution d'un problème de telle sorte que les interactions nuisibles soient évitées, ou que les interactions bénéfiques soient exploitées), la négociation (parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées), la coopération (travailler ensemble à la résolution d'un but commun) (Chaib-Draa, Jarras et al. 2001). Cette approche est particulièrement bien adaptée à la simulation des systèmes complexes dont le fonctionnement global émerge des actions des individus.

- *Nombre important d'agents.* L'approche basée sur les SMA permet de traiter un grand nombre d'entités contrairement à la théorie des jeux où rarement plus de trois acteurs sont représentés (Moss 2001).

- *Souplesse de l'outil informatique* qui permet de modifier le comportement des agents, ajouter ou supprimer des actions possibles, étendre les informations disponibles à l'ensemble des agents à la différence des modèles traditionnellement utilisés en science économique. Le modèle Multi-Agent est rendu opérationnel grâce à une implémentation informatique qui n'impose aucune exigence analytique spécifique mais l'emploi d'un langage informatique évolué (Langage Orienté Objet (LOO)) qui permet de développer le programme de façon modulaire. La programmation des

processus au niveau local dans différents modules et l'utilisation d'entités individualisées apportent alors une grande flexibilité. Les modifications ne nécessitent pas de large restructuration du programme.

- *Une résolution distribuée de problèmes.* Il est possible de décomposer un problème en sous parties et de résoudre chacune de façon indépendante pour aboutir en assemblant les résultats à une solution stable. Cette solution n'est pas forcement optimale au sens de la rationalité complète mais elle peut être « satisfaisante » au sens de Simon (Simon 1996).

Structure conceptuelle des agents

Un agent est situé dans un environnement. Pour modéliser la structure de l'agent, il faut avoir un modèle de l'environnement. L'environnement peut être vu comme étant dans un état ***e*** parmi un ensemble d'états $E= \{e_1, .., e, ..\}$ L'environnement peut changer son état soit d'une manière spontanée soit comme résultat des actions de l'agent.

Au niveau abstrait, on peut identifier trois types d'agents :

- **Les agents avec états**

Les agents avec états, comme leur nom l'indique, maintiennent un état interne qui mémorise la séquence des perceptions de l'agent et, dans certains cas, les actions effectuées par l'agent. L'agent a besoin de maintenir cet état interne pour faire la distinction entre des états de l'environnement qui lui semblent identiques selon la perception qu'il en a, mais qui sont néanmoins différents si additionné au comportement interne de l'agent. Soit : « $S= \{s_1, s_2, ...\}$ » l'ensemble des états internes de l'agent, « A » l'Action, « P » la Perception, « I » les Interactions et « E » représente l'Environnement. Dans ce cas, les fonctions de l'agent se modifient de la manière suivante :

- *Action :* **S -> A** est maintenant définie sur l'ensemble des états internes de l'agent, ce qui revient à dire que l'agent décide de l'action à effectuer en fonction de son état interne ;
- *Suiv :* **S x P -> S** est une nouvelle fonction qui modélise le changement de l'état interne de l'agent en fonction de ses perceptions et de l'état interne courant ;
- *Inter :* **S x P -> I** et ***rinter* : S x I -> A** sont modifiées pour montrer que la décision sur les interactions avec d'autres agents dépend aussi de l'état interne ;
- *Voir :* **E -> P** et ***env* : E x A -> P(E)** ne sont pas modifiées.

- **Agents avec buts**

Connaître l'état de l'environnement et la séquence des perceptions mémorisées dans l'état interne n'est pas toujours suffisant pour décider quelle est la meilleure action à effectuer à un moment donné. Pour fonctionner d'une manière efficace, l'agent doit essayer d'obtenir le maximum de performance et il doit donc choisir ses actions en conséquence.

Il y a plusieurs façons de définir la mesure de performance. Une première solution est d'indiquer à l'agent ce qu'il doit faire en toute circonstance pour avoir du succès. C'est le cas des agents réactifs, où le concepteur définit les règles condition-action pour chaque cas de perception sur l'environnement. Toutefois, puisque les agents intelligents sont autonomes et proactifs, on aimerait indiquer à notre agent ce qu'il faut faire, sans avoir à lui dire exactement comment le faire dans chaque situation. Dans ce cas, une deuxième solution pour définir la mesure de performance de l'agent est de fixer des états-but ou états désirables :

But : E -> {0, 1} est une fonction qui a la valeur 1 pour les états-but et 0 pour les autres.

Si les états-but sont connus d'avance, on peut définir l'ensemble B des buts de l'agent. Par exemple, un robot qui ramasse des objets sur une surface pour les transporter vers la base sait que l'état-but est l'état « parvenir à la base avec le maximum d'objets ». Si les états-but ne sont pas connus mais que l'on connaît uniquement certaines propriétés désirables de ces états, alors la fonction but évalue chaque état pour voir lequel possède ou non ces propriétés. Par exemple, si le robot ne connaît pas d'avance la position de la base mais qu'il peut la percevoir une fois arrivé près d'elle, le robot doit tester dans chaque position s'il est près de la base ou pas.

Une troisième solution pour définir la mesure de performance de l'agent est décrite dans ce qui suit.

- **Agents avec utilité**

La mesure de performance d'un agent peut être définie d'une manière plus fine en associant à chaque état de l'ensemble E une valeur réelle, l'utilité, qui mesure la désirabilité de cet état pour l'agent. On peut voir les états-but comme un cas particulier des états avec utilité, puisque cela correspond au cas où l'utilité ne peut prendre que les valeurs 1 et 0. Pour associer une utilité aux états, on introduit une nouvelle fonction :

Utilité : E -> R, où R est l'ensemble des nombres réels.

La fonction utilité est mieux adaptée que la fonction but dans deux situations. Premièrement, si l'agent a des buts contradictoires, par exemple Un agent veut aller au cinéma et étudier pour son prochain examen, la fonction utilité indique le but à choisir. Deuxièmement, si l'agent agit dans un environnement non déterministe, il n'est pas toujours certain de pouvoir atteindre ses buts. Dans ce cas, l'utilité des buts offre un moyen de rapporter la probabilité de succès à

l'importance des buts. En général, dans un environnement non déterministe, un agent va souvent avoir besoin de la fonction utilité pour prendre des décisions sur les diverses actions à effectuer tout en sachant que les résultats de ces actions ne sont pas certains.

1.3.2 Simulation sociale orientée agents

La simulation orientée agent est maintenant une solution largement utilisée pour la modélisation de phénomènes sociaux (Gilbert and Troitzsch 2005). C'est un domaine véritablement pluridisciplinaire qui s'est créé en intégrant les contributions de l'intelligence artificielle et de l'intelligence artificielle distribuée, de la théorie des systèmes complexes et des sciences sociales, sciences cognitives et sociologie en particulier. Si ces différentes disciplines ont largement contribué à la construction du domaine, la simulation sociale a fourni en retour à ces disciplines une nouvelle approche, de nouveaux outils et/ou une nouvelle méthodologie. Ces apports nouveaux ont fait évoluer les pratiques, le regard porté sur leurs objets d'étude respectifs et plus largement la compréhension que nous avons du monde dans lequel nous vivons.

La structure des SMA permet de modéliser des systèmes sociaux, en assimilant chaque individu ou groupe (foyer, entreprise ou autre) du monde réel à un agent, et en représentant les interactions entre ces agents. Chaque agent peut posséder ses caractéristiques spécifiques (hétérogénéité), et évoluera en fonction de son expérience propre. Un individu influence et subit l'influence des autres individus ; leurs interactions font émerger des phénomènes collectifs. C'est ce que l'on appelle les modèles basés agents (parmi les ouvrages récents, on notera (Gilbert 2008), (Phan and Amblard 2007) et (Axelrod 2006)). La modélisation basée agents (MBA) est par essence un domaine pluridisciplinaire, à l'interface entre les sciences sociales, les systèmes multi-agents, et la modélisation. La simulation basée agent (SBA) devient ainsi une voie importante dans l'étude des phénomènes sociaux (Axelrod 1997). A titre d'exemple, la MBA a été utilisée pour étudier des modèles biologiques, des comportements d'insectes ou de primates, ou l'apparition de villes (Treuil, Drogoul et al. 2008).

Tandis qu'un système multi-agents est une société d'agents développée pour remplir un but (Wooldridge 2009), la simulation sociale orientée agents utilise la métaphore sociale des agents pour reproduire une dynamique sociale. A chacune de ces approches correspond un ensemble de problématiques et d'outils propres. Le système multi-agents est conçu pour résoudre un problème, satisfaire un but, respecter des contraintes. Un modèle multi-agents cherche avant tout à reproduire pour mieux comprendre.

Traditionnellement, les scientifiques ont tenté de comprendre la vie sociale comme un système structuré d'institutions et de normes qui détermine le comportement individuel de haut en bas (du niveau macroscopique au niveau microscopique). L'utilisation de la macro-simulation reflète parfaitement cette idée qui a beaucoup été utilisée en sciences sociales. Cette technique de simulation se compose généralement d'ensembles d'équations différentielles qui permettent de prédire la distribution de la population en fonction d'autres facteurs

systémiques. Elle a souvent été perçue comme une mise en œuvre puissante de la modélisation mathématique (Conte, Gilbert et al. 1998), (Macy and Willer 2002), (Flache, Macy et al. 2005).

1.3.3 Etudier le lien micro-macro

Une nouvelle approche vise à modéliser l'émergence de la vie sociale du niveau micro au niveau macro en assumant que les phénomènes macroscopique ne se développent que par le comportement individuel sans l'intervention d'une entité institutionnelle de contrôle. Ces institutions ne spécifient pas les comportements individuels mais plutôt évoluent suite aux processus de rétroaction des acteurs individuels. La micro-simulation est une stratégie «bottom-up» pour la modélisation du comportement individuel. Cette stratégie de modélisation utilise des données sur des échantillons représentatifs d'individus et elle inclut des équations qui représentent le processus comportemental pour simuler l'évolution dans le temps de chaque individu. Ensuite, tous les développements individuels s'agrègent vers l'ensemble de la population. Ainsi les modèles de micro-simulation sont liés à la génération antérieure de modèles macro-simulation, mais ils représentent des changements de chaque élément de la population plutôt que des changements au niveau de la population globale (Lansing 2002), (Macy and Willer 2002), (Flache, Macy et al. 2005). En sociologie, le terme microsociologie se réfère à la sociologie de l'individu, isolé de ses groupes interactifs. Le niveau macro réfère à la généralité de personnes dans une situation (Cherkaoui 2003). La macrosociologie fait référence à l'étude d'une foule de phénomènes sociaux couvrant de vastes zones sur de longues périodes de temps. La microsociologie étudie des phénomènes spécifiques, impliquant uniquement des groupes limités d'individus, tels que les interactions familiales ou les relations de face-à-face (Cherkaoui 2001).

En résumé, Les théories et concepts de la macrosociologie utilisent des données agrégées, alors que ceux de la microsociologie sont confinés à l'échelle individuelle. Tenant compte de la nature et la topologie de la structure sociale on peut distinguer deux approches de la relation micro macro. Pour une structure sociale formelle, les caractéristiques au niveau macro peuvent être expliquées en analysant la structure et l'organisation du système au niveau macro. Cette approche consiste à analyser les effets dus à la nature de certaines variables sur le comportement des entités composant le système sans formuler d'hypothèses sur les individus (Cherkaoui 2001). Pour les autres sociétés, les caractéristiques et observations macroscopiques sont expliquées sur la base des effets agrégés des caractéristiques micro (Cherkaoui 2001).

Lorsque l'on étudie un système complexe, on peut le modéliser au niveau macro, comme un tout. Les expressions mathématiques s'avèrent particulièrement adaptées pour décrire ce niveau agrégatif. On peut également décomposer le système en un ensemble d'éléments, le réduire aux parties qui le composent. Avec la modélisation basée agent, le système est décomposé en agents et interactions entre agents. La simulation reproduit le phénomène d'émergence. Le modélisateur peut alors analyser le comportement du système à la fois au niveau individuel

(niveau microscopique) et au niveau collectif (niveau macroscopique). Les activités routinières d'une organisation ou d'un groupe contiennent normalement l'intégration des informations et des théories de niveau micro et macro dans la mesure où les cadres de vie quotidienne renvoient à plusieurs niveaux de complexité culturelle (Cicourel 2008).

Dans de nombreux cas, notamment dans les phénomènes de diffusion, les facteurs explicatifs du phénomène collectif résident au niveau individuel. Si l'on modélise ces phénomènes sociaux au niveau macroscopique, il est impossible de représenter ces facteurs explicatifs (compréhension d'une information par exemple). Selon Wickens, « les modèles agrégatifs décrivent à quoi les données ressemblent, mais pas d'où elles viennent » (Wickens 1982). Les modèles basés agents ont été introduits pour répondre à ce problème, ils permettent de travailler sur les deux échelles, en décrivant les facteurs explicatifs au niveau local et en vérifiant la dynamique émergeant des interactions.

1.4 Vérification et Validation des modèles de simulation

Les modèles de simulation sont de plus en plus utilisés pour résoudre des problèmes et pour aider à la prise de décision. Les développeurs et les utilisateurs de ces modèles, les décideurs qui se basent sur les informations obtenues à partir des résultats de ces modèles et les personnes touchées par des décisions basées sur ces modèles sont tous préoccupés à juste titre de savoir si un modèle et ses résultats sont « corrects ». Ce problème peut être surmonté par le processus de vérification et de validation des modèles. La vérification cherche d'abord à répondre à la question « Construisons-nous correctement le modèle ? ». Le but est de prouver la cohérence du modèle, de s'assurer de la bonne utilisation des moyens de modélisation et de rendre compte de la description des exigences qui ont prévalu à l'existence de ce modèle. Par définition, la vérification est "la confirmation par examen et apport de preuves tangibles (informations dont la véracité peut être démontrée, fondée sur des faits obtenus par observation, mesures, essais ou autres moyens) que les exigences spécifiées ont été satisfaites" (Standardization 1994). La validation cherche à répondre à la question « Construisons-nous le bon modèle ? ». Il s'agit ici de s'assurer de la pertinence du modèle, voire si possible d'une certaine forme de complétude au regard du système modélisé, de ses situations et de ses scénarios d'évolution. La validation se définit comme la « confirmation par examen et apport de preuves tangibles que les exigences particulières pour un usage spécifique prévu sont satisfaites. Plusieurs validations peuvent être effectuées s'il y a différents usages prévus » (Standardization 1994). Ainsi, la validation permet de lier le modèle à la réalité attendue ou perçue.

Un modèle devrait être développé dans un but précis (ou application) et sa validité déterminée par rapport à cet effet. Si le but d'un modèle est de répondre à une variété de questions, la validité du modèle doit être déterminée par rapport à chaque question. Plusieurs ensembles de conditions expérimentales sont généralement nécessaires pour définir le domaine de l'applicabilité d'un modèle.

Un modèle peut être valide pour un ensemble de conditions expérimentales et non valides pour les autres (Sargent 2005). Une variété de méthodes est utilisée pour valider des modèles de simulation, allant de la comparaison aux autres modèles jusqu'à l'utilisation des données générées par le système réel (par exemple, la validation prédictive) (Law 2009). Les méthodes les plus couramment utilisées sont décrites dans le Tableau 3.

À l'exception de la validité apparente, toutes les méthodes décrites dans le Tableau 3 sont des approches basées sur les données pour la validation de modèles de simulation. L'utilisation de la validation prédictive nécessite généralement une quantité importante d'efforts pour acquérir et analyser des données afin de supporter la validation de ces modèles.

Tableau 3. Méthodes de validation des modèles de simulation.

Méthode de validation des modèles de simulation	**Description**
Comparaison avec d'autres modèles	Divers résultats du modèle de simulation en cours de validation sont comparés aux résultats d'autres modèles (valides).
La validité apparente	Demander à des experts si le comportement du modèle est raisonnable ou non
Validation par les données historiques.	Si les données historiques existent, une partie des données est utilisée pour construire le modèle et les données restantes sont utilisées pour déterminer (tester) si le modèle se comporte comme le système.
La variabilité des paramètres – l'analyse de la sensibilité	Cette technique consiste à modifier les valeurs des paramètres d'entrée internes d'un modèle afin de déterminer l'effet sur le comportement du modèle de sortie. Les mêmes relations devraient se produire dans le modèle comme dans le système réel. Cette technique peut être utilisée qualitativement et quantitativement. Ces paramètres qui sont sensibles devraient être suffisamment précis avant d'utiliser le modèle.
Validation prédictive	Le modèle est utilisé pour prédire (prévisions) le comportement du système et ensuite le comportement du système et la prévision du modèle sont comparés pour déterminer s'ils sont les mêmes. Les données du système peuvent provenir d'un système opérationnel ou être obtenu en effectuant des expériences sur le système.

2> Propagation et interaction sociale au sein d'un réseau

2.1 Structure et réseaux sociaux

2.1.1 Définitions et notations

Un réseau désigne généralement un ensemble d'entités (hommes, animaux, machines, cellules, etc.), que l'on nomme les nœuds du réseau, reliées entre elles par un ensemble de connexions appelées liaisons ou liens. Un réseau est traditionnellement défini par un graphe $G = (V, E)$ dans lequel V est l'ensemble des nœuds et E l'ensemble des liaisons du réseau. E est un ensemble de couples de nœuds tel que $E \subseteq V \times V$. Ainsi, soient v_i et v_j deux nœuds du réseau, $v_i, v_j \in V$, si $e = (v_i, v_j) \in E$, alors il existe une liaison entre le nœud v_i et le nœud v_j dans G. Les nœuds v_i et v_j sont dits adjacents, ou encore connectés ou voisins.

Partant de cette définition de base, deux grandes familles de réseaux peuvent être distinguées :

• ***Les réseaux non-orientés :***

Dans un réseau non-orienté, l'ensemble des liens E est un ensemble de paires de nœuds (donc non ordonnées). Si les nœuds v_i et v_j sont connectés, il existe également un lien entre v_j et v_i. Pour un réseau contenant N nœuds, le nombre de liens maximal est de $N \times (N-1)/2$.

• ***Les réseaux orientés :***

Un réseau orienté est un réseau dont l'ensemble des liens E regroupe des couples de nœuds (donc ordonnés), appelés liens orientés. Dans un réseau orienté, la présence d'un lien $e_1 = (v_i, v_j)$ entre les nœuds v_i et v_j n'implique pas nécessairement l'existence d'un lien $e_2 = (v_j, v_i)$. Dans les représentations graphiques de tels réseaux, l'orientation du lien est généralement représentée par une flèche indiquant la direction du lien. Pour un réseau contenant N nœuds, le nombre de liens maximal est de $N \times (N-1)$. En plus de leur orientation, les réseaux peuvent posséder de nombreuses autres caractéristiques. Dans ce qui suit, nous présentons les caractéristiques les plus fréquemment décrites dans la littérature.

2.1.2 Mesure

L'analyse d'un réseau complexe de données réelles doit commencer par interroger la nature de la centralité qu'il faut prendre en compte, à savoir la centralité locale, ou la centralité globale. De nombreuses mesures ont été proposées pour décrire quantitativement la structure des réseaux. D'une façon générale, ces mesures caractérisent les réseaux à la fois d'un point de vue local, mais également d'un point de vue global (Boccaletti, Latora et al. 2006),(Börner, Sanyal et al. 2007). Les mesures locales s'intéressent uniquement aux propriétés des nœuds et des liens, alors que les mesures

globales considèrent l'ensemble du réseau à travers des propriétés principalement statistiques.

2.1.2.1 *Mesures locales*

Il existe une multitude de mesures pour caractériser localement les réseaux. Ce type de mesures a pour objectif d'apporter des informations sur le voisinage d'un nœud ou de mettre en évidence certaines propriétés structurelles.

- **Le degré** d'un nœud v_i dans un réseau G = (V, E), est le nombre de liaisons connectées à v_i. Il est noté k_{vi}. Dans un réseau orienté, on distingue généralement le degré entrant k_{in} du degré sortant k_{out}. Il apporte essentiellement une information sur la connectivité d'un nœud dans le réseau et permet de déterminer son rôle.
- **La centralité de degré** (Freeman 1978) est la forme la plus intuitive de toutes les mesures de centralité. Elle définit le nombre d'individus avec lesquels un nœud est lié directement et donc elle mesure l'importance d'un nœud qui est ici directement proportionnelle à sa valeur de centralité de degré. Cette mesure, exprime le nombre d'alternatives disponibles pour un acteur de la structure. Augmenter le nombre d'alternatives augmente le pouvoir d'un acteur. La centralité de degré est aussi appelée mesure de centralité locale (Scott 2012) car elle ne prend pas en compte la structure globale du graphe vu qu'elle est déterminée directement par le voisinage immédiat du nœud pris en considération.
- **La centralité de proximité** (Freeman 1978) est une mesure de centralité globale définie via le calcul de distance séparant un nœud des autres nœuds du graphe. Dans un réseau social, cette mesure exprime la notion d'effort : un acteur ayant une grande valeur de centralité de proximité est capable de contacter la majorité des acteurs du réseau avec un minimum d'effort, c'est-à-dire la distance à parcourir dans le réseau (ou le plus court chemin) en prenant en compte les liens directs et indirects. Cette mesure permet de déceler les cas particuliers d'agents qui, même peu connecté au réseau, sont centraux parce que reliés à plusieurs agents centraux de la structure.
- **La centralité d'intermédiaire** (Freeman 1978) mesure le nombre de fois où un nœud est l'intermédiaire sur le plus court chemin entre deux autres, il s'agit donc du degré de médiation d'un nœud sur les transferts d'information entre deux autres nœuds. Cette mesure paraît particulièrement appropriée dans l'étude du pouvoir dans les réseaux de communication parce que l'intermédiation permet la manipulation de l'information transmise. Finalement, la centralité de proximité mesure la manière dont on peut éviter le contrôle d'autres membres de l'organisation là où l'intermédiarité représente au contraire la manière dont on peut accroître la dépendance des autres. La centralité d'intermédiaire peut être définie comme la probabilité qu'une information transmise entre deux nœuds passe par un nœud donné. (Borgatti and Everett 2006).

- **La centralité spectrale (EigenVector Centrality),** La mesure proposée par Milgram (Bonacich 2007) considère que la centralité d'un nœud est déterminée par la centralité des nœuds auxquels il est directement connecté. Cette mesure donne autant d'importance à l'acteur qui entretient des liens avec d'autres acteurs du réseau qui sont eux même importants. La qualification d'importance d'un acteur est indiquée par son poids associé. Cette mesure est définie comme la combinaison linéaire des centralités des nœuds voisins du nœud en considération.

2.1.2.2 *Mesure globale*

Contrairement aux mesures précédentes, les mesures globales décrivent l'ensemble de la structure en mettant en évidence certaines propriétés statistiques.

- **La densité p** d'un réseau G = (V, E) est l'une des premières mesures utilisées pour caractériser la structure. Elle est égale au nombre de liaisons |E|, divisé par le nombre de liaisons possibles E_{max}.
- **Le coefficient de clustering** d'un graphe est une mesure du regroupement des nœuds dans un réseau. Plus précisément ce coefficient mesure à quel point le voisinage d'un sommet est connecté.
- **Le diamètre Q** d'un réseau est la plus grande des distances pouvant séparer deux nœuds au sein du réseau.
- **Le degré moyen <k>** d'un réseau *G = (V, E),* correspond à la moyenne des degrés individuels k_{vi} de chaque nœud *vi.*

D'autres mesures telles que la distribution des distances ou la distribution des coefficients de clustering peuvent également être trouvées. Finalement, qu'elles soient globales ou locales, toutes ces mesures permettent de caractériser les réseaux de façon statique, en fournissant des informations pertinentes sur l'état de leur structure topologique (Milgram 1967).

2.1.3 Structures et modèles de génération

L'étude détaillée des propriétés structurelles de très grands réseaux a permis de mettre en évidence des structures topologiques particulières communes à différents réseaux rencontrés dans le monde réel. De nombreux travaux récents ont en effet montré qu'au-delà de leur différence sémantique, la plupart des réseaux issus du monde réel sont caractérisés par des propriétés topologiques analogues telles qu'une distribution des degrés p(k) (voir Figure 6) qui suit une loi de puissance, une distance moyenne relativement faible ou la présence de communautés. Ces caractéristiques sont radicalement différentes de celles observées classiquement sur des réseaux réguliers ou aléatoires étudiés traditionnellement dans le domaine de la théorie des graphes.

2.1.3.1 Réseaux réguliers

Les structures régulières sont les structures de réseau les plus simples, souvent utilisées dans des modèles d'automates cellulaires. Dans un réseau régulier, chaque nœud possède un nombre identique de liaisons. La densité du réseau est souvent faible, alors que le coefficient de clustering est relativement élevé. Il est d'ailleurs intéressant d'observer que comme la structure est régulière, le coefficient de clustering ne varie pas avec la taille du réseau. Enfin, la distance moyenne dans ces réseaux est souvent élevée, puisque la structure ne présente pas de « ponts » permettant de relier des individus fortement éloignés.

Il y a plusieurs façons d'obtenir de tels réseaux. L'une des plus simples consiste à disposer les nœuds équitablement sur un cercle et à créer, pour chaque nœud, des connexions avec les α premiers nœuds situés à gauche et à droite de sa position. Naturellement, pour garantir une structure régulière, α doit être identique pour tous les nœuds v_i du réseau. Ainsi, $\forall v_i \in V, k_{vi} = 2 \times \alpha$. Cette construction est illustrée à gauche dans la Figure 5.

2.1.3.2 Réseaux aléatoires

Un réseau aléatoire est un graphe qui est généré par un processus aléatoire. Un graphe aléatoire de taille N est un graphe à N nœuds dont on a choisi aléatoirement les arcs. Le modèle d'Erdös-Rényi suppose que l'existence de chaque arc est indépendante de celle des autres et que chaque arc a une probabilité p d'exister (Erd6s and Rényi 1960). La distribution des degrés p(k) des nœuds du graphe suit une loi de Poisson. Ce modèle de graphe théorique repose donc sur un modèle de construction qui se caractérise par une loi statistique. En cela, il constitue le premier modèle de graphe théorique. Les graphes aléatoires s'opposent aux graphes réguliers. Cette construction est illustrée à droite dans la Figure 5.

2.1.3.3 Réseaux petit-monde

Un réseau petit-monde désigne à l'origine une structure dans laquelle les chemins entre deux nœuds quelconques sont généralement très courts, c'est-à-dire que la distance moyenne dans le réseau est relativement faible. Ce concept a notamment été mis en évidence par la célèbre expérience de Milgram (Milgram 1967), qui montra que le nombre d'intermédiaires nécessaires pour atteindre deux individus dans un réseau social était d'environ 6. Aujourd'hui un réseau de type petit-monde est caractérisé par deux propriétés : une distance moyenne relativement faible dans le réseau et un coefficient de clustering élevé. Cette construction est illustrée au milieu dans la Figure 5.

Les premiers travaux à s'intéresser à la génération de réseaux petit-monde sont ceux de Watts et Strogatz (Watts and Strogatz 1998) qui ont proposé un modèle de génération simple, connu sous le nom de modèle Watts-Strogatz et basé sur l'extension d'un réseau régulier. Ce genre de graphe possède alors un coefficient d'agglomération supérieur (en fait très supérieur) et un diamètre inférieur à un graphe aléatoire de même ordre et de

même taille. La propriété petit-monde est aujourd'hui couramment observée dans de nombreux réseaux du monde réel. Toutefois, bien que le modèle de Watts-Strogatz permette de générer aisément des réseaux de type petit-monde, il a souvent été critiqué pour son incapacité à produire des nœuds possédant un degré k élevé, une caractéristique souvent observée dans les réseaux du monde réel.

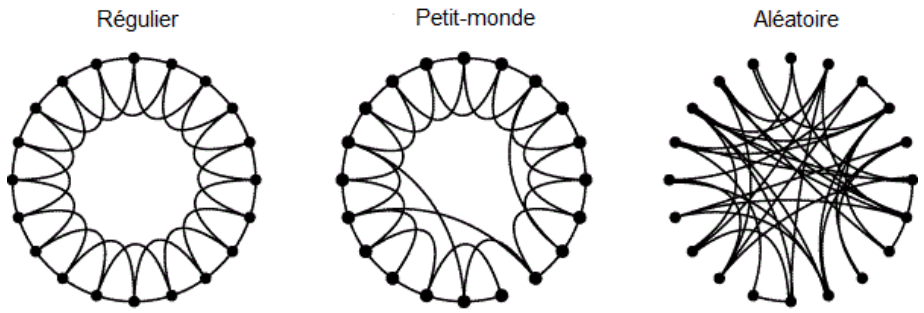


Figure 5. Modèle Watts-Strogatz : D'un réseau régulier vers un réseau aléatoire.

2.1.3.4 Réseaux scale-free

Introduit par Barabasi et Albert, ces graphes sont caractérisés par une distribution de degré p(k) qui suit une loi de puissance, c'est-à-dire à des graphes où il existe une large distribution de degrés différents, décroissant très lentement, ce qui traduit une hiérarchisation des nœuds selon leur degré (Barabási and Albert 1999). Pour illustrer cette distribution inégalitaire des degrés on peut prendre l'exemple d'Internet. La création d'un site Internet sur un sujet précis implique la création de rubrique de liens vers les sites de référence de ce sujet qui envoie de façon préférentielle vers les sites de référence concernant ce sujet, et la centralité de ces sites de référence tend à augmenter au cours du temps. Les nœuds « hub » de ce genre de réseau sont connectés directement à ceux de plus petites tailles et ceci permet une tolérance aux pannes même en cas de faillite d'un nœud central en terme de degré. La distribution du coefficient d'agglomération dans ce modèle de réseau suit une loi de puissance : ce coefficient est inversement proportionnel à l'augmentation du degré k d'un nœud, ce qui implique que les nœuds de faible degré appartiennent à des « réseaux petit-monde ».

Le réseau scale-free est aujourd'hui le type de réseau le plus fréquemment retrouvé dans les études menées sur les réseaux du monde réel. Un comparatif de ces différentes structures et de certaines mesures associées, inspiré de Borner (Börner, Sanyal et al. 2007), est présenté dans Figure 6.

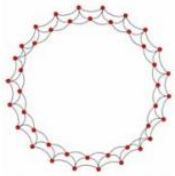
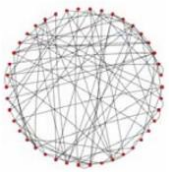
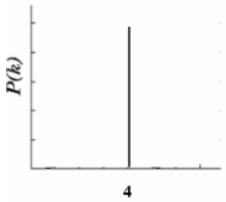
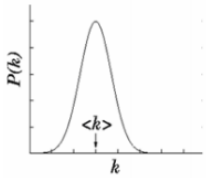
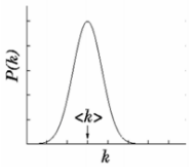
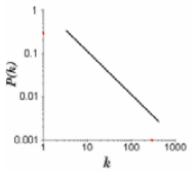
Structure	Régulier	Aléatoire	Petit-monde	Scale-free
Représentation				
Nombre de Nœuds	42	42	42	42
Nombre de liens	84	84	84	81
Diamètre	11	5	5	5
Distance moy	5,6	2,9	2,76	2,6
Coeff. Clustering	0,5	0 ,13	0,16	0,22
Degré moy <k>	4	4	4	3,86
Distribution des degrés				

Figure 6. Comparatif des différentes structures et mesures associées ; Source (Börner, Sanyal et al. 2007).

2.2 Modélisation des phénomènes de propagation

Les phénomènes de propagation ont été étudiés au cours de plusieurs travaux. Ils peuvent être observés dans différents domaine d'étude : maladie infectieuse, virus informatique, phénomène de mode, rumeur, ou plus généralement information. Pourtant, bien que ces phénomènes puissent sembler de prime abord très différents, ils sont tous des exemples types de processus qui ont pour support un réseau d'interactions entre des entités.

Ainsi, en raison de leur intérêt dans de nombreux domaines, les phénomènes de propagation ont fait l'objet de recherches actives. Ils s'inspirent en particulier des travaux menés en épidémiologie – dans le but d'anticiper la propagation de maladies au sein d'une population – et en marketing – dans le but de prédire l'adoption d'un produit ou d'une technologie parmi un groupe de consommateurs.

Du fait de la nature différente des problèmes abordés dans ces deux domaines, les modèles développés pour les traiter diffèrent de par les

hypothèses sur lesquelles ils se basent, et également de par la manière dont ils caractérisent la diffusion. En effet, les modèles épidémiologiques classiques ne supposent pas l'existence d'un réseau explicite interconnectant la population d'individus étudiée, hypothèse également adoptée en marketing. Par ailleurs, les modèles épidémiologiques se concentrent sur l'évolution temporelle du processus de diffusion, tandis que les modèles développés en marketing s'intéressent plutôt à l'évolution structurelle de la diffusion.

Les modèles de diffusion épidémiologiques sont ceux qui ont reçu le plus d'attention dans la littérature pour leur intérêt dans de nombreux domaines (géographie (Eliot and Daude 2006), sociologie (Wallace 1991), biologie (Meyers, Pourbohloul et al. 2005), mathématiques (Kermack and McKendrick 1927) ou informatique (Eubank 2005)), mais également pour leur facilité à s'adapter à d'autres types de phénomènes de diffusion tels que la propagation de virus informatiques (Wierman and Marchette 2004) ou de rumeurs (Zanette 2002). Dans cette section, nous présentons les deux grandes familles de modèles de diffusion : les modèles à compartiments, modèles mathématiques précurseurs basés sur le concept de mélange homogène, et les modèles plus récents basés sur les réseaux, qui visent à intégrer la complexité des interactions humaines impliquées.

2.2.1 Les modèles à compartiments

Les modèles à compartiments divisent une population en un ensemble de groupes (c'est-à-dire des compartiments), caractérisés chacun par l'état des individus au regard de l'épidémie (M'Kendrick 1925). Dans ce type de modèle, on suppose que les individus au sein des différents compartiments changent de compartiments de façon homogène ; on parle de mélange homogène ou d'action de masse. D'une certaine façon, cette approche suppose que les individus au sein d'un même compartiment entretiennent une structure relationnelle régulière avec les individus des autres compartiments. Les modèles compartimentaux supposent d'une part que les contacts entre les individus se font aléatoirement, et d'autre part que les membres se trouvent dans des états particuliers (dus à la diffusion), ce qui permet de les «compartimenter». Ils caractérisent le processus de diffusion à travers l'évolution de la taille de chaque compartiment dans le temps, modélisée à l'aide d'équations différentielles. Ils se concentrent donc par nature sur l'aspect temporel de la diffusion et ils permettent d'estimer comment le nombre d'individus dans chaque compartiment varie au cours du temps.

2.2.1.1 Le modèle SI

Kermack et McKendrick (Kermack and McKendrick 1927) décrivent le modèle le plus simple, SI, qui considère deux états : «*Susceptible*» (S) et «*Infected*» (I). *Les susceptibles* sont les individus qui peuvent contracter la maladie s'ils entrent en contact avec des individus infectés. *Les infectés* sont, eux, des individus porteurs de la maladie, qui peuvent la transmettre lors de

contacts avec des susceptibles. Les individus infectés ont une probabilité α d'établir un contact avec un individu susceptible. Cette approche simpliste modélise la propagation de la maladie par le passage de l'état susceptible à l'état infecté. Ce modèle suppose qu'un individu infecté reste dans cet état. Soit S la taille du compartiment contenant les individus dans l'état S, I la taille du compartiment regroupant les individus dans l'état I et N la taille de la population (N=S+I).

La maladie ne se propage que lorsqu'un tel contact est établi. Ainsi, si la population est composée de N individus, la probabilité qu'une personne rencontrée aléatoirement soit susceptible est de S/N. Par conséquent, chaque individu infecté a potentiellement, par unité de temps, $\alpha \times (S/N)$ contacts avec une personne susceptible. Puisqu'il y a I individus infectés à chaque unité de temps, le nombre de nouvelles infections peut être estimé par $(I \times \alpha \times S/N)$, ce qui nous permet d'exprimer le taux de changement du nombre d'individus des deux compartiments par les deux équations différentielles :

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha SI}{N} \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\alpha SI}{N} \quad (2)$$

Comme on a N = S(t)+ I(t), on peut récrire la seconde équation comme suit :

$$\frac{dI}{dt} = \alpha I(1 - \tfrac{I}{N})$$

2.2.1.2 *Le modèle SIR*

Le modèle SIR (Susceptible-Infected-Recovered) est également l'un des modèles de diffusion épidémique les plus fréquemment retrouvés dans la littérature. Il constitue une évolution directe du modèle SI. Dans le modèle SIR, les deux états du modèle SI sont conservés (*Susceptibles* et *Infected*), auquel est ajouté le troisième état R « *Recovered* », qui n'est atteint que par les individus infectés selon une certaine probabilité β (Kermack and McKendrick 1927). Dans ce modèle, le terme « *Recovered* » indique que l'individu est sorti de son état d'infection et ne peut plus contracter la maladie, soit parce qu'il devient immunisé, soit à la suite d'un décès. Ce modèle suppose qu'un individu dans l'état R conserve son immunité. Par conséquent, un individu recovered ne peut pas être de nouveau susceptible ou infecté.

Figure 7. Modèle SIR.

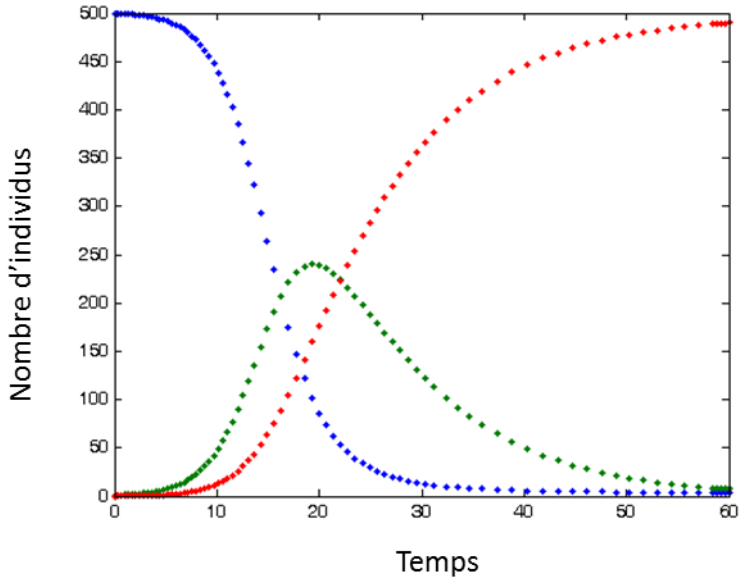


Figure 8. Courbes de diffusion dans le modèle SIR ;Bleu=Susceptible, Vert=Infectés, Rouge=guéris.

La Figure 8 représente des exemples de courbes de diffusion obtenues avec le modèle SIR. Nous pouvons observer que la courbe représentant le nombre d'individus infectés (on parle également de courbe d'incidence) est en forme de cloche. Cela signifie que le nombre d'individus infectés croît jusqu'à atteindre une valeur maximale, avant de connaitre une phase de décroissance.

Basés sur le même principe, on peut également retrouver dans la littérature le modèle SIS (*Susceptible-Infected-Susceptible*), qui est également une évolution directe du modèle SI et qui prend en compte la possibilité de réinfection des individus, ou le modèle SIRS (*Susceptible-Infected-Recovered-Susceptible*) qui combine les modèles SIR et SIS en autorisant la réinfection des individus après une phase d'immunité plus ou moins longue. Enfin, des modèles beaucoup plus élaborés ont également été proposés, tels que les modèles SEIS (*Susceptible-Exposed-Infected-Susceptible*), SEIR (*Susceptible-Exposed-Infected- Recovered*), etc., qui représentent des situations plus complexes, comme celle des individus qui ne sont pas totalement guéris, mais qui continuent de propager la maladie. Une présentation détaillée de ces différents modèles mathématiques peut être trouvée dans (Easley and Kleinberg 2010),(Newman 2010), (Guille, Hacid et al. 2013).

Ces modèles à compartiments sont couramment utilisés pour modéliser puis prévoir la diffusion de l'information ((McCormack and Salter 2010), (Jin, Dougherty et al. 2013)). Leskovec et al. proposent par exemple de modéliser la diffusion de l'information parmi les utilisateurs des médias sociaux à l'aide du modèle épidémiologique SIS (Leskovec, McGlohon et al. 2007). Celui-ci est semblable au modèle SIR – I signifiant dans ce cas que l'utilisateur a reçu l'information et participe à sa diffusion – sauf que les utilisateurs atteignant l'état R retournent immédiatement dans l'état S.

Cependant, cette modélisation implique que l'on suppose que tous les individus soient aussi influents les uns que les autres - ce degré d'influence commun à tous les individus étant proportionnel à la valeur du paramètre α, ce qui n'est pas une hypothèse satisfaisante dans le cadre des médias sociaux. Qui plus est, les auteurs ne proposent pas de méthode pour estimer la valeur optimale de α mais la déterminent manuellement par essais successifs.

Malgré leur élégante simplicité, les modèles à compartiments traditionnels constituent souvent des approximations peu réalistes de la manière dont l'épidémie se propage dans une population. En effet, le principe d'action de masse implique qu'un individu infectieux a la possibilité d'infecter chaque individu susceptible de manière équiprobable. Or, il est clair que les choses ne se passent pas ainsi en réalité. Une fois infectieux, un individu ne peut transmettre l'épidémie qu'à un nombre restreint d'individus (par exemple : aux membres de sa famille, à ses amis, à ses collègues de travail, etc.) et dont l'identité dépend du type d'interactions via lesquelles l'épidémie peut être transmise. Par ailleurs, il est clair qu'il existe des individus qui sont en contact avec un très grand nombre de personnes, tandis que d'autres interagissent avec beaucoup moins d'individus. Il apparaît ainsi évident que la structure sociale d'une population est un facteur déterminant pour la propagation d'épidémie ou d'information.

2.2.2 Les modèles basés sur les réseaux

Bien que les modèles à compartiments aient été largement utilisés dans l'étude des phénomènes de diffusion, l'hypothèse selon laquelle les individus ont une même probabilité d'établir des contacts s'avère être irréaliste. En effet, dans la réalité les contacts qu'entretiennent les individus sont souvent hétérogènes, puisque les individus ne sont généralement connectés qu'à une petite proportion d'individus et cette proportion n'est jamais choisie aléatoirement. Plusieurs travaux se sont intéressés à la problématique de l'épidémiologie sur réseau (Danon, Ford et al. 2011),(Pastor-Satorras, Castellano et al. 2015). Fondée sur la théorie des réseaux, l'épidémiologie sur réseaux est un cadre de travail qui a pour but de prendre en compte explicitement et intuitivement les diverses interactions sous-jacentes à la propagation d'une épidémie au sein d'une population (Keeling and Eames 2005), (Pastor-Satorras and Vespignani 2001), (Newman 2002).

C'est en 1985 qu'a été utilisé pour la première fois le concept de réseau social pour étudier la diffusion du SIDA (Klovdahl 1985). Dans ce travail, Klovdahl montre la pertinence d'une approche réseau dans le suivi de la transmission de l'agent infectieux et la mise en place de stratégies visant à réduire sa propagation. Ce travail précurseur pose ainsi les bases de l'étude des phénomènes de diffusion par la modélisation réseau, en mettant en avant le caractère central des relations entretenues par les entités dans le

processus de transmission. En effet, prenons par exemple le cas de la propagation de maladies infectieuses telles que la grippe ou les maladies sexuellement transmissibles. Il est aujourd'hui reconnu que les contacts de proximité ou les relations intimes qu'entretiennent les individus sont les principaux vecteurs de transmission. Cette hypothèse se vérifie également lorsque l'on s'intéresse aux autres types de diffusion. Alors qu'une information sera naturellement véhiculée à travers un réseau de communication, voire même de l'infrastructure matérielle sous-jacente, la propagation d'une rumeur sera elle, influencée par les liens d'amitié, de croyance ou d'influence que maintiennent les individus entre eux. Ainsi, contrairement aux modèles à compartiments, les modèles à base de réseau tentent de prendre en compte l'hétérogénéité des interactions humaines en se basant sur l'hypothèse que la structure et la nature du réseau dans lequel évoluent les individus sont les principaux facteurs déterminant le comportement du processus.

Plusieurs travaux menés initialement dans le domaine du marketing, modélisent le processus de diffusion au sein d'une population constante d'individus interconnectés par un réseau statique décrit par un graphe orienté. Ces modèles supposent que l'information ne peut se propager que le long des liens de ce réseau. Il existe deux manières de modéliser ce type de processus de diffusion, selon que la modélisation soit

— centrée sur les récepteurs – on parle alors de « **modèle à seuil** », tel que le modèle de seuil linéaire développé par (Granovetter 1978);

— ou bien centrée sur les émetteurs – on parle alors de « **modèle à cascades indépendantes** », tel que le modèle des cascades indépendantes proposé par (Goldenberg, Libai et al. 2001).

Dans les deux cas, on considère que chaque membre du réseau peut être soit inactif, soit actif, un membre actif étant un individu ayant reçu l'information et participant à sa propagation. Ces modèles caractérisent un processus de diffusion par une séquence d'activation le long d'un axe temporel discret, puisqu'ils modélisent la diffusion comme un processus itératif où les membres du réseau changent d'état de façon monotone (i.e. les membres actifs ne peuvent pas redevenir inactifs) et synchrone. Par conséquent, et contrairement aux modèles à compartiments, ces modèles se concentrent sur l'aspect structurel de la diffusion.

Les modèles de seuil sont fondés sur le principe selon lequel le passage de l'état inactif à l'état actif d'un membre du réseau dépend de l'influence exercée par ses voisins actifs dans le réseau. Chaque lien ($v \rightarrow w$) du graphe G est associé à un paramètre $b_{v,w}$ quantifiant le degré d'influence qu'exerce le membre v sur w, et chaque nœud v du graphe est associé à un seuil d'influence θ_v. Par ailleurs, à chaque nœud v du graphe G (dont l'ensemble des voisins sortants est noté $\gamma_v^{\rightarrow}$) est associé une fonction croissante g_v définie sur P ($\gamma_v^{\rightarrow}$), P ($\gamma_v^{\rightarrow}$) représentant l'ensemble des parties de l'ensemble γ_v, tel que $g_v(\phi) = 0$. Étant donné un ensemble S de membres

du réseau initialement actifs, le processus de diffusion se déroule itérativement, comme suit. À une itération t, on évalue pour chaque nœud inactif v la fonction g_v pour l'ensemble de ses voisins actifs. Si sa valeur excède le seuil θ_v, alors le nœud v devient actif à l'itération t + 1. Le processus s'achève lorsqu'aucune nouvelle activation n'est possible. Granovetter (Granovetter 1978) propose le Linear Threshold Model (LT), qui, comme son nom l'indique, définit la fonction g comme une somme linéaire des degrés d'influence de tous les voisins actifs w, c'est-à-dire : $g_v = \sum b_w$.

Les modèles de cascade requièrent, quant à eux, que l'on définisse pour chaque lien ($v \rightarrow w$) la probabilité $P_{v,w}$ que le membre v influence son voisin inactif w de sorte que celui-ci passe dans l'état actif. Étant donné un ensemble S de membres du réseau initialement actifs, le processus de diffusion se déroule itérativement, comme suit. À une itération t, chaque nœud v devenu actif à cette itération influence avec une probabilité $P_{v,w}$ chacun de ses voisins w, qui deviennent actifs le cas échéant à l'itération t+1. Le processus s'achève lorsqu'aucune nouvelle activation n'est possible. Goldenberg et al. proposent le « Independent Cascades Model (IC) » (Goldenberg, Libai et al. 2001), qui suppose que chaque nœud v nouvellement actif influence indépendamment des autres chacun de ses voisins inactifs.

Plusieurs améliorations ont été proposées sur ces modèles de base afin d'en améliorer le fonctionnement et d'essayer de mieux coller à la réalité. Un dérivé du modèle IC qui tient compte du temps que met un utilisateur à activer ses voisins est le modèle Asynchronous Independent Cascades (ASIC) (Saito, Kimura et al. 2009). Dans ce cadre, l'utilisateur activé ne tente pas d'activer tout de suite, mais peut le faire avec un temps de latence. Ce phénomène de latence dans la diffusion se retrouve aussi dans le modèle introduit dans (Liben-Nowell and Kleinberg 2008). Une autre idée intéressante est celle d'homophilie, qui rend compte du fait que des utilisateurs ayant des caractéristiques proches auront plus tendance à communiquer que des utilisateurs ayant des caractéristiques éloignées. On retrouve dans (Apolloni, Channakeshava et al. 2009) une étude sur les actions effectuées par les utilisateurs de Flickr (un site web de partage de photographies et de vidéos). Saito et al. (Saito, Ohara et al. 2011) présentent un modèle dérivé de ASIC dans lequel les probabilités dépendent de la similarité entre les utilisateurs. Une autre amélioration, qui conduit à des simulations plus réalistes, consiste à ne pas exprimer la diffusion comme un simple phénomène binaire dont on peut observer les valeurs à un moment donné, mais plutôt comme un phénomène évoluant dans le temps et caractérisé par une probabilité de diffusion en chaque nœud (ou ensemble de nœud). On obtient ainsi dans (Young 2009) et (López-Pintado 2008) des modèles fondés sur des équations différentielles. Enfin, dans (Yang and Leskovec 2010), la diffusion est vue à plus grande échelle, en ne considérant

plus les utilisateurs de manière individuelle mais en tentant de modéliser l'influence de certains sur le reste du réseau.

L'étude des phénomènes de diffusion à travers l'approche réseau à fait l'objet d'une activité de recherche intense. Les problèmes couramment abordés sont :

(*a*) La compréhension des phénomènes, qui vise à étudier et analyser le comportement du processus de diffusion selon différents paramétrages. Plusieurs travaux se sont intéressés à l'effet des structures topologiques sur le processus de propagation (Cohen, Erez et al. 2000, Cohen, Erez et al. 2001). D'autres travaux se sont intéressés à l'impact de la distribution du degré sur le processus. Par exemple, en comparant la diffusion sur un réseau aléatoire et sur un réseau scale-free (Lloyd and May 2001).

(*b*) L'identification de situations critiques, avec un intérêt particulier porté aux facteurs favorisant l'émergence et l'évolution du phénomène. Par exemple, Christley et al. (Christley, Pinchbeck et al. 2005) comparent plusieurs mesures locales (degré, centralité, distance moyenne, etc.) et montrent que le degré est la mesure la plus discriminante pour l'identification d'individus à risque. De même, Pastor-Satorras et Vespignani (Pastor-Satorras and Vespignani 2002) comparent une vaccination aléatoire des nœuds, à une vaccination ciblée selon la connectivité des nœuds et montrent que la vaccination ciblée sur les nœuds les plus connectés réduit considérablement la vulnérabilité d'un réseau scale-free face aux épidémies. D'autres travaux se sont intéressés à des indicateurs globaux. Par exemple, l'étude menée par Salathé et Jones (Salathé and Jones 2010) s'intéresse aux réseaux possédant plusieurs communautés. Ils montrent que sur de tels réseaux, des stratégies d'interventions ciblant des individus faisant le pont entre plusieurs communautés sont plus efficaces que celles qui s'intéressent uniquement aux individus les plus fortement connectés.

(*c*) La recherche de motifs, qui tente de mettre en corrélation les attributs des nœuds et les tendances observées. Il est possible d'intégrer les propriétés des nœuds (âge, sexe, besoins, etc.) dans l'analyse, afin de déterminer si elles affectent l'évolution du phénomène. L'une des méthodes consiste par exemple à rechercher des corrélations entre les propriétés des nœuds (topologiques, individuelles et démographiques) et l'évolution du processus de diffusion. En effet, les individus connectés entre eux dans un réseau ont souvent des caractéristiques similaires, formant ainsi des groupes densément connectés d'individus aux caractéristiques plus ou moins analogues.

3> Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté les champs de recherche principaux qui constituent le fondement des travaux présentés dans ce mémoire.

La première section a été consacrée aux formalismes de spécifications utilisés pour modéliser le comportement des individus et simuler les phénomènes de propagation. Dans cette partie, nous avons présenté les bases de la théorie de modélisation et simulation et le formalisme DEVS que l'on utilise pour spécifier le comportement de nos modèles de simulation. Dans la suite de nos travaux, nous utiliserons l'extension DS-DEVS du formalisme DEVS afin de spécifier le comportement de nos modèles de simulation. Le formalisme DS-DEVS nous offre une structure de connexions dynamiques, une évolution du couplage au cours du temps entre les modèles composants le modèle global et une apparition ou disparition des modèles. L'ensemble de ces réflexions sera présenté dans la suite du document.

La section suivante a été consacrée à l'étude des phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux. Nous avons présenté les principales définitions, notations, propriétés et structures couramment rencontrées dans la littérature sur les réseaux. Nous avons ainsi pu détailler le concept du réseau social, qui constitue le point central des travaux de recherche présentés dans ce mémoire. Ensuite, Nous avons montré que le phénomène de propagation a été étudié à travers deux approches : celui des modèles à compartiments, qui divisent une population en un ensemble de groupes caractérisés chacun par l'état des individus au regard de l'épidémie, et celui de la diffusion, qui s'intéresse aux caractéristiques du phénomène comme son amplitude ou aux moyens de le contenir.

En résumé, la littérature rapporte que la modélisation des organisations et des processus sont traités en recherche. Mais, fréquemment, les mécanismes des échanges informels sont ignorés et la formalisation de ces interactions entre les entités est peu détaillée. De ce postulat, nous nous intéressons aux communications informelles et en détail, à la manière dont se propage l'information au sein des réseaux sociaux et plus particulièrement à la façon dont les acteurs agissent pour diffuser cette information. Dans ces travaux, nous présentons une architecture de simulation permettant de simuler la propagation et l'influence d'information au sein d'un réseau social multiplexe. En détail, nous nous intéressons à quatre problématiques qui découlent du phénomène de la propagation d'information au sein d'un réseau social : (i) modéliser et prévoir la diffusion de l'information, (ii) formaliser le comportement des individus afin de simuler l'évolution et la dynamique de leurs comportements et attitudes, (iii) identifier des utilisateurs influençant la diffusion de l'information par la simulation et (iv) étudier le processus de la diffusion dans un réseau social multiplexe par la simulation.

Les contributions apportées par nos travaux sont les suivantes :

- Un logiciel de génération d'une population en se basant sur des données démographiques et socio-culturelles d'une zone désignée.
- Une méthode pour la formalisation d'un réseau multicouche basée sur le formalisme DEVS.
- Un modèle « centré-individu » pour prévoir la diffusion de l'information dans les réseaux sociaux.
- Une maquette de simulation permettant la modélisation, la simulation et l'analyse des phénomènes de propagation au sein d'un réseau social dynamique et multiplexe.

Ces contributions sont formulées de manière générique pour pouvoir être appliquées à différentes catégories de réseaux sociaux.

Chapitre 3 : Simulation des phénomènes de propagation au sein des réseaux multiplexes

Résumé

Nous présenterons dans ce chapitre la spécification des acteurs d'un réseau social dans le formalisme DEVS. Cette spécification permet de réaliser des modèles DEVS qui n'accomplissent qu'un seul type d'action afin de diminuer sa complexité. Le couplage des modèles DEVS gère les interactions entre ces différentes entités. Ensuite, nous proposons une architecture permettant de modéliser un réseau social multiplexe. Dans ce réseau nous prenons en compte plusieurs types de relations entre les acteurs. Dans la dernière partie, nous détaillerons un algorithme de propagation intégrant le processus de diffusion et le processus d'influence.

Sommaire

Chapitre 3 : Simulation des phénomènes de propagation au sein des réseaux multiplexes .43

1> Modélisation Formelle des Réseaux Sociaux 44

1.1 Introduction 44

1.2 Du paradigme d'agents vers le Formalimse DEVS 44

1.2.1 Concepts généraux 45

1.2.2 Spécification d'un agent avec DEVS.....48

1.2.3 Formalisation de l'environnement 50

1.3 Spécification des réseaux Sociaux 52

1.3.1 Concept généraux.....52

1.3.2 Spécification.....54

1.3.3 Formalisation d'un réseau Multiplexe 55

1.4 Conclusion.....56

2> Phénomène de Propagation au sein des Réseaux Sociaux.....57

2.1 Modèles de diffusion et d'influence existants.....57

2.2 Modèle proposé.....59

2.2.1 Description du modèle.....59

2.2.2 Mécanisme de propagation dans les réseaux multiplexes.....63

2.3 Conclusion.....64

1> Modélisation Formelle des Réseaux Sociaux

1.1 Introduction

L'objectif ce chapitre est de proposer un modèle formel pour représenter les réseaux sociaux. Il nous semble en effet indispensable de décrire de façon non ambiguë les réseaux et les comportements spécifiques des individus si l'on veut pouvoir simuler de manière pertinente les phénomènes de propagation dans une société. Les contacts entre individus restent un élément primordial de la propagation d'information. Ces contacts se font à travers diverses relations entre les individus et selon des modalités difficiles à prévoir de façon statique.

Les graphes aléatoires (Goldenberg, Libai et al. 2001) se sont révélés un outil intéressant pour modéliser les réseaux sociaux complexes. Ils souffrent cependant d'une insuffisance importante : ils ne prennent en compte, de fait, qu'une relation entre les individus et, de surcroit, la supposent la plupart du temps non orientée. Nous postulons que, dans la réalité, les individus d'une société sont reliés par plusieurs relations et que celles-ci ne sont pas nécessairement symétriques.

Ce chapitre propose donc de développer notre modèle basé sur les agents pour modéliser et simuler la propagation d'information au sein d'un réseau social et de prédire l'impact de cette propagation sur les individus. Ce modèle s'appuie sur deux théories : La théorie de la modélisation et de la simulation d'une part, la théorie de la communication persuasive d'autre part. Aussi, dans la première partie, nous rappellerons les concepts du formalisme DEVS et des agents essentiels à la compréhension du modèle. Ensuite, nous présenterons le modèle de propagation ainsi que les indicateurs utiles qui peuvent en être dérivés pour l'analyse « topologique » du réseau. Ces résultats seront ensuite, dans le chapitre 5 associés au modèle de simulation que nous proposons.

1.2 Du paradigme d'agents au Formalisme DEVS

La formalisation des SMA a donné lieu à de nombreux travaux (Duboz, Ramat et al. 2004). Nous pouvons citer ceux rassemblés par G. Quesnel qui nous permet de distinguer deux types de formalismes, l'un pour les structures, l'autre pour les comportements (Quesnel 2006). J. Ferber a proposé le formalisme BRIC pour Block-lite Representation of Interactive Components (Ferber and Perrot 1995) qui s'appuie sur une structure modulaire et hiérarchique avec un comportement formalisé par un réseau de Petri coloré. La principale limitation de BRIC est l'incapacité de modéliser des systèmes à structures dynamiques, c'est-à-dire où les connexions entre agents ou avec l'environnement peuvent varier en cours de simulation. Nous pouvons également citer P. Gruer (Gruer, Hilaire et al. 2002), qui propose de combiner Object-Z et les Statecharts pour définir une formalisation SMA, où

Object-Z est utilisé pour la structure et les Statecharts pour la définition du comportement.

Les premiers travaux de formalisation des SMA par l'utilisation de DEVS sont ceux d'A. M. Uhrmacher (Uhrmacher and Arnold 1994, Uhrmacher and Kullick 2000). Ces travaux mettent en relation les modèles atomiques avec les agents, où les fonctions internes représentent l'autonomie, les fonctions externes, la perception et les fonctions de sorties représentent l'action des agents sur l'environnement ou sur les autres agents. Les agents sont alors vus comme des automates à états finis. Ces travaux ne prennent pas en compte le haut niveau d'abstraction des SMA qui demandent une sémantique plus élaborée, par exemple: la pro-action, l'action, le comportement ou les groupes d'agents. M. F. Hocaoglu propose une collaboration entre les SMA et un modèle DEVS qui représente l'environnement mais ne formalise pas le SMA (Hocaoglu, Sarjoughian et al. 2002). R. Duboz propose une analogie entre le formalisme DEVS et les agents réactifs (Duboz 2004) et entre DS-DEVS et les SMA (Duboz, Ramat et al. 2004). Enfin, M. Zhang et al. proposent de combiner la modélisation cognitive, la théorie de l'organisation de l'agent et le formalisme DEVS pour les SMA à grande échelle (Zhang, Seck et al. 2013).

Dans ce chapitre, nous proposons une approche de formalisation des SMA en utilisant DEVS. Notre formalisation intègre deux concepts, le premier est le formalisme DS-DEVS, pour la modification de graphes DEVS en cours de simulation, le deuxième, est le modèle proxy/serveur, pour la définition d'une architecture pour des relations multiples entre les agents. Dans le reste du chapitre, nous utiliserons la formulation DEVS des modèles.

1.2.1 Concepts généraux

1.2.1.1 Formalisme DEVS

Le formalisme DEVS manipule les concepts de structure, d'ensemble et de fonction mettant en relation les différents éléments de ces ensembles. L'un des avantages principaux du formalisme DEVS est qu'il spécifie également les mécanismes de simulation de ses modèles. En effet, le simulateur DEVS va exécuter les fonctions de transition des modèles atomiques et gérer la communication entre les modèles à partir d'un arbre de simulation. Il associe un simulateur par modèle atomique (Annexe C.1) et un coordinateur par modèle couplé (Annexe C.2). Cette représentation hiérarchique permet de contrôler la simulation grâce à une distribution orchestrée des événements entre modèles. Le passage de la formalisation à l'implémentation se fait par l'intermédiaire d'algorithmes mis au point par B.P. Zeigler pour ce qui concerne les modèles atomiques ou couplés basiques mais aussi pour les autres extensions de modèles DEVS. Ces algorithmes sont appelés « simulateurs abstraits » et font de DEVS une sémantique opérationnelle.

Dans un contexte de modèle couplé, le simulateur abstrait d'un modèle DEVS atomique peut être vu comme une boîte acceptant en entrée trois types d'événements et générant un événement de sortie.

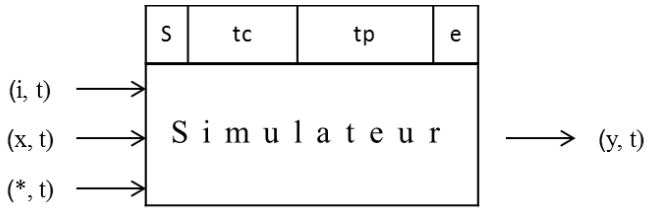


Figure 9. Le simulateur abstrait d'un modèle atomique.

Les événements d'entrée-sortie notés sur la figure sont les suivants :

- Evénement d'initialisation (i, t) : l'état « s » du modèle est initialisé à l'instant t, la date tp de la prochaine transition interne est calculée à l'aide de ta(s).
- Evénement externe (x, t) : un autre modèle envoie un événement à la date t, le modèle est dans l'état « s » depuis tc et devait modifier l'état à tp sur une transition interne.
- Evénement interne (*, t) : le modèle a atteint la date de fin d'état courant « s », le modèle change d'état selon sa fonction de transition interne (δ_{int}).
- Evénement de sortie (y,t) : le modèle génère un événement de sortie à la date t ayant pour valeur (fonction de sortie $\lambda(s)$).

Le passage de la spécification formelle DEVS à l'algorithme de simulation du modèle passe par l'implémentation de ces fonctions.

1.2.1.2 Extension DS-DEVS

L'une des limitations de DEVS, mais aussi de bien d'autres formalismes, provient de l'incapacité à changer dynamiquement de structure durant la simulation. Les formalismes peuvent, en général, seulement représenter les changements d'états en fonction des événements d'entrée et de la dynamique interne. Les changements de structures sont alors possibles en les intégrant dans les variables descriptives du système. On mélange alors les aspects purement comportementaux avec des aspects de structure. Les exemples de changements de structures sont nombreux dans la réalité:

- Un nouveau serveur qui apparaît dans un réseau complexe ;
- Le remplacement d'un composant défectueux par un autre ;
- L'apparition et la disparition de produits dans un système de production ;
- Apparition ou disparition d'un groupe d'agents au sein d'un système social.
- Une entité avec un comportement dans un environnement d'entités communicantes (de type système multi-agents).

Dynamic Structure DEVS a été défini par F. J. Barros dans (Barros 1995) afin de pallier cette insuffisance. Ce formalisme est basé sur DEVS et fournit tous les mécanismes pour le changement dynamique de la structure d'un modèle DEVS. DS-DEVS introduit une nouvelle spécification pour les modèles couplés mais n'effectue aucune modification de spécification des modèles atomiques. Le changement dynamique de structures est introduit à l'aide de la définition d'un réseau de modèles DEVS atomiques. Les différences par rapport aux modèles couplés de DEVS sont que la liste des connexions et la liste des modèles de ce réseau peuvent changer au cours du temps. Ce réseau est défini à l'aide de l'ensemble des modèles atomiques activables « D » et le réseau des modèles actifs « C ». Ce réseau est représenté par la structure suivante :

$$\mathrm{DSDEVN}_{\Delta} = \{X_{\Delta}, Y_{\Delta}, \chi, M_{\chi}\}$$

Δ Représente le nom du réseau DS-DEVS. Les attributs X_{Δ} et Y_{Δ} représentent l'ensemble des ports d'entrée et des ports de sortie du modèle global. Tous les ports ne sont pas obligatoirement actifs. Le modèle M_{χ} précise de quelle manière la structure du modèle actif change au cours du temps. Par conséquent, ce modèle définit les ports actifs. Le modèle M_{χ} est représenté par la structure suivante :

$$M_{\chi} = \{X_{\chi}, S_{\chi}, Y_{\chi}, \delta_{int\chi}, \delta_{ext\chi}, \gamma_{\chi}, ta_{\chi}\}$$

Cette structure est compatible avec celle des modèles atomiques classiques afin de respecter la spécification DEVS. Pour comprendre comment est décrit le changement dynamique de la structure, il faut détailler le vecteur d'états S_{χ}. Ce vecteur contient les informations de l'état de la structure du réseau et est défini par le 8-uplet suivant :

$$S_{\chi} = (X_{\Delta}^{\chi}, Y_{\Delta}^{\chi}, D^{\chi}, \{M_i^{\chi}\}, \{I_i^{\chi}\}, \{Z_{i,j}^{\chi}\}, SELET^{\chi}, V^{\chi})$$

Tout changement de ce 8-uplet traduit un changement de la structure du réseau des modèles. Par exemple, la valeurX_{Δ}^{χ}, définit l'ensemble des ports d'entrée actifs. Cet ensemble est un sous-ensemble de X_{Δ} et s'il est modifié, cela signifie que les événements admissibles par le modèle changent. Cette modification est, en général, la conséquence de l'activation ou de la désactivation d'un modèle composant le modèle global actif. D^{χ} est l'ensemble des identifiants des modèles actifs et $\{M_i^{\chi}\}$ l'ensemble des modèles actifs où i appartient à D^{χ}. Nous pouvons généraliser la définition en considérant les modèles actifs soit comme des modèles atomiques, soit comme des modèles couplés. Les ensembles $\{I_i^{\chi}\}$ et $\{Z_{i,j}^{\chi}\}$ définissent, quant à eux, les connexions entre les modèles actifs du réseau. La structure est complétée par une fonction de sélection $SELET^{\chi}$. Cette fonction gère les problèmes de conflits lorsque plusieurs événements se produisent à la même date et que les destinataires appartiennent au réseau. Finalement, V^{χ} représente les autres variables d'états que le modèle exécutif peut utiliser pour prendre des décisions.

1.2.2 Spécification d'un agent avec DEVS

Un agent est une entité autonome capable de communiquer, disposant d'une connaissance partielle de ce qui l'entoure et d'un comportement privé, ainsi que d'une capacité d'exécution propre. Un agent agit pour le compte d'un tiers qu'il représente sans être obligatoirement connecté à celui-ci, réagit et interagit avec d'autres agents (Ferber and Perrot 1995). Un agent réactif peut être vu comme un agent sans intelligence (sans anticipation, sans planification) qui réagit par stimulus-réponse à l'état courant de l'environnement. Des comportements intelligents peuvent émerger de leur association. Nous développons une spécification pour les agents basée sur les travaux de Quesnel avec la formalisation des agents réactifs où nous adaptons la spécification des agents pour la simulation des actions sociales.

La modélisation du comportement des agents est laissée libre au modélisateur, celui-ci, doit faire le choix du type de modèle DEVS à attacher. Le comportement et les interactions d'un agent peuvent être très complexes. Les principes de modularité et de décomposition hiérarchique énoncés dans notre présentation de DEVS nous permettent d'adopter un niveau de détail suffisant pour exprimer cette complexité. Ainsi, il peut y avoir plusieurs modèles DEVS qui formalisent l'interaction et le comportement.

Notre approche de conception des modèles des agents repose sur une synthèse des approches DEVS-Agents proposées par (Duboz, Ramat et al. 2004, Quesnel 2006), nous avons découpé l'agent en deux parties, la première partie est modélisée par un, ou plusieurs, modèle proxy et la deuxième partie est modélisée par un modèle serveur. Le modèle proxy réceptionne les informations des autres agents ou interagit avec eux. Il est connecté au serveur et participe au comportement général de l'agent. Dans un SMA, les agents ne sont pas isolés mais communiquent avec les autres agents et interagissent avec l'environnement via la manipulation de messages. Ces messages se traduisent dans le formalisme DEVS sous la forme d'événements, lesquels peuvent contenir les informations issues du message. Les concepts de modularité et de décomposition hiérarchique de DEVS permettent d'adopter un niveau de détail suffisant pour exprimer cette complexité. Ainsi, il peut y avoir plusieurs modèles DEVS qui spécifient l'interaction et le comportement d'agent. Nous formalisons la structure d'un agent sous forme d'un modèle DEVS couplé :

$$M_{Agent} = < X, Y, D, \{M_d | d \in D\}, EIC, EOC, IC >$$

Où M_{Agent} désigne le modèle DEVS couplé d'un agent.

- $X = \{(p,v) | p \in IPorts, v \in Xp\}$ est l'ensemble des entrées et des valeurs qu'ils peuvent prendre.
- $Y = \{(p,v) | p \in OPorts, v \in Xp\}$ est l'ensemble des sorties et des valeurs qu'ils peuvent prendre.

- *D* est l'ensemble des noms des modèles atomiques ou couplés composants l'agent.
- M_d : est l'ensemble des modèles atomiques ou couplés composants l'agent.
- $EIC : \{(M_{Agent}, ip_{MAgent}), (d, ip_d) \mid ip_{MAgent} \in IPorts, d \in D, ip_d \in IPortsd\}$ définit les ports du modèle d'agent qui sont connectés aux ports des modèles composants qui reçoivent des événements externes.
- $EOC : \{(d, op_d), (M_{Agent}, op_{MAgent}) \mid op_{MAgent} \in OPorts, d \in D, op_d \in OPorts_d\}$ définit les ports du modèle d'agent connectés aux ports des modèles composants qui émettront des événements.
- $IC : \{(a, op_a), (b, ip_b) \mid a, b \in D, op_a \in IPorts_a, ip_b \in IPorts_b\}$ définit le couplage interne des sorties des modèles composants aux entrées des autres modèles composants du modèle agent.

1.2.2.1 Perception

La perception relie l'agent à l'environnement et aux autres agents. Elle est le processus par lequel l'agent acquiert des informations sur son entourage. La perception est représentée en DEVS par l'arrivée d'un événement externe dans un modèle d'agent, entraînant un changement d'état d'un ou plusieurs modèles de l'ensemble M_{Agent}. Soit K un agent spécifié avec un DEVS couplé, sa perception P_K est définie comme l'ensemble des fonctions de transitions externes tel que :

$$P_k = \{\delta_{ext(d)} \mid \delta_{ext(d)} (S_d, (v, ip_d))\}$$

Avec :

- $(v, ip_d) \in EIC$ où ip_d est un port d'entrée du modèle $d \in D_k$ et *v* sa valeur.
- D_k est l'ensemble des noms des modèles composant l'agent.

En prenant en compte le fait que le domaine de définition des valeurs contenues dans les messages n'est pas restreint, nous pouvons assimiler tout type de message arrivant sur le modèle agent via les ports d'entrées à des stimuli.

1.2.2.2 Action et Pro-action

Les actions des agents peuvent se définir comme l'influence sur l'extérieur. Ces actions se présentent sous forme d'événements générées par un agent (l'émission d'un événement depuis la fonction de sortie λ). En considérant K un agent formalisé par un modèle DEVS couplé, l'action A_k de K est définie comme l'ensemble des fonctions de sorties telles que :

$$A_k = \{\lambda_d \mid \lambda_d(S_d) = (v, op_d)\}$$

Avec :

- $(v, op_d) \in EOC$ où op_d est un port de sortie du modèle $d \in D_k$ et *v* sa valeur.
- D_k est l'ensemble des noms des modèles composant l'agent.

Le concept d'action peut être divisé en deux types, la pro-action et la réaction. Le concept de proactivité signifie que l'agent est capable, sur sa propre initiative, de fixer des objectifs. Ce concept existe en DEVS, lorsqu'un modèle atomique, ou couplé, possède uniquement des ports de sortie, c'est-à-dire, $X=\phi$ et $Y\neq\phi$. De cette façon, le comportement du modèle est conduit par les fonctions de transitions internes. La proactivité peut être vue comme l'ensemble des fonctions de sortie qui ont pour origine un modèle proactif. Soit F_p l'ensemble des modèles proactifs composant un agent K, nous pouvons formaliser la proactivité V_K comme :

$$V_k = \{\lambda_{dp} \mid \lambda_{dp}(S_{dP}) = (v, op_{dp})\}$$

Avec :

- $(v, op_{dp}) \in EOC$ où op_{dp} est un port de sortie du modèle $dp \in D$ qui est l'ensemble des noms des modèles proactifs composant l'agent et v sa valeur.

Cette définition est incomplète. En effet, un modèle proactif peut englober un changement d'état dans un autre modèle composant l'agent. Une conséquence peut être que les derniers calculs d'une fonction de sortie sont reliés à l'arrivée d'un événement externe venant du modèle proactif.

1.2.2.3 Autonomie

L'autonomie d'un agent est définie par l'ensemble des fonctions des modèles composants qui ne sont pas reliés aux ports d'entrée ou de sortie du modèle de l'agent. Soit un agent K formalisé avec un modèle DEVS couplé, toutes les fonctions de transitions externes qui ne reçoivent pas d'événements liés à un port d'entrée du modèle couplé et toutes les fonctions de transitions internes des modèles composants le modèle couplé définissent l'autonomie O de l'agent K. Ainsi :

$$O_A = \{\delta_{ext(d)} \cup \delta_{int(d)} \mid \delta_{ext(d)} (S_d, (v,ip))\}$$

Avec :

- $(v, ip_d) \notin EIC$ où ip_d est un port d'entrée et v sa valeur,
- $d \in D$ l'ensemble des modèles composants,
- S_d est l'ensemble des états des modèles composant $d \in D$.

La perception, l'action, la pro-action et l'autonomie formalisent le comportement C_K de l'agent K qui peut être écrit comme :

$$C_K = P_K \cup A_K \cup V_K \cup O_K$$

1.2.3 Formalisation de l'environnement

Perçu par le système multi-agents, l'environnement est un ensemble d'éléments hétérogènes et dynamiques. Ces éléments peuvent être des ressources et des services. La modélisation de l'environnement peut être classée dans trois catégories : l'environnement centralisé, distribué ou l'environnement modélisé comme un agent (Soulié 2001). Dans un

environnement centralisé, c'est une seule et unique structure qui définit l'environnement. Cette structure, une sorte de bloc, représente et contient tous les éléments de l'environnement. Les agents perçoivent l'environnement par l'intermédiaire d'un lien qui les relie à celui-ci. Dans le deuxième cas, l'environnement est représenté par un ensemble de cellules formant une grille. Chaque cellule peut être vue comme un environnement centralisé. Cette approche à l'avantage de pouvoir représenter des environnements très hétérogènes. Son inconvénient majeur est de contraindre la géométrie des interactions. Dans le troisième cas, toutes les entités de l'environnement sont considérées comme des agents ainsi que l'entité qui leur sert de support. Cette approche a été initiée dans des plateformes de modélisation et simulation agents comme Swarm (Hiebeler 1994) et MadKit (Ferber and Gutknecht 1998). Une autre approche concernant l'environnement a été proposée par J.C. Soulié : c'est l'approche multi-environnements (Soulié 2001). Cette technique consiste en une la modélisation et la simulation des agents qui évolue dans plusieurs environnements à la fois.

Les environnements sont des structures dont le rôle est de stocker les informations des agents et de fournir un mécanisme de type questions-réponses aux requêtes des autres modèles. Ces modèles sont représentés sous forme de modèles couplés ou modèles atomiques. Dans la suite de ce document, nous formalisons l'environnement sous forme d'un modèle atomique :

$$M_{env} = < X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, \delta_{con}, \lambda, ta >$$

Où :

- $X\ et\ Y$ sont respectivement l'ensemble des ports d'entrées et de sorties,
- $S = \{(phase, M)\}$ est l'ensemble des états où *phase* peut prendre la valeur *Idle* ou (Q_{Xi} | i = 1 . . . n) avec *n* le nombre de ports d'entrées du modèle. *Idle* désigne l'état passif, les ports d'entrées *Xi* sont des questions ou requêtes potentielles sur l'environnement. *M* est l'ensemble d'informations publiques,
- δ_{ext} : $(Idle, M) \times xi \rightarrow (Si, M)$ correspondent à la réception de la question par l'environnement,
- δ_{int} : $(Si, M) \times xi \rightarrow (IDle, M)$ est le retour à l'état passif après réponse à une question,
- $\lambda(Si, M) : (Si, M) \rightarrow Yi$ sont les réponses de l'environnement aux requêtes externes,
- $ta(Idle, M) = \propto$, l'environnement est toujours en attente d'une requête,
- $ta(Idle, M) = 0$, la réponse à la modification ou question est instantanée.

Le modèle M_{env} fonctionne en mode requête-réponse. Les requêtes peuvent être de deux types : une simple question ou une modification d'une des variables d'états du modèle. La formalisation de la question simple est réalisée à l'aide des événements instantanés sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \delta_{ext} : (Idle, M) \times xq \rightarrow (IDle, M) \\ \delta_{int} : (Sq, M) \times xq \rightarrow (Sq, M) \\ \lambda : (Sj, m) : (\mathrm{Sj}, \mathrm{M}) \rightarrow \mathrm{Yq} \end{cases}$$

1.3 Spécification des réseaux Sociaux

1.3.1 Concept généraux

Un réseau social est un ensemble d'individus ou groupes reliés entre eux par des liens créés lors d'interactions sociales (Wasserman and Faust 1994). Une interaction au sens social du terme est un échange d'informations entre deux agents au sein d'un système. E. Lazega dans son ouvrage «Réseaux Sociaux et Structures Relationnelles» (Lazega 2014) appelle réseau social un système de relations entre les membres d'un ensemble social.

À l'origine, presque toutes les études de réseaux utilisaient une abstraction dont les systèmes sont représentés sous forme de graphes ordinaires (Bollobás 1998) : les «nœuds» ou «sommets» des graphes représentent une entité ou un agent, la relation entre une paire de nœuds est représentée en utilisant un seul lien statique et non pondéré. En mathématiques, un graphe G= (V, E) est un ensemble fini de nœuds (sommets) V et un ensemble de paires $E \rightarrow V \times V$ où :

- V est un ensemble non vide d'entités sociales (individus, organisations, départements etc.) nommées aussi nœuds, agents, acteurs ou instances;
- E est un ensemble d'uplets <x,y>, $x,y \in V$, $x \neq y$ et pour chaque paire d'uplets <x,y>, <x',y'> si <x,y>≠<x',y'> et x=x' alors y≠y'.

Les réseaux sociaux qui représentent un seul type de relations sont appelés réseaux sociaux monocouches (Magnani and Rossi 2011).

Il est bien évident que dans le monde réel, plus d'un type de relation peut exister entre deux acteurs (par exemple, liens de famille, liens d'amitié et liens de travail) et que ces liens peuvent être si étroitement liés qu'il est impossible de les analyser séparément (Szell, Lambiotte et al. 2010). Un réseau social multiplexe est un réseau étendu à plusieurs sommets entre des paires de nœuds / acteurs. Il est défini comme un uplet <V, E, L> où:

- V est un ensemble non vide d'acteurs (entités sociales);
- L est un ensemble fixe de couches (types de relation).

- E est un ensemble de uplet <x,y,l>, x,y∈V, l∈L, x≠y et pour chaque deux uplet <x,y,l>, <x',y',l'>∈E si <x,y,l>≠<x',y',l'>, x=x' et y=y' alors l≠l';

Chaque couche dans le Réseau Social MultiCouche (RSMC) correspond à un type de relations entre les individus. Différentes relations peuvent résulter du caractère de la connexion, les types du canal de communication ou les types de diverses activités de collaboration que les agents (par exemple, les utilisateurs de divers services informatiques) peuvent effectuer dans un système donné ou dans un environnement donné. Les exemples de différentes relations peuvent être: l'amitié, la famille ou le voisinage. Les réseaux sociaux émergents de différents types de médias sociaux (par exemple : un agent qui a un compte Facebook, Twitter et Instagram) sont de bons exemples de réseaux multicouches. Les réseaux sociaux avec plusieurs types de relations entre les mêmes acteurs peuvent avoir différents noms. Le plus commun est Multi-layered social network (Magnani and Rossi 2011, Schneider, Rainwater et al. 2011, Bródka, Kazienko et al. 2012) mais aussi Multi-relational social networks (Szell, Lambiotte et al. 2010).

Les réseaux multicouches ou multiplexes permettent de mieux comprendre des phénomènes de propagation sur des réseaux hétérogènes. Ils peuvent également permettre de répondre à un certain nombre de questions importantes : Quels sont les nœuds importants du point de vue de la connexité ? Quel est le niveau de diffusion d'un nœud ? Quelle est la résistance d'un réseau c'est-à-dire lors de la suppression d'un certain nombre de nœuds, comment réagit le réseau ? Quel pourcentage de nœuds du réseau est requis pour observer un changement significatif dans la connexité du réseau ? Quels sont les nœuds les plus liés aux autres ? Quels sont les nœuds indispensables au bon fonctionnement du réseau ? Bien que la plupart des méthodes existantes fonctionnent correctement pour les réseaux à une seule couche, il y a un manque d'outils bien établis pour l'analyse de réseaux multicouches (Brodka and Kazienko 2014).

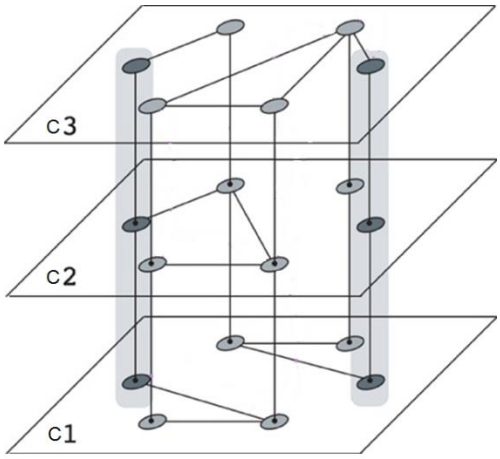


Figure 10. Exemple d'un réseau social multicouche.

La Figure 10 représente un réseau social multicouche avec M = 3 couches (C1, C2 et C3) et N = 6 nœuds. Les nœuds sont les mêmes dans les trois couches.

1.3.2 Spécification

Une partie du travail abordé dans cette thèse se base sur la représentation en modèles DEVS de réseaux. Nous allons donc introduire une classe de modèles DEVS qui peut représenter un réseau social. Cette classe doit permettre de définir un modèle composé d'ensembles finis de nœuds et d'arcs. Dans un réseau social les acteurs ou les agents communiquent et interagissent avec les autres agents via la manipulation des messages. Ces messages se traduisent dans le formalisme DEVS sous la forme d'événements. La spécification proposée d'un réseau social est un modèle couplé dynamique $DSDEVS_{RC}$ où toutes les entités, ainsi que les interactions entre les agents peuvent être modifiées par le modèle exécutif. Chaque nœud du réseau représente un agent spécifié par un modèle DEVS couplé M_{Agent} et les liens représentent les connexions entre les différents modèles de la structure $DSDEVS_{RC}$. Un réseau est formalisé sous la forme :

$$DSDEVS_{RC} = < X_{RC}, Y_{RC}, \chi, M_{\chi} >$$

Avec :

RC : le nom du réseau de modèles que définit DS-DEVS,

X_{RC} : l'ensemble des couples ports-événements d'entrée sur le réseau de modèles,

Y_{RC} : l'ensemble des couples ports-événements de sortie sur le réseau de modèles,

χ : le nom du modèle exécutif, c'est-à-dire le modèle qui définit la structure dynamique du réseau

M_{χ} : le modèle exécutif permet de modifier la structure du réseau en ajoutant, supprimant des modèles ou des connexions. Ce modèle est un DEVS atomique tel que :

$$M_{\chi} = < X_{\chi}, Y_{\chi}, S_{\chi}, \delta_{ext\chi}, \lambda_{\chi}, ta_{\chi} >$$

S_{χ} est un 7-uplet particulier définissant l'ensemble des états du système. Tout changement de ce 7-uplet correspond à un changement de structure du modèle exécutif. L'ensemble des états S_{χ} du modèle exécutif est définit par :

$$S_{\chi} = (X_{RC}^{\chi}, Y_{RC}^{\chi}, D^{\chi}, \{M_i^{\chi}\}, \{I_i^{\chi}\}, \{Z_{i,j}^{\chi}\}, V^{\chi})$$

Avec :

X_{RC}^{χ} : L'ensemble des événements d'entrée du réseau,

Y_{RC}^{χ} : L'ensemble des événements de sortie du réseau,

D^{χ} : L'ensemble des noms des modèles composant le réseau,

M_i^{χ} : Les modèles DEVS d'agents qui composent le réseau $\forall\, i \in D^{\chi}$,

I_i^{χ} : L'ensemble des influences de $i\, \forall\, i \in D^{\chi} \cup \{\chi, RC\}$, l'ensemble des modèles susceptible de recevoir un événement en provenance du modèle i (l'ego-network de l'agent i) y compris le modèle exécutif et le modèle DSDEVS,

$Z_{i,j}^{\chi}$: L'ensemble des connexions du modèle DSDEVS connectant le modèle i du modèle $j\, \forall\, j \in I_i^{\chi}$,

V^{χ} : L'ensemble des autres variables d'états nécessaire pour calculer les fonctions de transition.

Ce modèle couplé englobe la totalité des modèles représentés dans les sections précédentes, c'est-à-dire la structure de réseau et le comportement des agents.

1.3.3 Formalisation d'un réseau Multiplexe

Nous formalisons un réseau d'agents multiplexe comme un modèle couplé dynamique DS-DEVS où toutes les entités, ainsi que les interactions entre les agents peuvent être modifiées par le modèle exécutif. Chaque agent est spécifié par un modèle DEVS couplé (Voir la section 1.2.2). Ce dernier comprend plusieurs modèles atomiques (un serveur et i proxies avec i= 1…n où n est le nombre de couche du réseau).

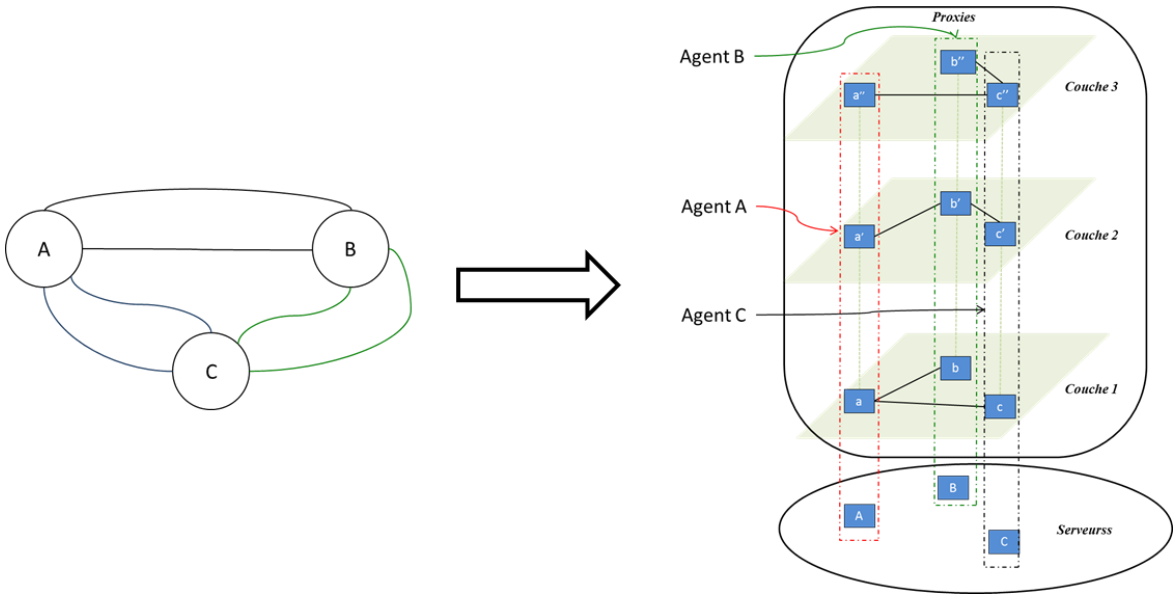


Figure 11. Représentation de la structure d'un réseau multiplexe en considérant trois agents et trois types de relation entre ces agents.

Nous définissons un agent comme un modèle DEVS couplé de la manière suivante :

$$SA = < D, \{Md \mid d \in D\}, IC >$$

Où :

D = {Serveur, $Proxy_j$} avec j=1…n où n est le nombre total de types de relation entre les agents dans le système,

$M_{proxy(j)}$ | j=1… n est l'ensemble des modèles DEVS atomiques composant un agent,

IC = {(($M_{Serveur}$, out), ($M_{proxy(1)}$, in)),

($M_{Serveur}$, out), ($M_{proxy(2)}$, in)),

($M_{Serveur}$, out), ($M_{proxy(3)}$, in)),

($M_{proxy(1)}$, out) ($M_{Serveur}$, in)),

($M_{proxy(2)}$, out) ($M_{Serveur}$, in)),

($M_{proxy(3)}$, out) ($M_{Serveur}$, in))}

La Figure 12 représente un modèle DEVS couplé de l'agent « A » modélisé dans la Figure 11. Ce modèle est divisé en quatre modèles DEVS atomiques :

- Un modèle Serveur « A » représente le cœur de l'agent; c'est le modèle responsable du comportement global de l'agent.
- Trois modèles Proxy (« a », « a' », « a'' »), chacun en interaction avec d'autres agents par le biais d'une couche sociale spécifique de relation.

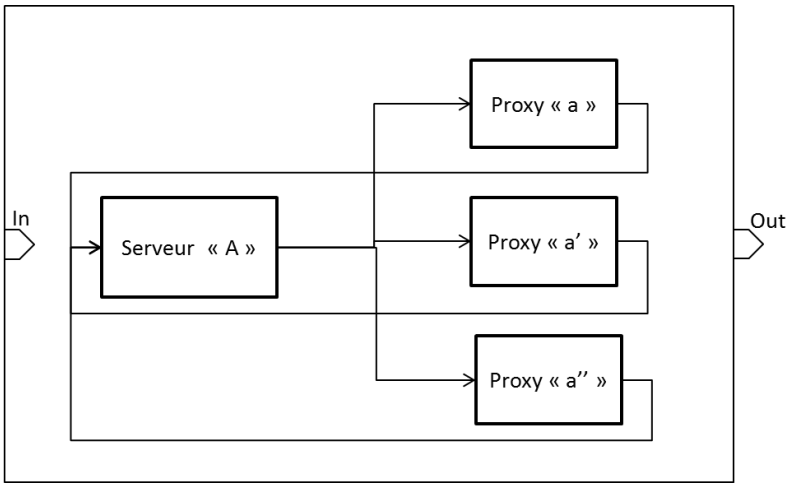


Figure 12. Représentation de la structure d'un agent composé d'un serveur et trois modèles proxies.

1.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une spécification des acteurs d'un réseau social. Cette spécification utilise les principes de DEVS et de l'extension DS-DEVS qui permettent la modularité, la hiérarchie et la dynamique de la structure, pour définir les différents modèles des entités. Un agent possède deux parties distinctes définissant le comportement et les interactions avec l'environnement et les autres agents. Notre formalisation s'attache à un principe simple : affecter à chaque entité une classe de comportement. Le but étant de réaliser des modèles DEVS qui n'accomplissent qu'un seul type action afin de diminuer la complexité. Le

couplage des modèles DEVS gère alors les interactions entre ces différentes entités. En général, Cette flexibilité permet d'étudier des systèmes à de nombreuses échelles et d'intégrer des pièces qui sont spécifiées à différentes échelles dans un ensemble cohérent.

2> Phénomène de Propagation au sein des Réseaux Sociaux

2.1 Modèles de diffusion et d'influence existants

Les modèles pour la prévision de la diffusion de l'information dans les réseaux sociaux reposent sur de nombreux travaux menés dans divers domaines. Ils s'inspirent en particulier des travaux menés en épidémiologie – dans le but d'anticiper la propagation de maladies au sein d'une population – et en marketing – dans le but de prédire l'adoption d'un produit ou d'une innovation parmi un groupe de consommateurs. Nous observons que les principes de modélisation de la plupart des phénomènes de propagation se basent sur un même concept : une transition d'état chez les entités étudiées. Les modèles standards de diffusion représentent les entités comme pouvant prendre plusieurs états. Nous trouvons généralement un état initial, qui représente le fait que l'entité ne soit pas atteint par le phénomène, puis des états intermédiaires qui modélisent l'évolution du processus selon la perception que l'individu a du phénomène, ou l'effet qu'il a sur lui. Comme présenté dans la section 2.2.1 du chapitre 2, les individus sont généralement catégorisés selon qu'ils soient *« Susceptible »*, « *Infected* » ou *« Recovered »* (Christley, Pinchbeck et al. 2005, Christakis and Fowler 2010), un individu Susceptible est un individu qui n'est pas encore infecté par la maladie, mais qui peut le devenir s'il entre en contact avec un individu infecté. Les individus dans l'état Infected désignent ceux qui transmettent la maladie en infectant les individus Susceptible. Enfin, les Recovered sont les individus qui ont guéri de la maladie et qui ne peuvent plus ni la contracter, ni la diffuser. De nombreuses variantes de ces modèles peuvent être imaginées : par exemple, en ayant des probabilités de contamination variables selon les nœuds, ou en ayant des nœuds qui, même infectés ne contamineront pas les autres (par exemple pour un virus informatique). Le modèle SI se rapproche du modèle IC (Independant Cascade), comme montré dans (Kimura, Saito et al. 2007). Le modèle IC (Goldenberg, Libai et al. 2001) est basé sur le principe suivant : quand une entité n_j est contaminée, il a une unique chance de contaminer chacune de ses voisines sortantes n_i avec une probabilité P_{ji} qui dépend de n_j et de n_i.

Dans le contexte de la diffusion de rumeurs, la plupart des modèles considèrent également trois états : *« Ignorant »* pour ceux qui ignorent la rumeur, *« Spreader »* pour ceux qui la propagent et *« Stiffler »* pour ceux qui tentent de l'étouffer (Daley and Kendall 1965, Nekovee, Moreno et al. 2007). Pour la diffusion de connaissances ou d'innovations, on retrouve les

états : *« Interested »* et *« Adopted »* (Granovetter 1978, Gruhl, Guha et al. 2004).

Des divergences peuvent être observées au niveau de la représentation de l'évolution du processus par les états. La première divergence est dans les mécanismes de transitions, qui peuvent être liés à la nature du phénomène, l'environnement des nœuds, le temps passé d'un état et même à la connaissance actuelle que l'on a du phénomène. Par exemple, la probabilité qu'un individu dans l'état Susceptible passe à l'état Infected croît avec le nombre de ses voisins infectés. De même, un individu dans l'état Infected passe à l'état Recovered selon une certaine probabilité. Cet état traduit le fait que la maladie ne sera plus transmise par cet individu soit par l'application de soins, la mise en quarantaine ou le décès de l'individu. En revanche, quand il s'agit de rumeurs, un Spreader peut devenir Stiffler de deux façons : quand il est en contact avec un autre Spreader, ou quand il a un contact avec un Stiffler. La deuxième divergence est dans l'objectif de la modélisation, qui est souvent dépendant de la sémantique du problème. Les objectifs peuvent être radicalement différents selon le type de phénomène considéré. Par exemple, les modèles de diffusion d'épidémies ou de virus informatique, tentent souvent de reproduire l'évolution réelle de l'infection, dans le but de mesurer l'effet de stratégies d'intervention visant à limiter, voire même idéalement éradiquer complètement le processus (Salathé, Kazandjieva et al. 2010). Dans le contexte de la diffusion d'information (diffusion de rumeurs ou d'opinions), l'objectif est de maximiser le nombre d'individus affectés par le phénomène (Michalski and Kazienko 2015).

Les modèles épidémiologiques, ou compartimentaux, sont couramment utilisés pour modéliser puis prévoir la diffusion de l'information dans les réseaux sociaux (Saito, Kimura et al. 2012, Cheng, Liu et al. 2013) , leurs paramètres étant estimés à l'aide de traces de diffusion passées. Leskovec et al. proposent par exemple de modéliser la diffusion de l'information à l'aide du modèle épidémiologique SIS (Leskovec, McGlohon et al. 2007). Celui-ci est semblable au modèle SIR – I signifiant dans ce cas que l'utilisateur a reçu l'information et participe à sa diffusion – sauf que les utilisateurs atteignant l'état *Recovered* retournent immédiatement dans l'état *Susceptible*. Les modèles épidémiques ont également été appliqués à la diffusion de virus informatique (Wierman and Marchette 2004), la diffusion de fichiers dans des réseaux pair-à-pair (Albano, Guillaume et al. 2012) ou même la diffusion de rumeurs (Zanette 2002).

Une autre catégorie de modèles appelée modèles d'influence sociale ou également modèles à seuil tel que le modèle de seuil linéaire développé par (Granovetter 1978) est aussi utilisée pour la diffusion d'information. Dans ces modèles un individu est activé si le nombre ou la proportion de ses voisins déjà activés est supérieur à un seuil qui lui est propre. C'est donc la pression sociale qui est déterminante ici pour l'activation.

Nous avons conservé dans notre modèle de simulation de la diffusion d'information ces deux aspects fondamentaux : une représentation du phénomène sous forme d'états au niveau des nœuds, et des transitions entre ces états pouvant être fonction de nombreux facteurs : probabilité fixe, les émetteurs d'information et leur état, les comportements associées aux récepteurs de l'information, environnement social, temps écoulé, etc.

2.2 Modèle proposé

2.2.1 Description du modèle

Entrée. Soit G = (N, E) un graphe non-orienté qui modélise un réseau social interconnectant des individus, où N est l'ensemble des individus du réseau social et $E\ (\subset N \times N)$ est l'ensemble des liens connectant les individus, de telle sorte qu'un lien ($n_x \leftrightarrow n_y$) signifie que les deux entités (n_x et n_y) sont connectées entre elles et peuvent propager le message entre elles. Soit un ensemble S ⊂ N d'utilisateurs étant les premiers à relayer une information I. Le Tableau 4 donne les notations utilisées dans le reste de ce chapitre.

Sortie. En supposant que l'information se propage au sein du réseau en partant des entités de l'ensemble S, l'objectif consiste à prévoir l'évolution du volume d'individus influencés à propos de l'information I. Supposer que la diffusion d'une information I est due à l'interaction entre les individus, revient à considérer un monde fermé, où – hormis les entités de l'ensemble S – les utilisateurs ne sont influencés que par leurs voisins dans le graphe G. Autrement dit, nous ne considérons pas de sources d'influence externes.

Tableau 4. Liste de quelques notations utilisées dans le chapitre 3.

Notation	Définition
N	Ensemble des entités
n_x	Un individu appartenant à l'ensemble *N*
$G=(N,E)$	Réseau social interconnectant les individus
E	Ensemble des liens non-orientés du réseau social
Γn_x	Ensemble des voisins de *nx* dans le graphe *G*
EVE	Evènement propageant entre les entités de l'ensemble *N*
I	Une information décrite par un terme principal et un ensemble de mots liés
t	Variable modélisant le temps

ψ	Série de nœuds activés
DI	Degré d'intérêt apporté par un individu à une information

La méthode que nous proposons comporte deux volets. Tout d'abord, un processus de diffusion basé sur la structure de réseau permet de modéliser précisément l'influence entre chaque paire d'individus connectés. La modélisation de ce processus est centrée sur les récepteurs. Dans ce cas, on considère que chaque membre du réseau peut être soit inactif, soit actif, un membre actif étant un individu ayant reçu l'information et participant à sa propagation. Cela permet de simuler la dynamique de la diffusion qui repose sur l'état des nœuds et leur évolution. Ensuite, nous proposons une procédure basée sur la communication persuasive pour le traitement de message par les récepteurs (Figure 13). Ce processus permet de simuler et d'étudier la dynamique du réseau qui s'exprime par des changements au niveau des attributs dynamiques (variables) des nœuds.

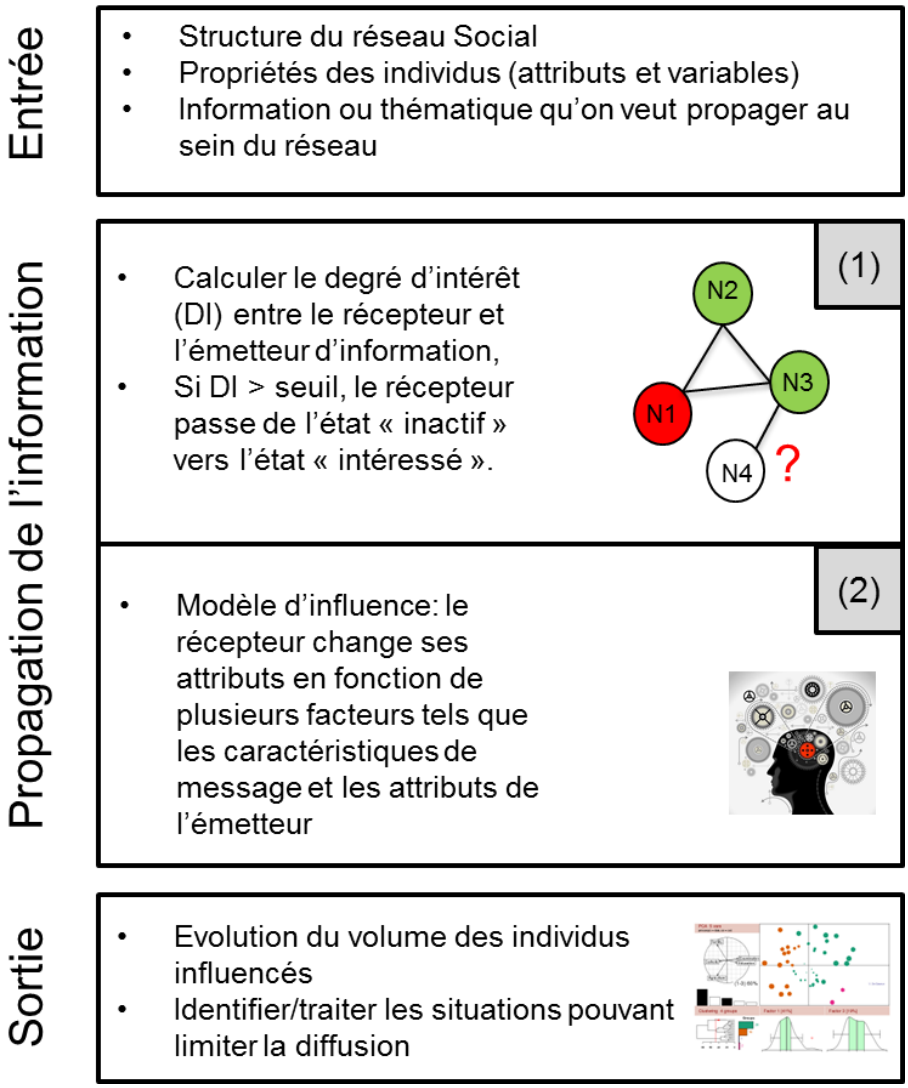


Figure 13. Description du modèle de propagation.

Le processus de diffusion, est initié à partir d'un ensemble S d'individus activés. Chaque individu n_y nouvellement activé à un instant t peut influencer chacun de ses voisins n_x inactifs en fonction des plusieurs facteurs (attributs de l'émetteur, thème de message, similarité entre l'émetteur et récepteur etc.). Nous considérons que l'agent n_x est intéressé par l'information communiquée par n_y si le degré d'intérêt est supérieur à un seuil. Les voisins que n_y a influencés deviennent actifs à leur tour. Le processus de propagation s'arrête lorsqu'aucune nouvelle activation n'est possible.

```
Données: Un ensemble U d'individus et leurs attributs, le
réseau social modélisé par le graphe G = (N, E).

Paramètres : Une Information, les caractéristiques de
l'information, un ensemble ψ(t0) d'individus initiant la
diffusion, les équations permettant de mettre à jour le
comportement des individus influencés.

Résultat : la série finale des individus influencés ψ(L)

l = 0;
Acceptation=0;
Tant que l =  0 ou ψ(t_{l-1}) ≠ ψ(t_l) faire
  ψ(t_{l+1}) = ψ(t_l);
  Inactivé = M - ψ(t_l);
  Pour tout m ∈ Inactivé faire
    Si recevoir l'événement (E, t) du voisin activé de m Alors
      DI=catculerDegreeInteret(E, attributs_emetteur);
      Si DI > Seuil alors
        // Le récepteur a un intérêt pour le message
        Acceptation = 1;
        Update(opinion, besoin);
        ψ(t_{l+1}) = ψ(t_{l+1}) ∪ {m};
      fin
    fin
  fin
  l = l+1;
fin
ψ(L) = ψ(l);
```

Figure 14. Algorithme de propagation.

Dans le modèle que nous proposons, le changement d'état d'un nœud d'un état *« inactif »* à un état *« intéressé »* ou *« ignorant »* est fonction de divers facteurs qui interviennent dans le calcul de la variable « degré d'intérêt ». Ces facteurs varient en fonction de l'application. La deuxième partie du modèle concerne le calcul du changement de l'attitude de l'agent (changement d'opinion par rapport à une thématique, changement de ces besoins fondamentaux, etc.). Ce processus est détaillé dans la Figure 14.

2.2.2 Mécanisme de propagation dans les réseaux multiplexes

Dans cette partie nous nous concentrons sur le mécanisme de propagation dans les réseaux sociaux multicouches. Le terme générique est un terme qui réfère à un certain nombre de modèles impliquant plusieurs types de relations. Dans ce cas toutes les couches contiennent le même ensemble de nœuds. Les connexions entre les nœuds au sein des couches identiques ou différentes représentent les canaux à travers lesquels différents types d'information peuvent se propager, ce qui donne lieu à des processus de propagation (Figure 15). Les liens Intra-couches et les interactions entre couches sont représentées en traits pleins, tandis que les lignes en pointillés représentent la propagation d'un article entre les nœuds.

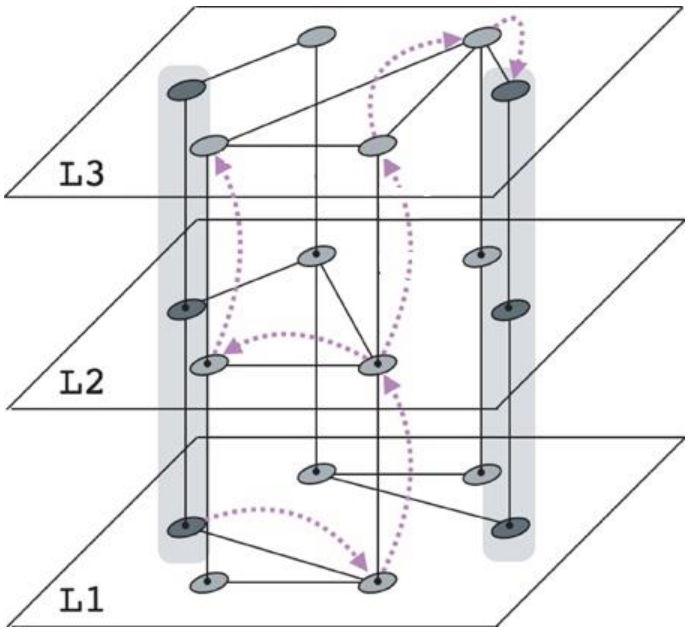


Figure 15. Exemple de propagation d'information dans un réseau multicouche.

En général, il existe trois possibilités pour qu'une information se propage au sein d'un réseau multicouche (voir Tableau 5): même-nœud différentes-couches, quand l'information se propage entre le même nœud mais dans des couches différentes. Autre-nœud même-couche, un article continue sa propagation au sein de la même couche. Autre-nœud autre-couche, Quand l'information se propage entre les nœuds et à travers plusieurs couches.

Tableau 5. Différentes possibilités pour la propagation d'un article au sein un réseau multicouche.

	Même nœud	***Autre nœud***
Même couche	Inutilisé	Diffusion entre les différents Nœuds de la même couche
Autre couche	L'information change de couche vers le même nœud	L'information se propage entre les nœuds et à travers plusieurs couches.

Dans ces travaux, nous avons réalisé une plateforme permettant d'étudier les phénomènes de propagation dans les réseaux sociaux multiplexes par la simulation. Dans la suite de ce document nous décrirons les différents modules du simulateur ainsi qu'un cas d'étude complet sur la propagation dans un réseau social multicouche.

2.3 Conclusion

Dans cette section, nous avons proposé un algorithme de propagation intégrant le processus de diffusion et l'action de l'influence de l'information au sein d'un réseau social multiplexe. En effet, en partant du constat que les travaux traditionnels sont stochastiques et ne tenaient pas compte de la dynamique et de la complexité des réseaux, nous avons proposé une approche générique, permettant la modélisation et la simulation d'un phénomène de propagation sur des réseaux multiplexes. Cette approche permet d'étudier l'impact de la sociabilité sur le phénomène de propagation. Les travaux menés ont également des implications directes pour l'étude des réseaux sociaux, puisqu'ils nous amènent à nous interroger sur les méthodes de modélisation de la dynamique et des processus prenant place sur les réseaux.

Chapitre 4 : Architecture de modélisation et de simulation des phénomènes de propagation

Résumé

Dans le cadre de ce chapitre, nous proposons une architecture et une maquette de la modélisation et de la simulation basée sur les travaux de formalisation développés dans le chapitre 3. Le contenu de ce chapitre est la description des trois modules permettant d'intégrer les modèles opérationnels de propagation. La partie simulation est développée sous la plate-forme VLE (Quesnel, Duboz et al. 2009) où chaque modèle est un composant du cadriciel VLE. Dans ce chapitre, nous exposons les bases du développement de la maquette de modélisation et simulation, avec une définition du cycle de génération d'une société d'agents, de la simulation de l'impact d'une information au sein d'un réseau social multicouche et sa traduction sous VLE et de la partie de visualisation et d'exploitation de résultats de simulation sous R.

Sommaire

Chapitre 4 : Architecture de modélisation et simulation des phénomènes de propagation .65
1> Contexte et architecture générale 67
1.1 Contexte 67
1.2 Architecture générale 67
2> Génération de population pour la simulation de réseaux 68
2.1 Présentation générale 68
2.2 Dimensions et Algorithmes 69
2.2.1 Les nœuds 69
2.2.2 La dimension familiale 70
2.2.3 La dimension amicale 72
2.2.4 La dimension de voisinage 72
2.3 Conclusion 74
3> Module de la simulation de la propagation d'information: Simulation 75
3.1 Modélisation Opérationnelle Agent 75
3.2 Représentation de Comportement d'Agents 76
3.3 Environnement de simulation 77
3.3.1 Présentation de l'environnement VLE 77
3.3.2 Implémentation de modèles opérationnels de phénomène de propagation dans un réseau social multicouche. 79
4> Traitement et Analyse des résultats de simulation: Post Simulation 82
4.1 Projet R 82

4.2 Analyse de sensibilité.....83
4.3 Analyse Exploratoire des Données 85
4.4 Conclusion.....85

1> Contexte et architecture générale

1.1 Contexte

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé une maquette de modélisation et de simulation des phénomènes de propagation au sein d'un réseau social multiplexe. Le fil conducteur de ce chapitre est la description de l'activité de modélisation et de simulation adoptée dans notre maquette. Nos travaux sont issus d'un développement multidisciplinaire entre l'informatique et la sociologie. Nous utilisons la plate-forme VLE (Quesnel 2006) basée sur les travaux de B.P. Zeigler (Zeigler, Praehofer et al. 2000). Dans cette section, nous exposons les bases de l'architecture proxy/server et les services de la maquette de M&S, avec une définition du cycle de génération des réseaux, le service de simulation à événement discret et la partie d'analyse et de visualisation des résultats de simulation.

1.2 Architecture générale

Nous distinguons trois phases principales dans le processus d'étude des phénomènes de propagation (Figure 16) :

- Pré-simulation : la génération du modèle statique de la population,
- Simulation : l'instanciation des modèles des agents et de leurs réseaux (représenter le comportement des individus et leurs interactions) ainsi que la simulation de la propagation d'information dans le réseau
- Pos-simulation : l'analyse des résultats (accompagnée d'actions).

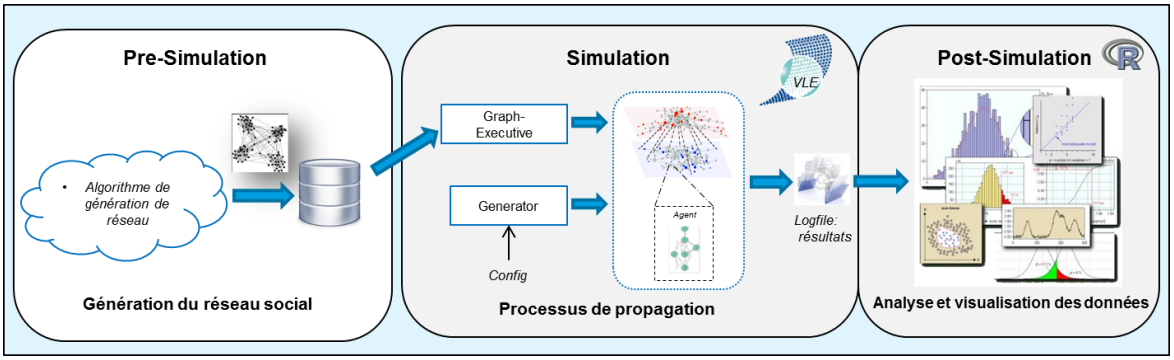


Figure 16. Maquette opérationnelle de phénomène de propagation.

Avec l'augmentation de la complexité des systèmes, la modélisation et la simulation demandent des outils informatiques de plus en plus performants. En particulier, les champs de recherche comme la sociologie utilisent des logiciels de modélisation et de simulation afin de mieux comprendre la dynamique des systèmes étudiés. Le principal challenge est de respecter le cycle de modélisation et de simulation présenté dans la Figure 17. En effet, le modélisateur doit être capable de définir ses modèles via l'utilisation de plusieurs formalismes. Il doit pouvoir définir des cadres

d'expériences en manipulant les entrées et les sorties de ses simulations pour affiner les paramètres de ses modèles en fonction de ses observations (interprétation des résultats) ou encore, changer le comportement de ses modèles si ceux-ci ne fournissent pas les valeurs attendues.

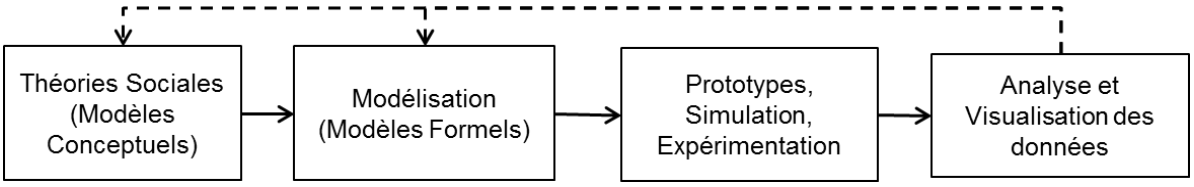


Figure 17. Cycle de modélisation et de simulation

Les actions, représentées par les boîtes sur la Figure 17, ont les traductions suivantes dans notre maquette:

- Modèles conceptuels : correspond aux données sociales de la population et à la topologie du réseau social. Ces données sont transformées en modèles formels.
- Modèles formels : des modèles atomiques, ou des compositions de modèles fournis par la plate-forme ou développés par le modélisateur.
- Simulations : VLE est le moteur de simulation de la plate-forme, il fournit la traduction de la partie formelle en version opérationnelle en se basant sur le simulateur abstrait de DEVS. Les sorties de la simulation sont de deux types : en cours de simulation ou a posteriori. Elles sont obtenues via des composants d'observations et des flux de données.
- Analyses : un ensemble d'outils d'observations en temps réel de la simulation, par la plate-forme d'outils statistiques R (Ihaka and Gentleman 1996).

2> Génération de population pour la simulation de réseaux

2.1 Présentation générale

La plupart des modèles implémentés dans le domaine de la simulation des systèmes complexes nécessitent un grand nombre d'agents pour initialiser et calibrer le système étudié. Une reproduction précise des états initiaux est extrêmement importante pour obtenir des prévisions fiables à partir du modèle. Dans ce module, nous proposons des algorithmes de génération de graphes statiques en combinant différentes sources de données pour obtenir une représentation individuelle des agents, approchant le plus fidèlement possible la structure de corrélation d'une population réelle (Figure 18). Un autre élément important dont la plupart des modèles ont également besoin est la localisation des agents dans un environnement géographique d'étude.

Figure 18. Vision globale de l'étape de génération de la population.

2.2 Dimensions et Algorithmes

Dans cette section, nous présentons les trois dimensions (familiale, d'amitié et de voisinage) constituant un groupe primaire d'une société (Cooley 1956). L'auteur fait la différence entre le groupe primaire qui regroupe les individus qui passe plus de temps ensemble (par exemple la dimension familiale, d'amitié ou de voisinage) et le groupe secondaire qui est plus large et plus spécialisé dans lequel les membres s'engagent dans des relations impersonnelles et orientées par des buts (par exemple les organisations formelles, les associations, etc.).

2.2.1 Les nœuds

L'algorithme général de génération de la population commence par créer le nombre de nœuds souhaité par l'utilisateur pour son groupement (région, ville, village dans le cadre d'une société géographiquement identifiée ou département, service dans le cadre d'une organisation). Chaque nœud représente un individu. Dans la suite de cette section, nous illustrons notre approche par des exemples de type population civile.

Les nœuds sont définis par un certain nombre de caractéristiques ; certaines permettent de créer des relations, d'autres seront uniquement utilisées pour la diffusion de l'information.

Les caractéristiques pour décrire un individu sont les suivantes :

- Les données d'état civil : sexe, classe d'âge, niveau social, niveau intellectuel, langue, ethnie, religion, etc. ;
- Les rôles de chacun dans la famille : chef de famille, mari, femme, enfant, individus liés ;
- Les données de situation : besoin en sécurité, en alimentation, en logement, en santé, en relation sociale ;
- Les données d'accessibilité : télévision, radio, illettrisme, téléphone portable et internet ;
- L'opinion concernant un événement ;
- Des caractéristiques culturelles.

Ces données permettent de caractériser les individus en fonction des informations données par l'utilisateur à travers le fichier de configuration (données d'entrées).

2.2.2 La dimension familiale

Durant la phase de génération familiale, l'algorithme va assigner aux nœuds différents attributs tel que le sexe, la classe d'âge, etc.

Dans cette dimension on définit trois types de famille : la famille nucléaire, étendue et élargie. Chaque famille va être créée à partir d'une fonction. L'algorithme de génération de la dimension familiale va appeler chaque fonction pour construire la dimension familiale. La génération de ces trois groupes familiaux doit être prise en compte dans nos algorithmes pour créer la population finale souhaitée. Pour le phénomène de propagation d'information, il est important de définir le rôle des individus au sein de la famille.

De même, deux spécificités ont été prises en compte pour permettre la génération des familles sur des zones géographiques spécifiques : les familles monoparentales matricentrées ainsi que les familles polygames. L'algorithme demande en entrée le nombre de personnes seules dans le groupement, les proportions de chaque type de famille dans le groupement ainsi que les proportions de familles matriarcales et polygames. Ensuite, il choisit les attributs (ethnicité, langue et religion de la famille) qui vont être générés et définit si c'est une famille matriarcale ou polygame. Enfin, l'algorithme génère les personnes seules dont le nombre peut être plus ou moins important selon le type de groupement.

- La famille nucléaire

La famille nucléaire, appelée également famille conjugale, est composée d'un chef de ménage (H), son ou sa conjointe (W), et leurs enfants (C).

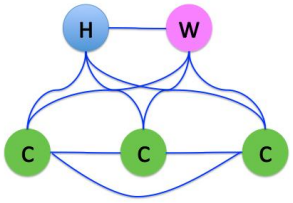


Figure 19. Graphe représentant la famille nucléaire.

Dans une première étape, la fonction qui permet de générer une famille de type nucléaire commence par assigner les rôles de mari et femme avec leurs caractéristiques respectives. Ensuite, Si la famille est polygame l'algorithme crée deux femmes pour un mari et si la famille est matriarcale, le rôle de chef de famille sera assigné à la femme (le nœud du mari ne sera pas créé). Enfin, l'algorithme choisit aléatoirement un chiffre entre 1 et 5 représentant le nombre d'enfants.

- La famille étendue

La famille étendue est un groupe de résidence large comprenant plusieurs hommes mariés (H et W) apparentés ainsi que leur progéniture (C).

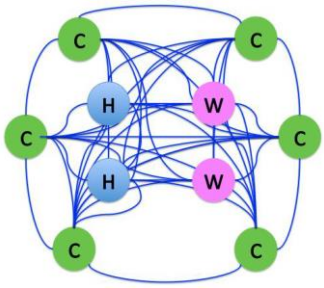


Figure 20. Exemple d'une famille étendue.

La fonction GenerationFamilleEtendue permet de générer une famille étendue dont le nombre de membres varie entre 9 et 20. L'algorithme crée d'abord le couple ou la personne (dans le cas des familles matriarcales) comprenant le chef de famille. Ensuite, il génère les autres couples faisant partis de la famille et enfin, les enfants.

- La famille élargie

La famille élargie se compose d'une famille nucléaire et des individus souvent apparentés (I). L'algorithme de génération appelle la fonction qui permet de générer la famille nucléaire et ensuite crée les individus liés à la famille.

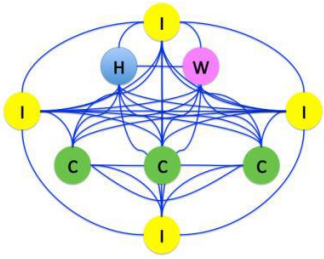


Figure 21. Représentation d'une famille élargie.

L'algorithme général va appeler chacune des fonctions en fonction de la proportion de chaque type de famille. La Figure 22 montre la dimension familiale : un ensemble de familles reliées entre elles au travers des chefs de famille.

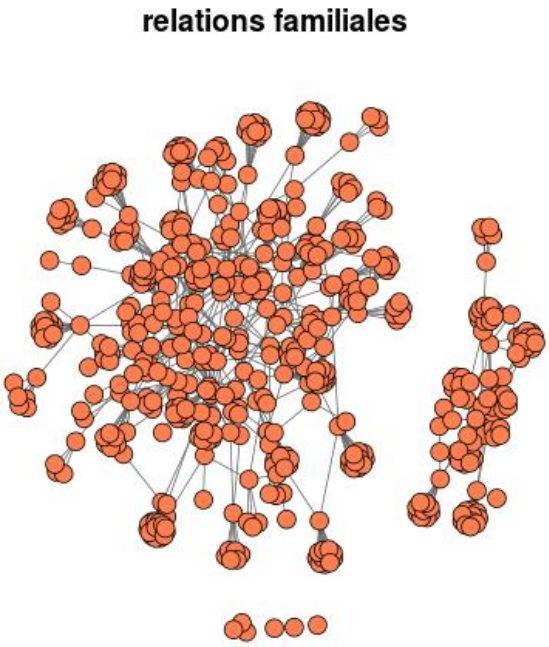


Figure 22. Dimension familiale d'une population de 550 individus avec 10% des individus seuls.

2.2.3 La dimension amicale

Le lien social d'amitié fait partie des trois relations de sociabilité primaire (Cooley 1956). La relation d'amitié est basée sur l'homophilie : les gens ont tendance à se lier avec des personnes qui leur ressemblent : même âge, même classe sociale, etc.

Ainsi, pour retranscrire le caractère homophile des relations amicales dans nos algorithmes nous avons créé une équation prenant en compte les caractéristiques des individus.

$$Homophilie = w_s * sexe + w_a * age + w_{sc} * niveau_{social} + w_e * ethnicité + w_l * langue + w_r * religion$$

Chaque paramètre de l'équation peut être pondéré afin d'augmenter ou diminuer son importance. Certaines sociétés peuvent privilégier les relations d'amitié entre personnes de même sexe, de même ethnie, etc. L'équation ci-dessus va être utilisée dans l'algorithme de génération des liens d'amitié.

2.2.4 La dimension de voisinage

La dimension de voisinage utilise les localisations géographiques des individus pour créer les liens. Notons aussi que cette localisation géographique pourra être utilisée ultérieurement pour définir des zones de réception d'un message selon le moyen de transmission (diffuser un message par radio ou de distribution de tracts sur une zone géographique précise). Notons aussi que comme chaque famille est considérée comme un foyer dans la dimension familiale, la position géographique est identique pour chaque membre de la famille.

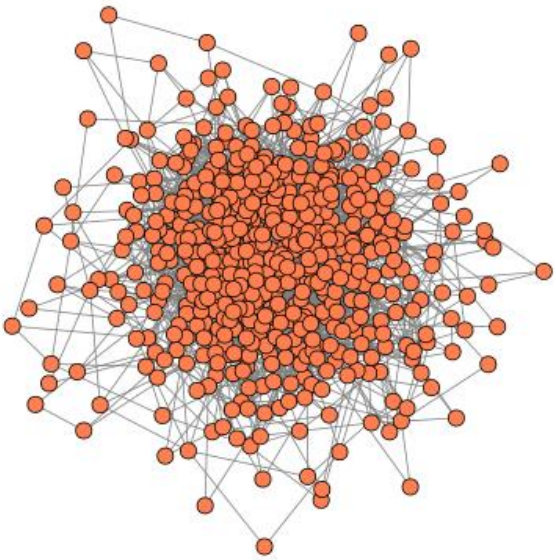


Figure 23. Réseau d'amitié d'une population de 550 individus.

L'algorithme de génération de liens de voisinage nécessite en entrée la distance maximale entre deux familles pour être considérée comme potentiellement voisine.

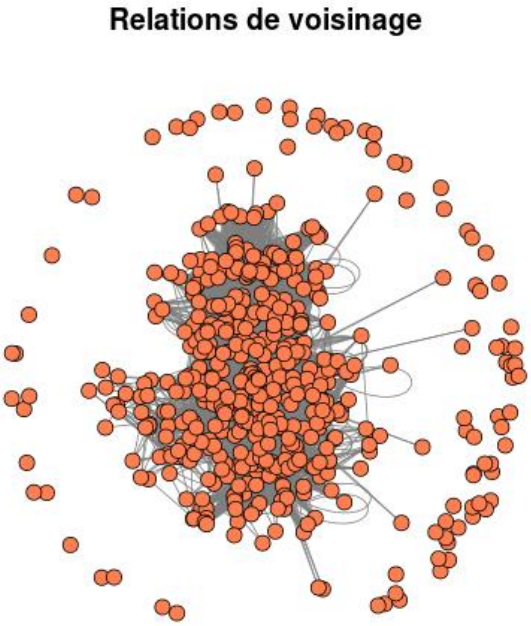


Figure 24. visualisation de la dimension de voisinage sans la localisation géographique sur une carte.

La visualisation géographique des individus se fait à partir du logiciel R, les liens de voisinage ne sont pas affichés mais chaque point représente un individu. La Figure 25 présente un exemple de visualisation géographique développée dans le cadre du projet SICOMORES. Les couleurs des points représentent l'opinion initiale des individus par rapport à un événement. Les autres informations telles que les besoins en santé, sécurité et en alimentation peuvent aussi être affichées.

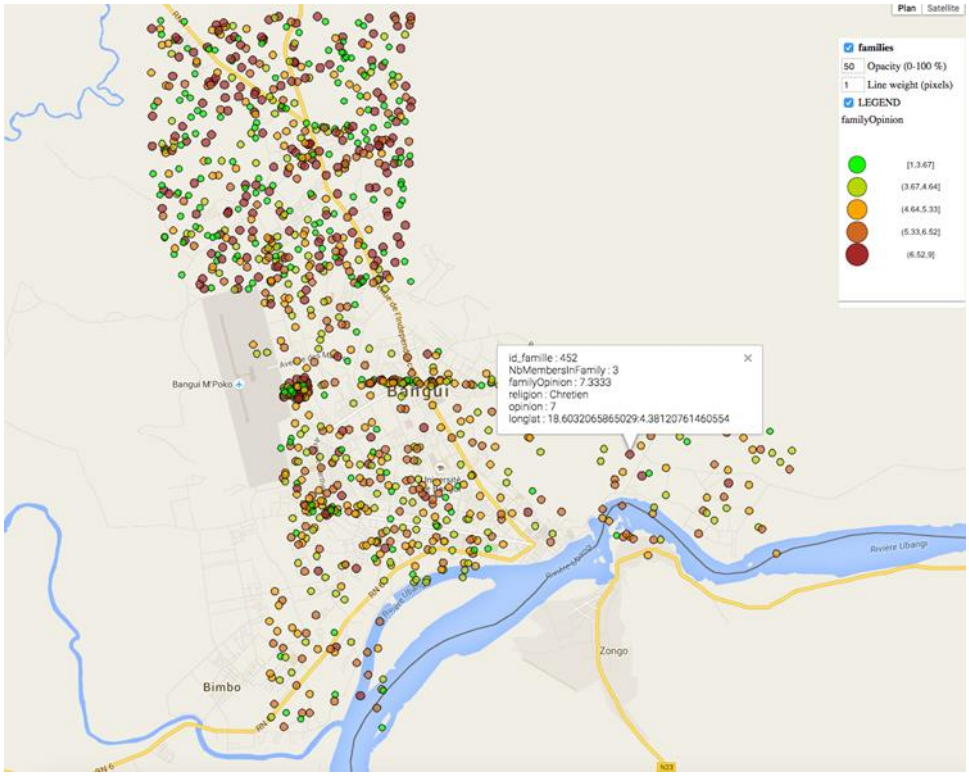


Figure 25 . Visualisation des individus sur une carte géographique.

2.3 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section une partie des algorithmes de génération de population en se focalisant sur le groupe primaire contenant les dimensions : familiale, amitié et voisinage. Le réseau social est de type multicouche, c'est à dire constitué de plusieurs couches sociales différenciées. Chaque couche représente un espace de sociabilité distinct et spécifique ; les communications différeront en famille, entre amis, ou avec les voisins. Les types de relation entre individus varient d'une couche à une autre et aussi d'une société à l'autre. En dehors de groupe primaire, nous pouvons générer d'autres liens d'interconnections entre les individus en fonction de l'application par exemple du lien politique, religieux, etc.

La structure globale pour la génération de la population est composée de deux éléments : le fichier de données d'entrée qui permet de configurer les valeurs des paramètres pour la population souhaitée et la base de données qui va permettre de faire le lien entre le module de génération de population et la simulation de la propagation de l'information.

3> Module de la simulation de la propagation d'information: Simulation

3.1 Modélisation Opérationnelle Agent

La modélisation opérationnelle conduit à l'élaboration d'un modèle opérationnel impliquant des choix d'architectures de modélisation et simulation. Cette étape propose une solution d'implémentation du niveau conceptuel du phénomène étudié.

Nous proposons d'intégrer les caractéristiques individuelles des agents lors de l'élaboration du modèle opérationnel. Pour la représentation des agents et de leurs comportements au niveau opérationnel, nous proposons une approche de modélisation permettant de différencier les processus opérationnels et les processus décisionnels. Chaque agent est composé de deux types de modèles : le modèle Serveur pour le processus cognitif et les modèles Proxies pour les processus opérationnels. Dans le module décisionnel des agents, nous implémentons le traitement cognitif des messages et des événements. Cette partie permet aux agents d'agir d'une manière autonome pour l'atteinte de leurs objectifs en adoptant un comportement complexe par la mise en œuvre de processus d'influence. Les Proxies adoptent des comportements simples pour la réalisation des activités de filtrage des événements externes. Nous proposons une architecture décrivant les liens entre les différents modèles.

C'est à partir de ce constat, à savoir la prise en compte et l'exploitation des événements, des actions et des interactions entre les entités du système réel, que s'est construite notre réflexion. Les systèmes dynamiques complexes comme les réseaux sociaux multicouches sont composés d'entités distinctes et de plusieurs moyens d'interaction. Un acteur représente une entité décisionnelle, pour la prise de décisions, ou une entité opérationnelle, pour la réalisation d'actions et les relations pour la transmission d'information. Afin d'appréhender les relations de dépendance entre ces types d'activités, à savoir le modèle de diffusion et d'influence, nous proposons une architecture de modélisation et de simulation basée sur le formalisme DEVS. La Figure 26 illustre l'approche retenue pour la modélisation des acteurs d'un réseau social multicouche.

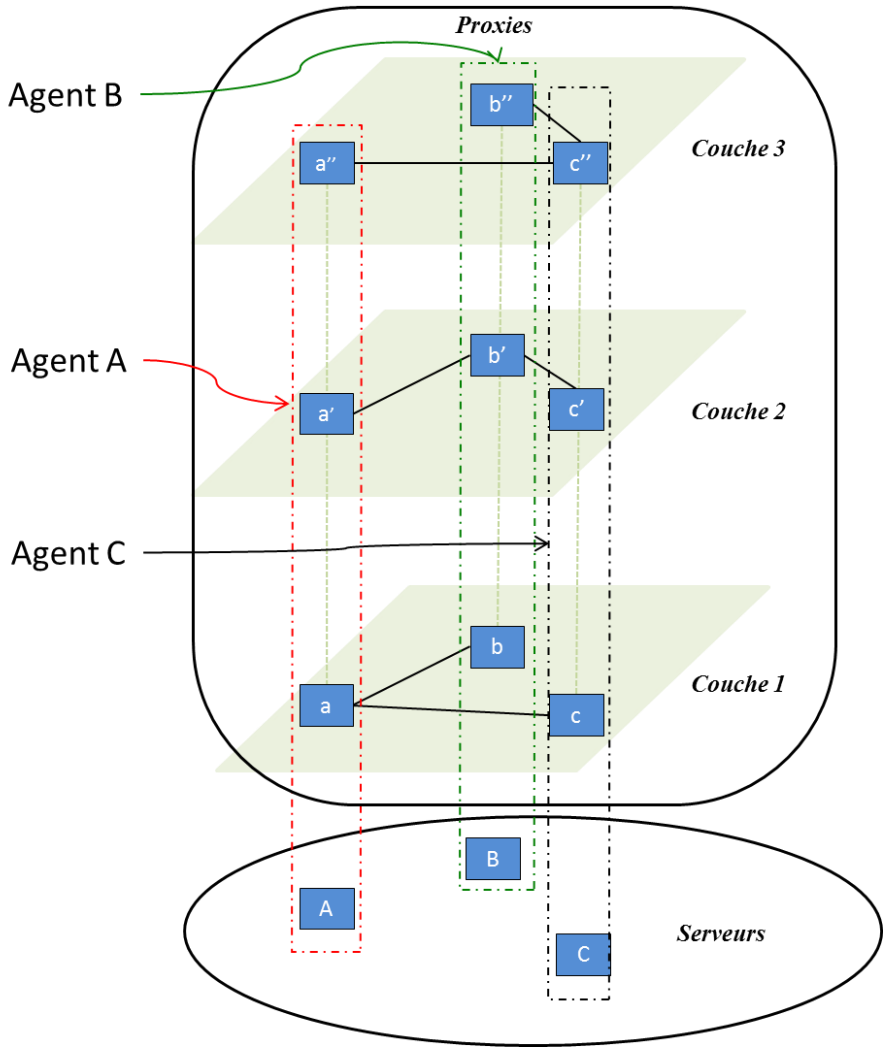


Figure 26. Architecture du modèle agents dans un réseau social multiplexe.

Les comportements de modèle Serveur d'un agent sont définis sous forme d'états et sont liés aux comportements des Proxies associés. Les états spécifient les actions réalisées suite à la réception de message des Proxies. Les interactions entre les modules Serveurs et Proxies se formalisent par l'envoi et la réception de messages. Ces interactions peuvent se décliner selon trois possibilités : (i) les interactions entre agents Proxies de la même couche, (ii) les interactions entre Proxy et Serveur, et (iii) les interactions entre Proxies d'un agent mais entre des couches différentes.

3.2 Représentation de Comportement d'Agents

Les agents peuvent renvoyer des comportements intelligents, résultats des actions autonomes qu'ils réalisent au sein de leur environnement. Les comportements de l'agent sont spécifiés sous la forme de graphes d'état en utilisant le formalisme DEVS. A partir des informations disponibles, l'agent traite l'information, met à jour ses variables (opinion, besoins...) et décide s'il va propager le message vers les autres agents ou bloquer la diffusion à ce niveau.

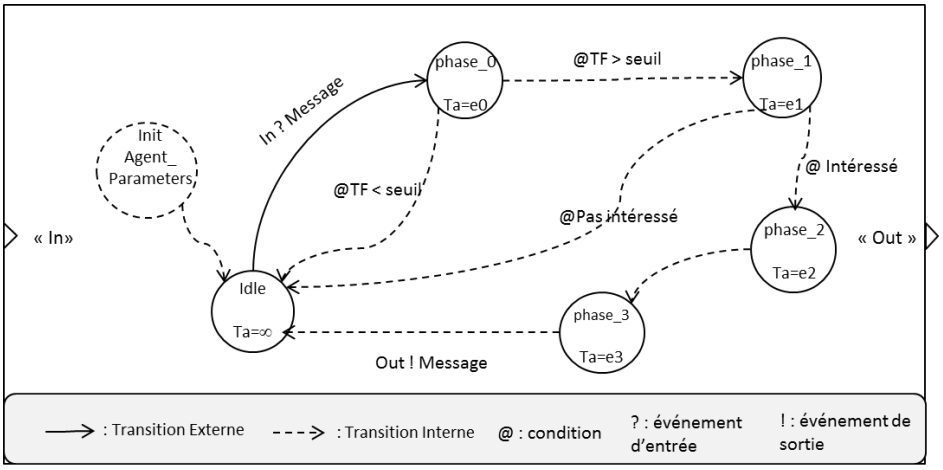


Figure 27. Exemple d'un modèle DEVS du comportement simple d'un agent.

Deux types d'événements peuvent apparaître pour animer dynamiquement le graphe : des événements internes et des événements externes. Les événements externes sont liés à la réception de messages, et correspondent à l'aspect communication du système multi-agents. Les événements internes correspondent aux activités internes à l'agent. Les transitions permettent le passage d'un état vers un autre. Ces états peuvent être actifs (l'exécution d'une action), ou passifs (états d'attente). Les états passifs sont modifiés lors de l'arrivée d'un événement externe (exemple : arrivée d'un message). La Figure 27 permet d'appréhender le formalisme DEVS pour la représentation des comportements d'agents. L'exemple proposé présente le comportement d'un individu lors de la réception d'un message et vérifie si le message est intéressant pour l'accepter et le traiter. Dans le cas où le message ne serait pas intéressant, l'agent ne va pas le propager vers les autres individus. La description du comportement dynamique du système nécessite l'implémentation du comportement individuel des agents ainsi que l'implémentation des interactions entre les agents. Un exemple de comportement cognitif sera présenté en détail dans la première partie du chapitre 5

3.3 Environnement de simulation

3.3.1 Présentation de l'environnement VLE

VLE, pour Virtual Laboratory Environment (Quesnel, Duboz et al. 2009), est une plate-forme de multi-modélisation et de simulation de systèmes dynamiques basée sur le formalisme à événements discrets DEVS (Zeigler, Praehofer et al. 2000). VLE permet de spécifier des systèmes complexes en termes d'objets et d'agent réactifs, de simuler la dynamique du système et d'analyser les résultats des simulations. Les librairies fournies permettent également le développement de programmes personnalisés. On peut citer le projet RECORD qui utilise VLE pour modéliser et simuler des agroécosystèmes (Couture 2012).

La modélisation d'un système dans la plate-forme VLE est en relation avec le programme GVLE. GVLE est une application graphique permettant de préciser le comportement des modèles atomiques, de composer de nouveaux modèles via les modèles couplés et de définir des hiérarchies de modèles (Figure 28). Elle possède, en outre, la possibilité de paramétrer les plans d'expériences avec les initialisations et les sorties des simulations.

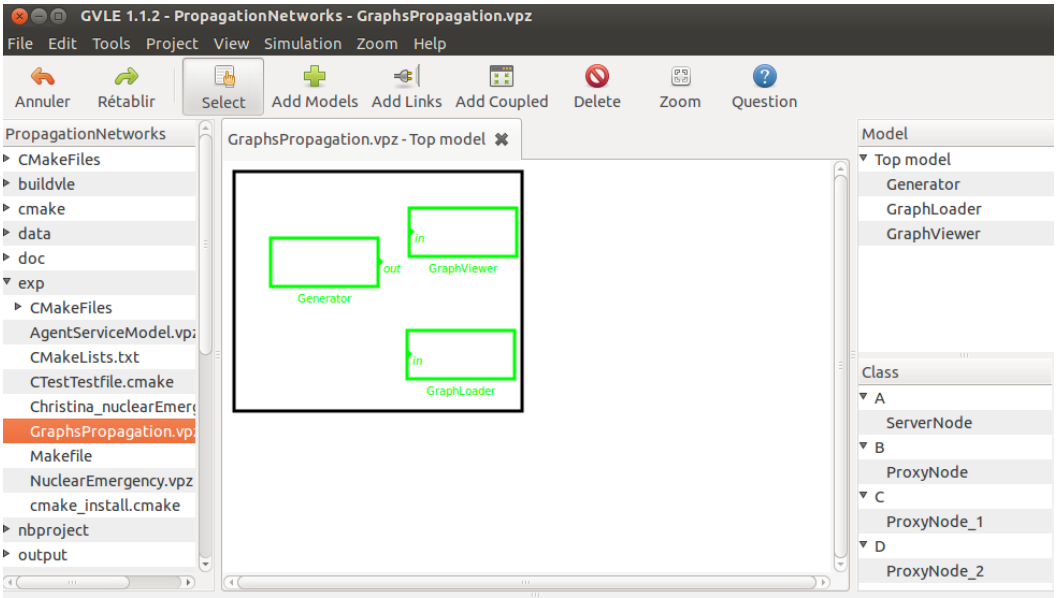


Figure 28.Interface graphique de l'environnement de modélisation GVLE.

Le développement du comportement des modèles atomiques utilise le concept de programmation orientée objets. En effet, VLE propose la classe devs::Dynamics comme interface fonctionnelle pour le développement de comportement de modèles atomiques. Cette classe est issue, pour une grande partie, des travaux de B. P. Zeigler sur les simulateurs abstraits (Zeigler, Praehofer et al. 2000). VLE utilise les concepts de programmation orienté objet notamment l'héritage et le polymorphisme qui permettent de simplifier le développement. La plate-forme fournit un ensemble de classes héritant de DEVS::Dynamics avec un comportement prédéfini, par exemple, la classe extension::QSS est adaptée à la résolution d'équations différentielles (Kofman 2002) , la classe extension :: DSDEVS est adaptée au changement de structure dans la hiérarchie de modèles dans DEVS (Barros 1995). Ces classes surchargent et protègent les méthodes virtuelles de DEVS::Dynamics et apportent une interface fonctionnelle différente mais adaptée au modèle à développer. La Figure 29 illustre le diagramme de classe UML simplifié de l'arborescence d'héritage implémenté dans VLE.

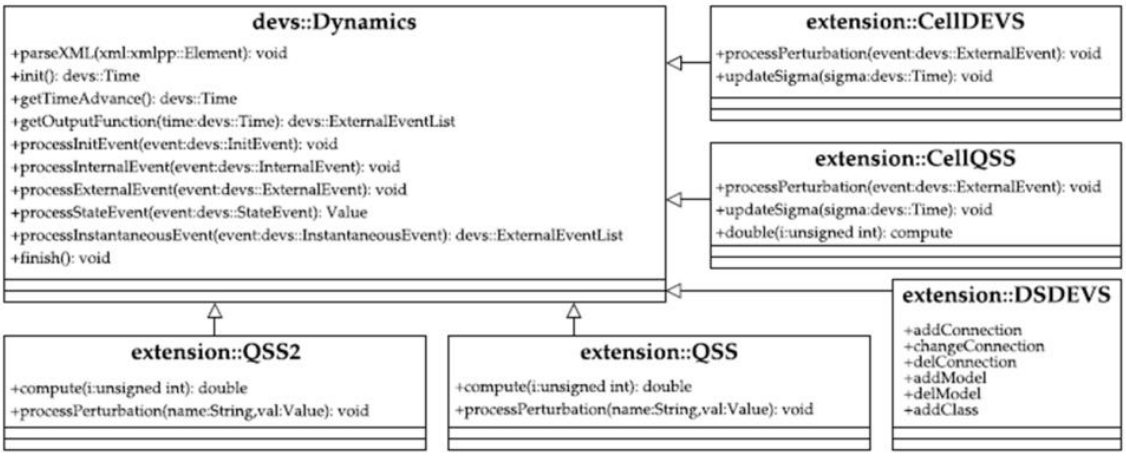


Figure 29. Diagramme de classe UML simplifié de l'arborescence d'héritage pour le développement du comportement des modèles atomiques.

3.3.2 Implémentation de modèles opérationnels de phénomène de propagation dans un réseau social multicouche.

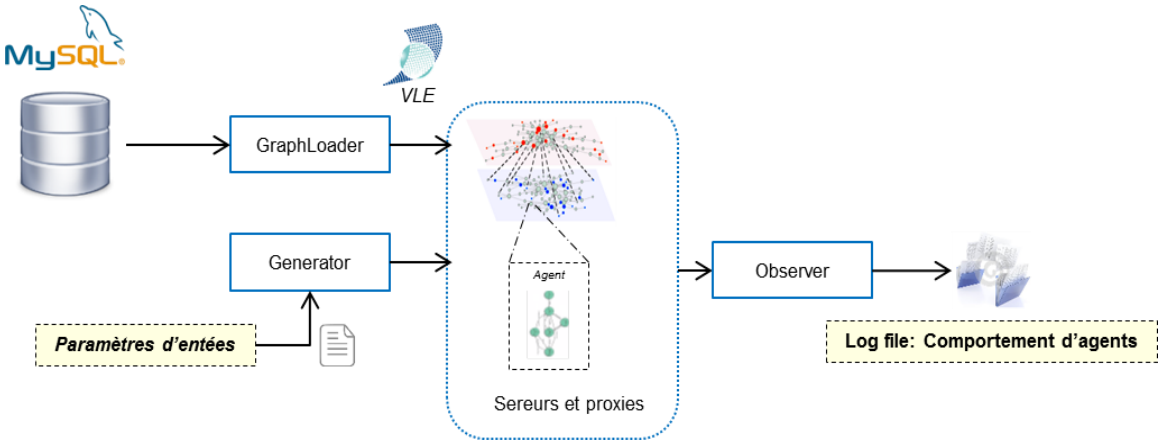


Figure 30. Modélisation et simulation des phénomènes de propagation sous VLE.

L'implémentation d'un modèle DEVS sous VLE est atteinte par un héritage de la classe modèle atomique DEVS, la classe modèle DS-DEVS ou une autre extension DEVS du cadre VLE (voir Figure 29). Nous présentons ici les modèles auxiliaires (GraphLoader, Generator et Observer) introduits dans notre maquette pour modéliser et simuler les phénomènes de propagation au sein d'un réseau social multicouche. La Figure 30 représente les classes illustrant la dynamique et le comportement des modèles auxiliaires introduits dans la maquette de simulation.

3.3.2.1 Generator

Ce modèle est connecté aux agents suivant le moyen de communication choisi pour transmettre l'information. Dans cette classe, nous initialisons et nous adaptons le message à propager au sein du réseau en fonction des configurations réglées par l'utilisateur de la maquette. La classe de comportement de ce modèle hérite de la classe devs ::Dynamic pour pouvoir exploiter les spécificités de formalisme DEVS.

3.3.2.2 *GraphLoader*

La classe de comportement de ce modèle hérite de la classe *extension::DSDEVS*, et permet la manipulation de graphes : Transformer un graphe statique en un réseau de modèle DEVS automatiquement (soit à l'état initial ou même en exécution). Nous utilisons GraphLoader pour charger les différentes informations stockées dans la base, créer les différents modèles DEVS (modèles serveurs et modèles proxies) et pour les connecter suivant la topologie du réseau présentée dans la base de données (tableau des relations) comme montre la Figure 31.

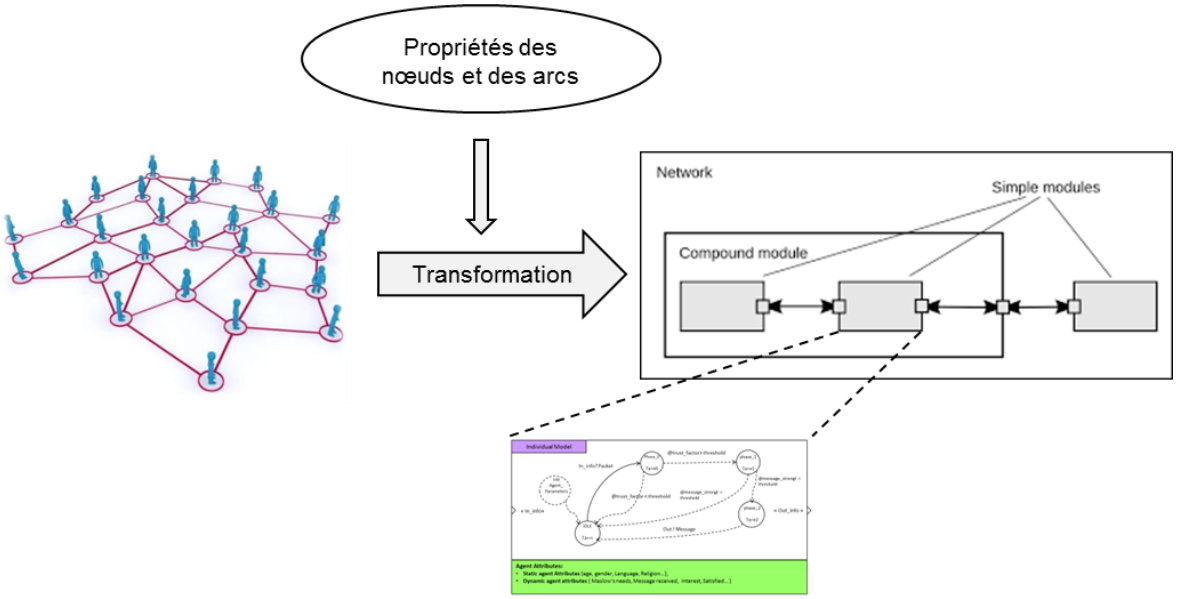


Figure 31. Transformation d'un graphe en DEVS.

La dynamique du modèle « GraphLoader » contrôle le réseau d'agents et leurs connections. Quand il reçoit un ordre de modification, il construit les nouvelles connexions et détruit les anciennes. Ce modèle hérite de la classe devs::exécutive afin d'être en mesure de manipuler le graphe de connexion en runtime. Comme la classe « GraphLoader » hérite de la classe devs::exécutive (qui se base sur la spécification DS-DEVS), il peut utiliser une API spécifique qui permet de construire, supprimer ou modifier les connexions.

3.3.2.3 *Observer*

Le modèle « Observer » (Figure 32) est connecté à tous les agents. Il sauvegarde dans le fichier de sortie l'état actuel du modèle à un moment donné et pour un port spécifique.

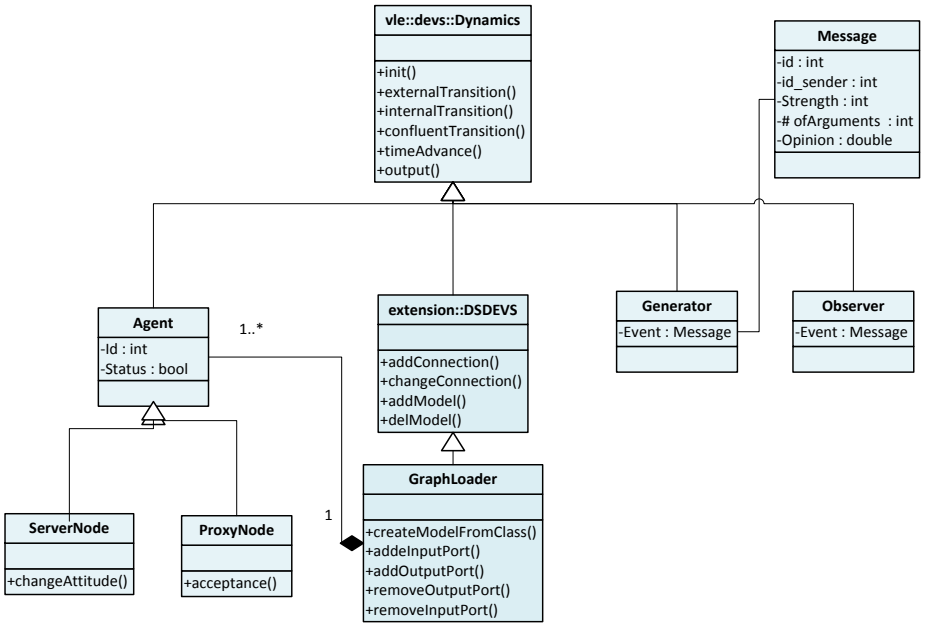


Figure 32. Diagramme UML simplifié de module de simulation.

La Figure 33 résume le mécanise de transformation d'un graphe statique en un réseau DEVS dynamique. Ce schéma illustre également l'approche proxy/serveur développée dans cette thèse.

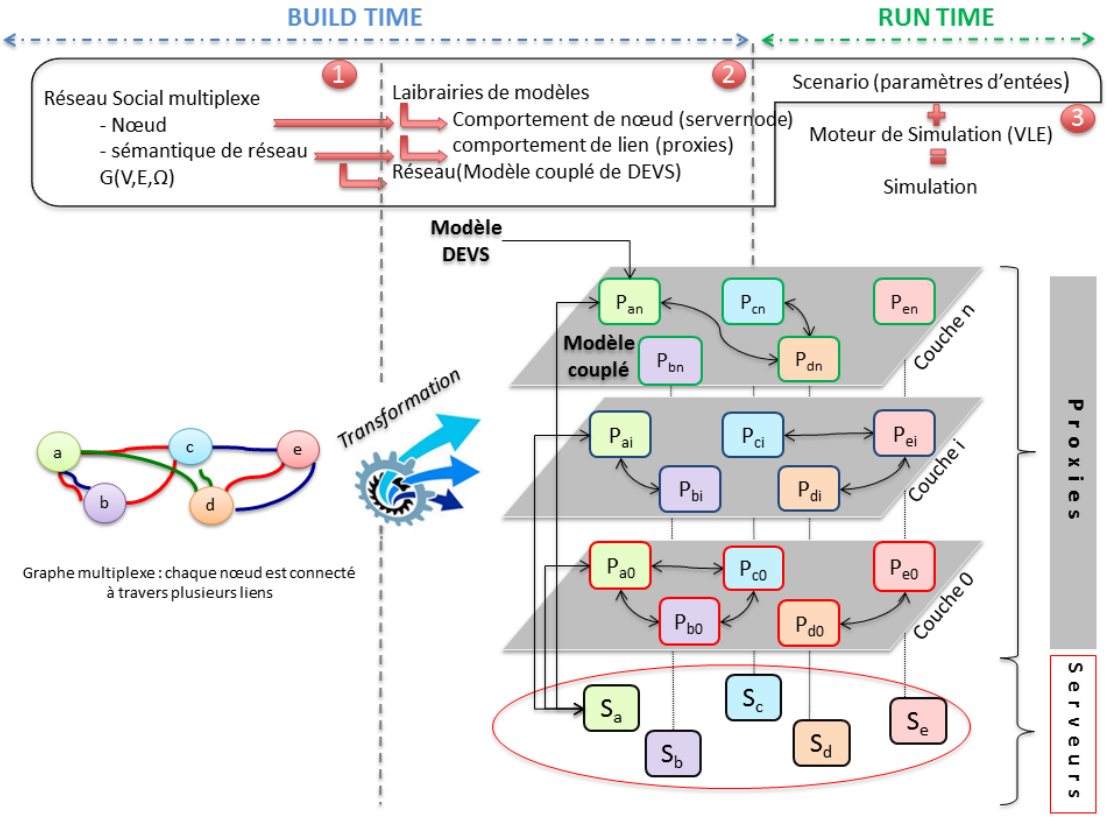


Figure 33. Transformation d'un graphe statique en un réseau DEVS par le modèle GraphLoader.

4> Traitement et Analyse des résultats de simulation: Post Simulation

Le troisième module de cette maquette permet de visualiser et d'analyser les données de simulation. Le rôle de l'analyse dans le cycle de modélisation et de simulation est très important. La phase de l'analyse permet d'interpréter les observations et les résultats de simulation ce qui permet notamment de remettre en cause la modélisation, les modèles (conceptuels ou formels) ou le paramétrage des modèles. Dans cette partie, nous présenterons l'outil R pour la fouille et l'exploitation de données sociales. Nous détaillerons les deux techniques d'analyse proposées par notre maquette permettant la visualisation des données et l'identification des entités influentes dans le phénomène de propagation. Le couplage VLE-R est résumé par la Figure 34.

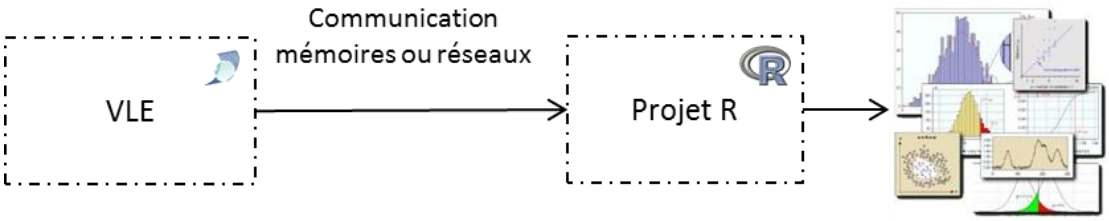


Figure 34. Représentation simplifiée du couplage VLE-R Project.

4.1 Projet R

R est un logiciel de développement scientifique spécialisé dans le calcul et l'analyse statistique proposant des sorties graphiques (Team 2014). Ce projet propose une grande variété de méthodes statistiques, modélisation linéaire et non linéaire, les tests statistiques classiques, des méthodes de classification, etc. (Ihaka and Gentleman 1996). Les sorties de R peuvent être graphiques en utilisant des méthodes d'affichage évoluées. D'un point de vue technique, R est un logiciel libre sous licence libre GPL. R est semblable au langage S et à son environnement créé aux Laboratoires Bell par John Chambers et ses collègues (Becker, Chambers et al. 1988). R peut être considéré comme une autre mise en œuvre de S. L'efficacité de R réside dans les nombreuses fonctions et librairies destinées aux analyses statistiques. Outre le coté analytique, R est doté de plusieurs librairies graphiques permettant la représentation graphique des résultats sous différentes formes voir même en 3D.

Nous avons créé une application web interactive pour définir le plan d'expérience, piloter la simulation et afficher les résultats des analyses R. Cette application (Figure 35) a été développée en utilisant le package « Shiny » développé par l'équipe RStudio (Team 2014).

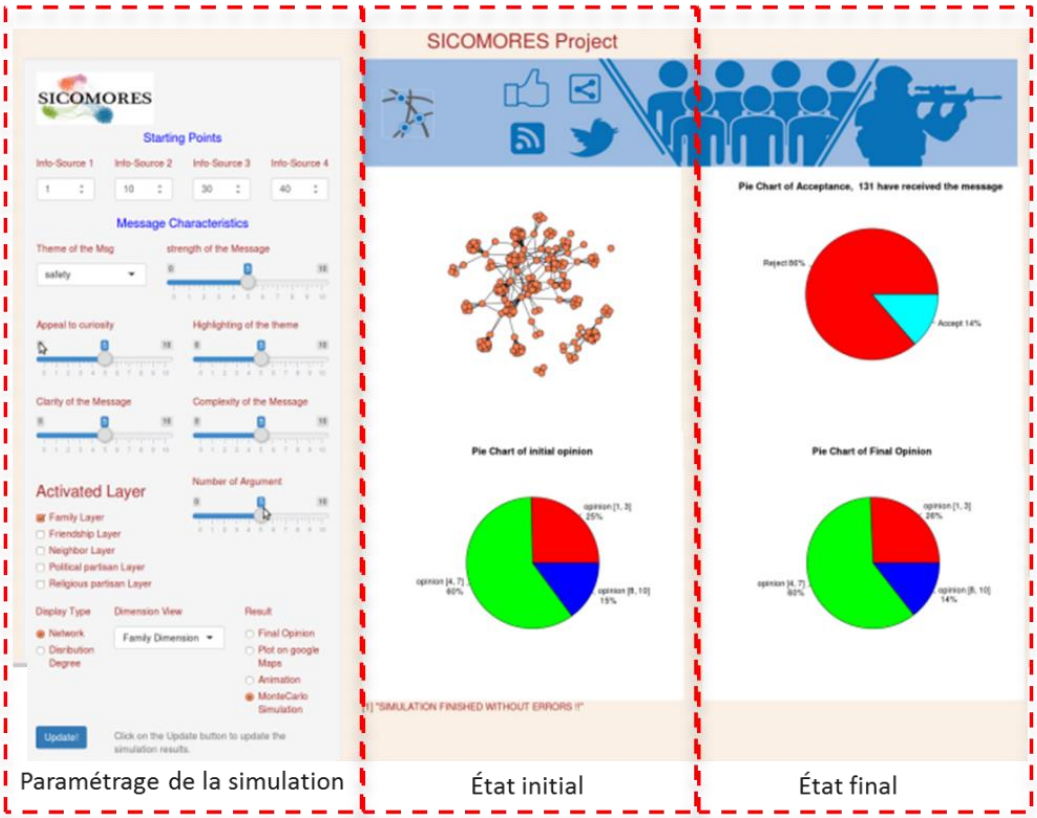


Figure 35. Interface graphique développée sous R.

4.2 Analyse de sensibilité

La modélisation des phénomènes sociaux est entachée d'incertitudes qu'il est intéressant de quantifier. L'analyse de sensibilité et d'incertitude est un moyen d'exploration de modèles dynamiques (Turányi 1990). Cette méthode d'analyse étudie comment des perturbations sur les variables d'entrée du modèle engendrent des perturbations de la variable de réponse (Saltelli 2002). Les chercheurs (Morris 1991, Helton 1993) ont largement contribué au développement de l'analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité peut être utile pour déterminer, par exemple, sur quelles variables d'entrée il est important de concentrer les efforts d'estimation pour diminuer les variations de la sortie. Il est possible de grouper les méthodes d'analyse de sensibilité en trois classes : les méthodes de screening, qui consiste en une analyse qualitative de la sensibilité de la variable de sortie aux variables d'entrée, les méthode d'analyse locale (Turányi 1990), qui évaluent quantitativement l'impact d'une petite variation autour d'une valeur donné des entrées, et enfin les méthodes d'analyse de sensibilité globale, qui s'intéressent à la variation de la sortie du modèle dans l'intégralité de son domaine de variation. L'analyse de sensibilité peut être utilisée pour valider une méthode ou un code de calcul.

- Méthode de Morris

La méthode de Morris (Morris 1991) fait partie de la classe de méthodes dites « screening » en analyse de sensibilité. Les méthodes

screening se différencient par leur faible coût en temps de calcul et sont principalement utilisées pour les gros modèles (modèles coûteux en temps de calculs, modèles avec un nombre important de facteurs). Ces méthodes sont basées généralement sur l'approche OAT (One factor At Time) et fournissent une première information qualitative et partielle sur l'importance des facteurs. Le principe de l'approche OAT consiste à faire varier un facteur à la fois.

- Méthode basée sur ANOVA

Classiquement, l'ANOVA (Analyse Of Variance) permet de modéliser une relation linéaire entre des facteurs qualitatifs ou les facteurs quantitatifs discrets et une variable réponse quantitative dans le but d'identifier les effets des différents facteurs. Des méthodes comme Sobol' (Sobol 2001) et FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) (Cukier, Levine et al. 1978) utilisent une décomposition de la variance de la variable de sortie suivant l'influence des paramètres d'entrée. La méthode de Sobol' utilise des variances et espérances conditionnelles alors que la méthode Extended-FAST utilise des outils mathématiques plus complexes comme les transformées de Fourier permettant de transformer l'intégrale multidimensionnelle servant à calculer la variance de la variable de sortie en une intégrale unidimensionnelle. Ces méthodes basées sur la décomposition de la variance permettent de calculer les effets d'influence et d'interaction de tous les paramètres d'entrée sur la réponse. Ainsi une classification des facteurs sensibles est obtenue en se basant sur les différents effets.

Ces méthodes (Morris, Sobol et FAST) ont une implémentation sous R et elles sont intégrées dans le package « sensitivity ». Ce package met en œuvre des méthodes d'analyse de sensibilité globale (coefficients linéaires de régression, méthode de Morris, mesures de sensibilité globale sur la base des produits dérivés, les indices de sensibilité sur la base de la variance ; indices de Sobol etc.) (Pujol, Iooss et al. 2016). Les fonctions de ce package génèrent la conception d'expériences (en fonction de la méthode d'analyse) et calculent les indices de sensibilité sur la base des entrées et sorties du modèle. Les sorties texte et graphiques affichent les résultats de l'analyse.

- Analyse statistique des sorties : Test ANOVA 1 facteur

L'analyse de variance à un facteur est un test statistique qui va permettre de comparer les moyennes de plusieurs échantillons et de se prononcer sur une différence ou une similarité entre ces moyennes. L'analyse de la variance permet d'étudier le comportement d'une variable qualitative à expliquer en fonction d'une ou de plusieurs variables nominales catégorielles. Le test ANOVA s'effectue sous R à l'aide des commandes aov() et anova(). Un exemple d'un tableau ANOVA sous R est présenté dans Figure 36.

```
> anova(aov(poids~facsport))
Analysis of Variance Table

Response: poids
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
facsport   3  43.25   14.42  0.2194  0.881
Residuals 12 788.50   65.71
>
```

Figure 36. Exemple d'un tableau ANOVA sous R

4.3 Analyse Exploratoire des Données

L'analyse exploratoire des données est une approche de l'analyse des ensembles de données pour résumer leurs principales caractéristiques, souvent avec des méthodes visuelles. Un modèle statistique peut être utilisé ou non, mais surtout l'objectif est de voir ce que les données peuvent nous dire au-delà de la modélisation. L'analyse exploratoire de données a été promue par John Tukey (Tukey 1977) pour encourager les statisticiens à explorer les données, et éventuellement formuler des hypothèses qui pourraient conduire à la collecte et des scénarios basés sur des nouvelles données. Au travers de l'analyse exploratoire des données, nous cherchons essentiellement à résumer la distribution de chaque variable (approche uni-variée) ainsi que les relations entre les variables (approche bi-variée essentiellement), dont les caractéristiques pourraient suggérer un recodage ou une transformation des mesures (Tukey 1977). Plutôt que de modéliser directement les données, nous nous attacherons donc dans un premier temps à les décrire à l'aide de résumés numériques et graphiques. L'idée de décrire dans un premier temps les données à l'aide de résumés numériques et graphiques permet de caractériser la forme d'une distribution et d'identifier les éventuelles valeurs influentes. L'analyse exploratoire des données utilise une variété de techniques (principalement graphique) pour :

- Maximiser la compréhension d'un ensemble de données;
- Extraire des variables importantes;
- Détecter les données aberrantes et les anomalies;
- Déterminer les paramètres optimaux des facteurs ;
- Détecter des erreurs ;
- Vérifier les hypothèses ;
- Sélectionner des modèles appropriés, et
- Déterminer des relations entre les variables explicatives.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de développement de l'architecture et de la maquette de modélisation et simulation des phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux multiplexes qui intègre l'ensemble des travaux présentés dans le chapitre 3. La maquette permet dans un premier temps de générer une société d'agents caractérisés

par un ensemble d'attributs et de variables en fonction des caractéristiques démographiques et socio-culturelles d'une zone désignée. Ensuite, au sein de la plateforme VLE nous avons développé une architecture permettant de transformer dynamiquement un réseau d'acteurs en des instances de modèles de réseaux DEVS. Nous avons aussi proposé des modèles auxiliaires pour initier la simulation de la propagation d'un message au sein du réseau. Enfin, le module de la visualisation et l'exploitation des résultats de simulation a été développé avec R afin d'étudier et traiter les données de sortie de la phase de simulation. Dans cette dernière partie, nous avons également proposé une interface graphique pour simplifier la configuration et le pilotage de la simulation.

Chapitre 5. Applications

Résumé :

Dans ce chapitre, nous détaillerons trois différentes applications (défense, civile et industrielle). La première application issue du projet SICOMORES consiste à simuler et à étudier l'impact de la propagation des opérations et actions militaires d'influence sur une population durant la phase de stabilisation. Ensuite, nous utiliserons notre architecture et maquette de simulation dans le domaine de la gestion de crise. Dans cette application, nous simulerons le réseau de communication dans la chaine de commandement lors d'un plan d'urgence nucléaire espagnole. Enfin, nous discuterons les perspectives d'application de la simulation dans le domaine de la gestion des organisations au sein d'une société structurée.

Sommaire

Chapitre 5. Applications....87
I. Contexte militaire : Opérations de stabilisation....89
1> Projet SICOMORES....90
2> Conceptualisation de la Persuasion....91
2.1 Les effets de la source du message....92
2.2 L'impact des caractéristiques du message....93
2.3 Impact des caractéristiques du récepteur....93
2.4 L'effet du medium de diffusion....95
3> Description et formalisation des opérations militaires d'influence....96
3.1 OMI/PsyOps....96
3.1.1 Modèle DEVS d'une OMI/PSYOPS....96
3.2 Key Leader Engagement....103
3.2.1 Concepts généraux....103
3.2.2 Modèle de KLE de bon voisinage....104
3.3 Co-opération Civilo-Militaire....105
3.3.1 Concepts....105
3.3.2 Théories et Modèles conceptuels de besoins pour la modélisation d'une CIMIC 106
4> Un cas d'étude : Intervention dans la vie civile d'une population virtuelle.....109
4.1 Reconstitution d'un scénario militaire....109
4.2 Etude de terrain : Génération d'une population sur une zone désignée....110
4.2.1 Elaboration des actions d'influence....114
4.3 Résultats Macroscopiques....118
4.3.1 Plan d'expériences du modèle PSYOP....118

4.3.2 Résultats de la simulation et discussion 119
4.3.3 Conclusion 125
II. Management des organisations 126
1> Etude de la communication dans les plans d'urgence lors d'un accident nucléaire. 126
1.1 Introduction 126
1.2 Définition d'un Plan d'Urgence Nucléaire 127
1.3 Modélisation et Simulation d'un Plan d'Urgence Nucléaire 130
1.4 Conclusion 134
2> Etude de la propagation d'information au sein des organisations par la simulation 135
2.1 Introduction 135
2.2 Propagation de l'information au sein des organisations 136
2.3 Analyse des réseaux au sein des organisations 137
2.4 Simulation de la propagation d'information formelle et informelle au sein d'une organisation 138
2.5 Conclusion 140

I. Contexte militaire : Opérations de stabilisation

Dans le contexte d'un conflit ou d'une situation de retour à la paix, la manœuvre globale est un processus itératif visant à obtenir un effet désiré sur l'opposant ou l'environnement par l'implémentation optimisée de capacités militaires et non-militaires à tous les niveaux des forces et ressources impliquées (GROUP 2014). Ce processus qui repose sur une évaluation permanente des effets à obtenir, vise à atteindre directement ou indirectement les centres de gravité et les points de vulnérabilité. Les actions à déployer dans le contexte de la manœuvre globale se divisent en actions de combat et en actions de type **APEO (Actions sur les Perceptions de l'Environnement Opérationnel).** Les actions de combat étant assez limitées dans le contexte d'une opération de stabilisation, la priorité est ainsi accordée aux actions APEO. Plus précisément, la fonction APEO est une fonction de conseil, de coordination et de planification des effets à obtenir sur la volonté, la compréhension et les capacités des audiences-cibles par la réalisation d'actions sur les perceptions. Les APEO visent ainsi à coordonner les actions de diverses fonctions dites dédiées et d'autres fonctions seulement contributrices. Une APEO vise, soit un individu, soit un ensemble de personnes : groupes possédant des caractéristiques sociales ou géographiques communes ou réseaux où circulent les idées et les opinions. Ces info-cibles, ou audiences-cibles, sont identifiées et choisies à travers l'analyse de l'environnement humain des opérations et l'environnement informationnel. Le terme **d'INFO OPS (Informations Psychologiques)** désigne l'ensemble du processus d'analyse, de planification, de mise en œuvre et d'évaluation des effets et des actions s'inscrivant dans la Stratégie Militaire d'Influence (SMI) qui est l'ensemble des effets à obtenir par les forces dans l'environnement informationnel.

Dans le contexte d'une opération de stabilisation d'un conflit, la population est l'enjeu et la cible majeure de ce type d'actions, relevant de la manœuvre informationnelle, les PsyOps (Psychological Operations), les CIMIC (CIvilo-Military Cooperation) et le KLE (Key Leader Engagement). Pour éviter toute confusion avec la notion d'effet, nous nommerons « impacts » d'une action APEO les conséquences de cette action en termes d'attitudes, de comportements, de sentiments. Dans ce contexte, la nouvelle doctrine de l'armée française insiste sur l'importance des actions de communication qui peuvent altérer les perceptions, les attitudes et les comportements au sein de la population. Le succès d'une opération ne passe plus seulement par l'occupation d'un territoire, mais par la capacité à «gagner les cœurs et les esprits» de la population et de ses éléments favorables aux insurgés.

Cependant, la population n'est pas une entité homogène et facile à influencer. Elle peut être indifférente, adversaire ou alliée, parfois alternativement, divisée selon des clivages ethniques, religieux ou politiques

qui trouvent leurs racines dans l'Histoire. L'adhésion de la population ne se gagne pas seulement par des qualités de cœur et d'humanité pures, mais également par l'intelligence psychologique et une compréhension fine des rapports qui existent au sein des différents groupes indigènes.

1> Projet SICOMORES

Dans les logiciels de simulation, en particulier dans les simulations de type « constructive », les modèles de population utilisés se contentent généralement de considérer la population comme un obstacle au déplacement des forces sur le terrain. Ils couvrent principalement la manœuvre de la force et n'inclut pas les éléments de simulation nécessaires pour représenter la manœuvre informationnelle. Il existe néanmoins quelques projets basés sur la technologie multi-agent simulant des phénomènes sociaux dans des cadres de conflit afin de répondre à ces nouveaux besoins. Dans (Svenmarck, Huibregtse et al. 2010), les auteurs présentent un outil (SHOUT) qui vise à modéliser le processus de diffusion d'un message au sein d'une population cible virtuelle (Xland) en prenant en compte les facteurs culturels. La population est représentée comme un conglomérat de communautés plus ou moins reliées entre elles. Les agents dans le réseau ne sont que des communautés et l'outil vise principalement à produire des résultats de propagation, donc il n'y a pas de traitement cognitif individuel de messages. Le Système CAPRICORN (Khimeche, Messouci et al. 2012) est principalement développé pour un scénario en Afghanistan. L'objectif est de simuler les effets des CIMIC et PsyOps au sein de populations civiles lors d'une phase de stabilisation (Bruzzone, Massei et al. 2015). Bien que comprenant un modèle de population avec certains agents complexes possédant des attributs émotionnels détaillés, le modèle simule les opérations principalement militaires et ne fait pas usage des théories de la psychologie sociale ou de la persuasion. L'outil COMPOEX (Waltz 2008) permet aux analystes de systèmes de composer les modèles conceptuels puis opérationnels des situations au niveau régional et au niveau de la nation pour explorer le comportement de leurs systèmes en interaction. D'autres travaux étudient diverses problématiques plus au moins militaires telles que l'entraînement des soldats afin de mieux appréhender la population, la compréhension de la dynamique complexe des interventions internationales ou encore la modélisation de l'économie souterraine dans les zones de conflits (Silverman, Bharathy et al. 2007), (Salerno, Romano et al. 2011), (Geller and Alam 2010), (González-Avella, Cosenza et al. 2007). Les actions PsyOps, CIMIC et KLE dans de telles simulations sont très peu modélisées, ou à un niveau tel qu'il n'est pas possible de rendre compte des impacts de ces opérations. Les simulations se concentrent plus particulièrement sur les opérations de combat plutôt que sur les opérations de ce type du fait de la difficulté à évaluer de façon précise leurs impacts qui se traduisent par des changements d'attitude ou de comportements chez les membres de la population. Les modèles implémentés dans notre outil interviennent sur la

modélisation et la simulation de la dynamique perception-attitude-comportement de la population face aux actions des forces (et en particulier face aux actions PsyOps, CIMIC et KLE). Ces modèles permettent de simuler l'évolution des attitudes vis-à-vis des forces en fonction de leurs actions dans un objectif de formation des militaires spécialisés sur les questions d'influence.

Le projet SICOMORES (Simulation Constructive et Modélisation des effets des Opérations d'influence dans les réseaux Sociaux) a l'intention de créer un modèle de population qui décrit et simule les effets des opérations militaires psychologiques et des actions civilo-militaires (CIMIC : CIvil-MIlitary Co-operation). Ce projet implique trois partenaires ; Laboratoire IMS de l'Université de Bordeaux, Laboratoire LSIS de l'Université de Marseille et la société MASA (partenaire industriel). Le projet est un programme de recherche financé par la DGA (Direction Générale de l'Armement) dans le cadre d'un plan RAPID (Régime d'Appui Pour l'Innovation Duale).

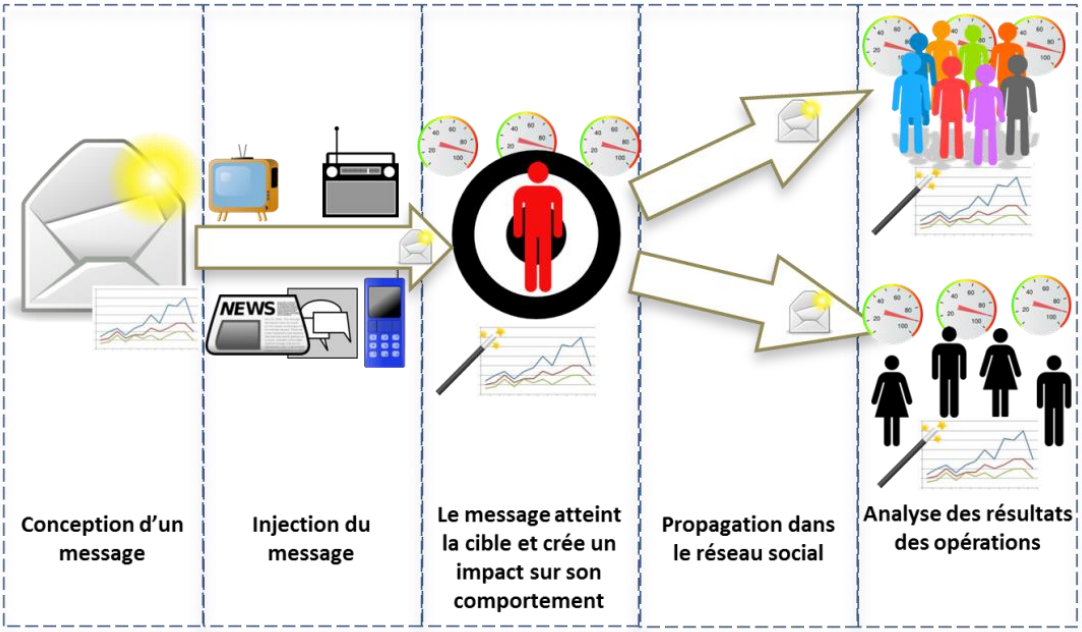


Figure 37. Descriptions du projet SICOMORES.

Le projet SICOMORES a pour objectif de concevoir un démonstrateur d'outil de simulation pour l'entrainement des acteurs participant à la planification des opérations informationnelle. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre cas d'étude sur les opérations militaires d'influence durant la phase de stabilisation. Ce projet vise à mettre en œuvre une séquence d'actions définies dans la Figure 37.

2> Conceptualisation de la Persuasion

Comprendre et maitriser la persuasion nécessite la connaissance de nombreuses caractéristiques différentes concernant la source, le message, le récepteur du message et le moyen par lequel le message est présenté. Dans

cette section nous décrivons chacun de ces éléments et nous résumons les implications de cette recherche pour les opérations d'influence type Opérations Militaire d'Influence/Opérations psychologiques (OMI/PsyOps).

2.1 Les effets de la source du message

Plusieurs travaux dans la littérature ont exploré comment les caractéristiques de la source diffusant un message persuasif affectent la persuasion et le changement d'attitude. Les variables caractérisant une source sont composées de trois dimensions principales; à savoir la crédibilité, l'attractivité et le pouvoir (Pornpitakpan 2004). La crédibilité de la source se compose généralement de deux éléments: l'expertise et la fiabilité (Pornpitakpan 2004). L'expertise se réfère à la mesure dans laquelle un émetteur est capable de faire des affirmations correctes et la fiabilité se réfère à la mesure dans laquelle un public perçoit que les affirmations du communicateur sont celles que l'émetteur considère valide (Adams, Sartori et al. 2007). En général, des sources très crédibles sont plus convaincantes que les sources avec une faible crédibilité (Adams, Sartori et al. 2007). Des travaux de recherches ont montré qu'un message présenté par une source perçue comme ayant une plus grande expertise favorise des attitudes plus positives envers l'émetteur et la publicité dans un contexte commercial (Braunsberger 1996). Ce genre de source favorise également des attitudes très positives à l'égard des évaluations de la performance dans un contexte organisationnel (Albright and Levy 1995), et une attitude plus favorable envers le leadership (Mugny, Tafani et al. 2000). Toutes ces recherches permettent de considérer empiriquement que la crédibilité de la source favorise le changement d'attitude.

L'effet de l'interaction entre la crédibilité de la source et plusieurs variables du message a été étudié dans différents travaux. D'une part certaines recherches ont montré qu'en introduisant une source hautement crédible au début ou au milieu du message est plus convaincant qu'à la fin (Greenberg and Tannenbaum 1961). D'autre part, d'autres recherches ont contredit cette hypothèse (Ward and McGinnies 1974). Des travaux ont également montré une relation entre la crédibilité de la source et la familiarité du message. En théorie, la réception d'un message un peu familier peut rendre le récepteur plus susceptible à changer son attitude car ce type de message offre une forme de confort. Selon (Hendrick and Borden 1970), un message peu familier peut créer une intention forte au niveau du récepteur même si la source a une faible crédibilité. D'autres variables comme les caractéristiques du récepteur, le medium utilisé pour la diffusion, le temps écoulé depuis la génération du message ainsi que la distance physique entre l'émetteur et le récepteur ont été aussi examinées par rapport à la crédibilité de la source (Adams, Sartori et al. 2007).

Les individus influencent les autres d'autant plus quand ils possèdent un pouvoir. Il existe différents types de pouvoirs comme le pouvoir coercitif, le pouvoir de récompense, le pouvoir légitime (Somech and Drach - Zahavy

2002). La relation entre le pouvoir de la source et la persuasion a été étudiée sous différents angle. Des études montrent que la stratégie d'influence utilisée par la source pour convaincre les autres varie selon le pouvoir de la source. Les stratégies d'influence peuvent être de type fort (ex. agression), rationnel (ex. le respect par la négociation et la logique) ou souple (ex. persuasion d'une manière amiable). D'autres études montrent aussi la relation entre l'attractivité de la source et la persuasion notamment (Reingen and Kernan 1993, Reinhard, Messner et al. 2006).

Implication des caractéristiques de la source pour les opérations d'influence : Dans le contexte des opérations d'influence, des facteurs tels que la structure du message persuasif et / ou les moyens par lesquels le message est diffusé peuvent être paramétrés pour répondre aux besoins de la situation. Par exemple, dans les situations où la force de l'argument d'un message est faible, la crédibilité de la source peut améliorer la force de persuasion. La crédibilité de la source est moins cruciale si le message contient déjà un argument fort et cohérent. Quel que soit le but des opérations d'influence (ex. changement de comportement ou d'attitude), la source du message persuasif sera importante à considérer.

2.2 L'impact des caractéristiques du message

Pour qu'un message produise la persuasion et le changement d'attitude au niveau des récepteurs, il doit être placé là où les récepteurs sont susceptibles de le voir, mis à disposition avec une fréquence adéquate et présenté un niveau nécessaire de contraste par rapport à d'autres stimuli disponibles (Booth-Butterfield 2006). En général, le but d'un message persuasif est de convaincre les individus et les pousser à agir ou réagir. La recherche actuelle montre que de nombreuses caractéristiques différentes d'un message persuasif influencent son efficacité. Ceux-ci comprennent la force du message, le contexte, la langue, la fréquence et d'autres caractéristiques.

Les messages sont souvent décrits comme contenant soit des arguments «faibles» ou « forts ». Un message fort a été caractérisé comme contenant des « preuves convaincantes » telles que des statistiques, données factuelles, etc., alors que les arguments faibles ont tendance à contenir des informations telles que des citations, des opinions personnelles ou des exemples (Petty, Cacioppo et al. 1981).

2.3 Impact des caractéristiques du récepteur

Plusieurs études ont exploré les caractéristiques des récepteurs qui sont susceptibles d'influer sur l'efficacité des situations persuasives. Les caractéristiques des récepteurs les plus critiques sont la motivation et la capacité de traiter un message persuasif. D'autres facteurs mentionnés dans la littérature comprennent les croyances, la personnalité, les facteurs culturels et d'autres attributs démographiques.

Depuis les années 1940, plusieurs modèles de changement d'attitude en situation de persuasion ont été proposés. Dans notre cas d'étude, nous nous sommes limités aux modèles duaux de la persuasion. Les deux principaux modèles duaux de la persuasion sont le modèle de probabilité d'élaboration (Petty and Cacioppo 2012) et le modèle du traitement heuristique systématique (Chaiken 1987). Ces modèles se caractérisent principalement par l'existence de deux voies de traitement de l'information : une voie centrale (ou systématique) qui consiste à évaluer soigneusement les arguments présentés dans le message et une voie périphérique (ou heuristique) à l'origine d'un traitement superficiel de l'argumentation. L'emprunt d'une voie plutôt que l'autre est déterminé, notamment, par le degré d'implication des individus à l'égard du contenu de message et les ressources cognitives disponibles. Selon ces auteurs, un individu impliqué dans un thème traitera le message avec plus de motivation que l'individu qui ne se sent pas impliqué dans le thème. L'expertise de la source, par exemple, n'a donc pas d'impact persuasif si les individus se sentent particulièrement impliqués par le thème faisant l'objet de persuasion, l'obtention ou pas du changement d'attitude serait fonction du degré d'implication des participants. De même, un individu capable d'évaluer un message n'aura pas la même perception que celui qui n'a pas les capacités nécessaires à traiter un message. Tous ces modèles cherchent à analyser, pour l'essentiel des recherches, l'impact des variables de la persuasion et leurs différents paramètres sur le traitement cognitif de l'argumentation persuasive (Chaiken and Maheswaran 1994); (Meyer 2000); (Petty, Cacioppo et al. 1981).

- « Elaboration likehood model » (E.L.M.) : le modèle de Probabilité d'Elaboration.

Selon le modèle de Petty et Cacioppo, il existe deux voies de traitement de l'information : la voie centrale et la voie périphérique (Petty and Cacioppo 1996). La voie centrale consiste à évaluer soigneusement les arguments persuasifs. Les participants qui utilisent cette voie sont motivés pour le traitement du message, ils se sentent impliqués et possèdent les capacités nécessaires à évaluer les arguments. La seconde voie, dite périphérique, consiste à évaluer les arguments de manière superficielle. Les participants qui utilisent cette voie ne se sentent pas impliqués (faible intérêt pour le message, distraction ou surcharge d'information, …). Les participants élaborent rapidement une réponse en fonction d'indices simples (expertise, attractivité ou notoriété de la source, …) et privilégient le moindre effort cognitif. Ces participants lisent le message de manière distraite et ne prêtent pas attention aux arguments persuasifs mais plutôt aux éléments périphériques. L'emprunt d'une voie plutôt que l'autre est donc déterminé, notamment, par le degré d'implication des individus à l'égard de l'objet d'attitude ainsi que par leur capacité et leur habileté à s'engager dans cette forme de traitement. Le modèle de Probabilité d'Elaboration est donc une approche à la fois cognitive et motivationnelle de la persuasion. Ce modèle doit beaucoup à la théorie de la réponse cognitive de Greenwald

(Greenwald 1968) selon laquelle l'impact d'une argumentation persuasive est déterminé par les pensées ou réflexions produites faisant suite à la lecture d'un message.

- Modèle du Traitement Heuristique Systématique de l'information (THS)

Le modèle THS a été initialement développé pour rendre compte des changements d'attitude consécutifs à l'exposition à un message persuasif (Meyer 2000). il identifie deux modes de traitement : le traitement heuristique et le traitement systématique. Le mode de traitement heuristique est fondé sur l'application de règles simples (« on peut faire confiance aux avis des experts », « les opinions partagées sont correctes », « les opinions modérées réduisent les désaccords », « les gens sont d'accord avec ceux qu'ils aiment », etc.). La notion d'heuristique correspond ici à l'idée que jugements et décisions sont issus d'un nombre limité d'opérations mentales ou d'heuristiques, peu coûteuses à mettre en œuvre, entendues comme des moyens simplifiés de traiter l'information. En résumé, les participants suffisamment motivés et capables réalisent un traitement soigneux de l'information. Les participants peu motivés et peu capables réalisent un traitement superficiel de l'information et tiennent compte d'heuristiques facilement accessibles en mémoire.

Les attitudes et les valeurs du récepteur peuvent également avoir un impact sur le changement du comportement. Les messages persuasifs qui conduisent à des évaluations fortes (positives ou négatives) seront plus susceptibles d'influencer la façon dont les individus se comportent en réalité. Cette prédiction est formalisée par les deux modèles les plus influents de la relation attitude / comportement, la théorie de l'action raisonnée (Eagly and Chaiken 1993) et plus récemment, la théorie du comportement planifié (Ajzen 1991). La littérature montre également plusieurs facteurs individuels impactant le traitement des messages persuasifs y compris l'identité, les facteurs culturels etc...

2.4 L'effet du medium de diffusion

Un grand nombre d'études montre que l'influence d'un message dépend du medium par lequel le message est communiqué ou diffusé (Guadagno and Cialdini 2002, Murphy, Holleran et al. 2005). Il existe une hypothèse claire dans la littérature qui affirme que les media dans lesquels la source est proche physiquement ou psychologiquement de la cible sont les plus efficaces au niveau de l'influence. Selon (Wathen and Burkell 2002), le contact face-à-face est généralement privilégié pour accroître l'influence, car il est plus crédible que les media moins personnels. Malheureusement, il existe peu de travaux au sujet de ce type de medium qui serait plus convaincant pour une situation de persuasion. La littérature concernant l'influence de différents media est complexe et peu développée. Souvent une

seule étude comprend de nombreuses variables, parfois sans justification théorique.

Selon la doctrine interarmées des opérations militaires d'influence (Centre InterArmées de Concepts 2008), les media typiques utilisés dans les opérations militaire d'influence comprennent l'internet, les réseaux de télécommunications locaux (par exemple l'utilisation de la transmission de messages type SMS), la télévision, la radio, les haut-parleurs, les imprimés (ex. les tracts) et la communication directe « face à face ».

3> Description et formalisation des opérations militaires d'influence

3.1 OMI/PsyOps

Rappelons que Les OMI/PsyOps (Opérations Militaires d'Influence) : *« regroupent l'ensemble des activités dont l'objet est d'obtenir des changements de comportement de la part d'individus, de groupes ou d'organisations militaires ou civiles (audience-cibles) afin de contribuer à la réalisation de l'EFR (Effet Final Recherché). Elles utilisent des moyens qui ne font pas nécessairement appel à l'usage de la force ou à l'exercice de l'autorité et mettent en œuvre des médias spécifiques ou non aux forces armées* » (2008).

Les OMI visent à influencer les perceptions, les représentations et les attitudes des *infos cibles* choisies, afin de les conduire à agir en faveur de la mission ou/et les inciter à ne pas prendre des dispositions en opposition à l'action des forces armées. Il s'agit de façonner le champ de bataille dans le domaine immatériel, que celui-ci soit psychologique, émotionnel ou intellectuel en vue de créer et d'exploiter les opportunités favorables à l'atteinte de l'état final recherché. Une info-cible est un individu ou un groupe d'individus choisis pour être l'objet d'actions d'influence menées par les forces. Un élément primordial est le choix du médium ou vecteur utilisé, qui détermine les info-cibles directes de l'action. Si, dans la réalité, les options vont jusqu'à la dissémination d'objets promotionnels, on retient dans le cadre de ce projet les possibilités suivantes:

- Distribution de tracts,
- Programmes/émissions radio,
- Haut-parleurs,
- TV,
- SMS.

3.1.1 Modèle DEVS d'une OMI/PSYOPS

Dans cette partie nous transformons le modèle conceptuel d'une OMI/PsyOps présenté dans (J-Y. Bergier 2016) en un modèle DEVS. Dans (J-Y.

Bergier 2016), les auteurs décrivent une OMI/PsyOps par de nombreuses caractéristiques et éléments (dont les éléments culturels) afin de pouvoir simuler finement les processus cognitifs du récepteur dans le cadre du modèle de probabilité d'élaboration (Petty and Cacioppo 1986).

Soient les actions de persuasion, représentées comme des instances du schéma Action de Persuasion :

- *Thème ;*
- *Eléments culturels valorisés ;*
- *Eléments culturels contrariés ;*
- *Expertise de la source ([0, 10]) ;*
- *Nombre d'arguments ([1, 10]) ;*
- *Force des arguments ([1, 10]) ;*

Dans le système SICOMORES, une action OMI/PsyOps est donc une instance du schéma PSYOP:

- *• Sorte-de : Action de Persuasion ;*
- *• Info-cibles recherchées ;*
- *• Medium ;*
- *• Indicateur ciblé ;*
- *• Appel à la curiosité/attention ([1, 10]) ;*
- *• Présentateur {(attribut, valeur)} ;*
- *• Mise en évidence du thème du message ([1, 10]) ;*
- *• Lisibilité du support du message (bruit technique) ([1, 10]) ;*
- *• Clarté du contenu (caractère didactique, style) ([1, 10]) ;*
- *• Complexité du contenu (longueur, sophistication du vocabulaire) ([1, 10]) ;*
- *• Type de discours (unilatéral, bilatéral) ;*

- **<u>Modèle DEVS de générateur d'une action OMI/PsyOps</u>**

Le modèle Générateur construit le message/produit PSYOP et initialise les paramètres de propagation. Le graphe DEVS de ce modèle est décrit dans la Figure 38.

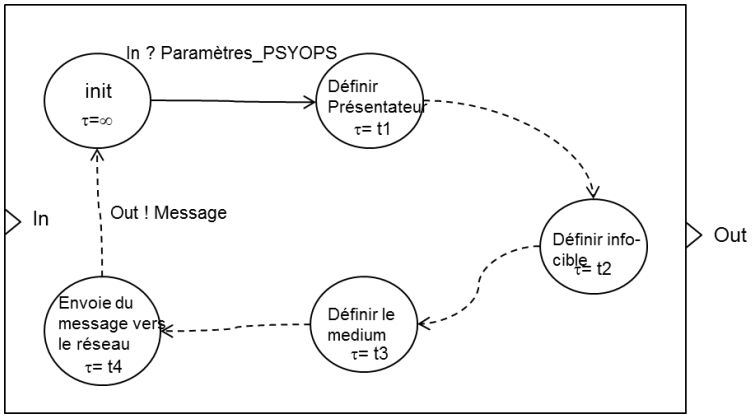


Figure 38. Graphe DEVS de générateur PSYOPS.

Après la phase d'initialisation et suite à la réception d'un événement externe contenant les paramètres du PSYOP le modèle change d'état. Dans la deuxième phase le modèle prépare le profil du présentateur s'il existe. Ensuite, les infos-cibles sont calculées sur la base du présentateur et les caractéristiques du message. La dernière étape consiste à définir les moyens de communication pour l'émission du message (la portée d'une station radio par exemple). En atteignant l'état « envoi de message », ce modèle génère un évènement de structure: Message [émetteur, profil du présentateur, clarté du message, complexité du message Médias, infos-cibles, …].

- **Modèle DEVS d'un individu récepteur pour une action OMI/PsyOp**

Les paramètres du composant PSYOP sont résumés par le Tableau 6.

Tableau 6. Paramètres de modèle d'individu.

Paramètre	Description
DI	Degré d'interpellation
CRTM	Capacité du récepteur à traiter le message
Importance EC	Importance de l'élément central
S(i)	Seuil (i)
Event	Evénement ou Message
τ	La durée de vie d'un état

La Figure 39 représente le modèle DEVS d'une PsyOp au niveau d'un récepteur. Après la réception d'un événement sur le port d'entrée « In », Le récepteur commence à calculer le degré d'interpellation en prenant en compte ses caractéristiques culturelles et les caractéristiques du message. Ce paramètre constitue le premier composant de la motivation. Ce dernier permet à l'agent (le récepteur) d'ignorer le message si ce degré et inférieur à

un seuil. Dans la phase 2, le récepteur détermine sa capacité à traiter le message en se basant sur les caractéristiques du message (clarté, complexité, nombre d'arguments etc.). Ce paramètre permet de choisir par quelle voie l'agent va traiter le message (voie centrale ou périphérique). Ensuite, le paramètre force de persuasion du message est calculé afin de savoir si l'agent va accepter le message ou l'ignorer ; si la force est supérieure à un seuil le récepteur accepte le message et devient émetteur en propageant le message à travers son réseau sinon le récepteur ignore le message ce qui bloque la propagation.

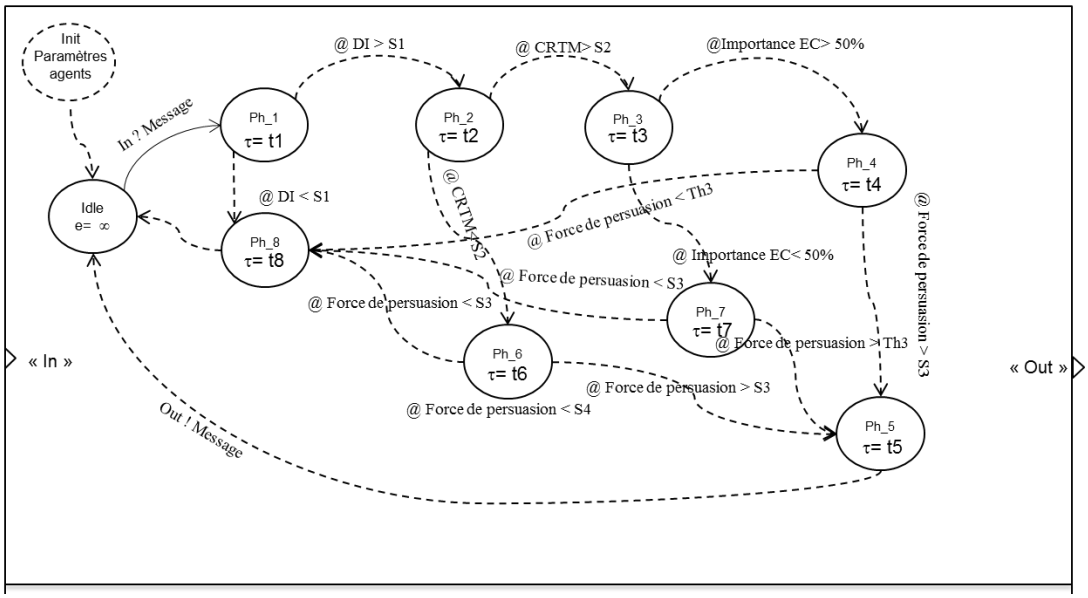


Figure 39. Graphe DEVS d'une action PSYOPS.

Chacun des agents modélise un individu de la population et il est décrit par un ensemble d'attributs et de variables :

- Caractéristiques sociales

Attribut	Type	Description
ID	INT	Identification d'un agent
Genre	STRING	homme ou femme
Classe d'âge	INT [1,2 ou 3]	1 : les jeunes, 2 : les adultes et 3 : les plus âgés
Religion	STRING	La religion est « Religion A » ou « Religion B »
Niveau Social	INT [1,10]	(1 : niveau faible, 10 niveau fort)
Chef de la famille	BOOLEAN	VRAI si l'individu est chef de famille
Statut de leader	BOOLEAN	VRAI si l'individu est leader politique ou religieux

- Caractéristiques culturelles

Système de valeurs :

{(

type d'élément culturel,

élément culturel,

importance [1,10]

)}

- Accessibilité

Attribut	Type	Description
Langage	STRING	La langue principale qui parle l'individu
Alphabétisme	BOOLEAN	Permet de déterminer si l'agent peut lire ou écrire
Atteignable par radio	BOOLEAN	VRAI si l'agent écoute souvent la radio
Atteignable par TV	BOOLEAN	VRAI si l'agent regarde souvent la télé
Atteignable par SMS	BOOLEAN	Vrai si l'agent a un téléphone portable
Position géographique	FLOAT	Coordonnées GPS de l'agent

- Caractéristiques psychologiques
  - Opinion envers la Force ([1, 10])
  - Niveau intellectuel ([1,10])
  - Etat des besoins {(besoin, indice [1,10])}

- **Modèle de la communication persuasive pour les missions PsyOps**

Selon la théorie de McGuire, un message doit, avant tout autre mécanisme, capturer l'attention du récepteur afin d'être persuasif (McGuire 1969). Nous avons intégré cette théorie dans notre maquette ainsi que les paramètres dynamique d'une communication persuasive basés sur le modèle ELM publié dans (J-Y. Bergier 2016). Soit *'p'* une instance de la mission PsyOp, *'a'* représente une instance de la classe Agent, *'n'* le nombre des facteurs culturels d'un agent *'a'*, *'imp'* l'importance d'un facteur culturel et *'q'* le nombre des facteurs culturels qui ont une importance supérieur à 7. Le Tableau 7 détaille la partie dynamique du mécanisme de la communication persuasive (Voir Annexe D).

Après le calcul de ces paramètres pour chaque agent et chaque produit PSYOP, le modèle vérifie des contraintes afin de déterminer si l'agent accepte le message ou l'ignore ainsi que pour savoir par quelle voie l'agent va traiter le message (voie périphérique ou centrale). Les paramètres contraints sont :

- DI > seuil 1 : un agent i accepte le message si son degré d'interpellation pour le produit PsyOp est supérieur à un seuil. Dans le cas contraire, l'agent ignore le message et reste dans son état initial.
- CRTM < seuil 2 : si la capacité du récepteur à traiter le message est inférieur un seuil, l'agent emprunte la voie périphérique seulement pour le traitement cognitif du message. Dans ce cas, l'agent récepteur calcule la force de persuasion du message qui ne se base que sur le nombre d'arguments du message et l'expertise de la source. Dans le deuxième cas (CRTM > seuil2), l'agent analyse d'autres paramètres du message qui rentre dans le calcul de l'importance des éléments centraux.
- PEC > 50% : si le poids ou l'importance des éléments centraux est supérieur à 5, l'agent utilise la voie centrale pour le traitement du message sinon il continue le traitement par la voie périphérique principale.
- Force de la persuasion > seuil 4 : la dernière étape consiste à vérifier la force de persuasion du message selon la voie empruntée par l'agent. l'agent accepte le message et modifie son comportement si la force de persuasion est supérieur à un seuil sinon il rejette le message et ce dernier ne provoque aucun effet sur l'agent récepteur.

Tableau 7. Paramètres dynamique du modèle (Bergier and Faucher 2016)

Paramètre		équation
Motivation	Implication par Caractéristiques culturelles (ICC)	$\mathrm{ICC(a,p)} = (\frac{\sum_{a=1}^{n} \mathrm{imp(a)}}{n} + ({}^{q}/_{n} \times \left(10 - \frac{\sum_{a=1}^{n} \mathrm{imp(a)}}{n}\right))$
	Degré d'Interpellation (DI)	$DI(a,p) = \frac{1}{3} \times (C + M_{th} + ICC(a,p))$
	Niveau de la pertinence personnelle (NPP)	$NPP(a,p) = \frac{1}{N} \times (\sum_{p=1}^{n} imp(a)$
	Volonté pour traiter le message (VTM)	$VTM(a,p) = \frac{1}{2} \times (Niveau_{education(a)} + NPP(a,p))$
	Motivation du récepteur pour traiter le message (MRTM)	$MRTM(a,p) = \frac{1}{2} \times (DI(a,p) + VTM(a,p))$
Capacité	Impact de la clarté de contenu (ICC)	$ICC(a,p) = \frac{\left(C_c(p) + niveau_{education}(a)\right)}{2}$
	Complexité générale du message (CGM)	$CGM(p) = \frac{\left(Co_c(p) + N_a(p) + (T_d == bilatéral)\right)}{3}$
	Capacité du Récepteur à Traiter le Message (CRTM)	$CRTM(a,p) = \frac{\left(B_t + ICC(a,p) + \frac{(1 - CGM(p) + n_e(a))}{2}\right)}{3}$
Degré d'élaboration	Degré d'Elaboration du Traitement de Message (DETM)	$DETM(a,p) = \frac{\left(CRTM(a,p) + MRTM(a,p)\right)}{2}$
	Poids des éléments centraux (PEC)	$PEC(a,p) = DETM(a,p)$
	Poids des éléments périphériques (PEP)	$PEP(a,p) = 1 - PEC(a,p)$
Force de persuasion	La force de persuasion du message pour le traitement périphérique seulement (FPMTPS)	$FPMTPS(a,p) = \frac{N_a(p) + S_e(p)}{2}$
	La force de persuasion des éléments centraux pour le traitement central principal(FPECTCP)	$FPECTCP(a,p) = (Q_a(p) + S_e(p) + CGM(p))$
	La force de persuasion des indices périphériques pour le traitement périphérique Principal (FPIPTPP)	$FPIPTPP(a,p) = Na\ (p)$
	La force de persuasion du message pour le traitement central (FPMTC)	$FPMTC(a,p) = \frac{FPECTCP(a,p) \times PEC(a,p) + FPIPTPP(a,p) \times PEP(a,p)}{2}$
	La force de persuasion du message pour le traitement périphérique principal (FPMTPP)	$FPMTPP(a,p) = \frac{Q_a(p) \times PEC(a,p)}{2} + \frac{\left(N_a(p) + S_e(p)\right) \times \frac{EPE(a,p)}{2}}{2}$

3.2 Key Leader Engagement

La plupart des déploiements et opérations permettant de résoudre les problèmes et les crises actuels nécessitent des commandants et d'autres leaders pour engager les dirigeants locaux et régionaux à l'impact des attitudes de la population civile et obtenir leur soutien pour leurs missions. Dans cette partie, nous décrivons une action qui permet aux chefs militaires d'agir sur les relais d'influence civils et militaires dans la zone d'opérations en vue d'établir des relations durables et approfondies en appui des objectifs de la stratégie militaire d'influence de la Force (Centre interarmées de concepts 2011).

3.2.1 Concepts généraux

Le Key Leader Engagement (KLE) ou engagement des relais d'influence, sont les interactions personnelles entre les leaderships de l'unité et les personnes influentes (détenteurs du pouvoir) au sein d'une communauté civile locale afin d'impacter des attitudes et obtenir un soutien pour leurs missions. Rappelons que le KLE, Key Leader Engagement, (dans la terminologie française Engagement de Relais d'Influence) désigne : « *l'emploi planifié et coordonné des différents échelons de commandement (autorités ou leurs adjoints immédiats) des forces nationales et amies pour influencer les relais d'influence civils et militaires dans la zone d'opérations interarmées en vue d'établir des relations durables et approfondies pour réaliser les objectifs de la stratégie militaire d'influence sur le théâtre* »(2008).

Les KLEs permettent aux chefs militaires et aux décideurs d'interagir avec les principaux dirigeants de la population locale afin d'initier et de construire des relations. En outre, les KLEs permettent aux chefs militaires d'identifier les questions clés et les préoccupations de la population (McKenna and Hampsey 2010). Les relations personnelles peuvent également exiger une compréhension des autres cultures, les perspectives, les capacités, les forces, les faiblesses, les autorités, les sphères d'influence et les motivations. Les KLEs permettent aux dirigeants militaires d'établir des relations au fil du temps avec assez de force et de la profondeur afin qu'ils puissent ensuite veiller à leurs intérêts en temps de crise.

Les KLEs sont conçus pour transmettre des informations et des indicateurs à des auditoires étrangers pour influencer leurs émotions, leurs motivations, leurs raisonnements ainsi que le comportement des gouvernements étrangers, des organisations, des groupes d'individus (Hull 2009). Les commandants peuvent avoir des difficultés pour identifier les principaux dirigeants, développer le contenu approprié, établir un dialogue constructif et déterminer d'autres voies et moyens efficaces, en particulier dans les sociétés où les relations interpersonnelles sont primordiales. Les possibilités d'interaction avec les dirigeants amicaux et neutres peuvent

inclure des entretiens face-à-face, des réunions, des conférences et des événements communautaires.

Devant l'importance accordée à l'exécution de ces entretiens en tête à tête par les opérationnels, souvent rappelée dans la phase de concertation sur la nature des manœuvres à réaliser, SICOMORES se propose d'intégrer cette simulation au même titre que celle des OMI/PSYOPS et des CIMIC, en ne considérant que les KLEs ciblant des leaders civils.

3.2.2 Modèle de KLE de bon voisinage

Afin de modéliser les KLEs, nous avons besoin de modéliser les agents, leurs comportements et les événements. Les agents représentés dans le modèle sont les commandants militaires et les dirigeants clés. Les comportements sont représentés par des équations simples et les événements sont représentés sous forme de structure.

Une action KLE simule une opération ayant un effet désiré APEO bien précis et concerne un seul leader spécifiquement désigné. Chaque rencontre doit donc être configurée spécifiquement par l'utilisateur et se caractérise par un certain nombre de paramètres définissant l'argumentaire mis en œuvre durant l'entretien. Le schéma KLE de persuasion est une adaptation du schéma OMI/PsyOps, retenant les variables de message qui restent pertinentes dans le cadre d'un entretien en face à face (Force des arguments, Info-cibles recherchées…), abandonnant celles qui ne le sont pas et surtout en ajoutant certaines (Fluidité de la discussion, Qualité du langage non-verbal par exemple). Ce schéma, s'il est donc nécessairement construit d'une manière plus ad hoc que le précédent, en reste suffisamment proche pour se prévaloir de justifications solides, sachant que les variables ajoutées relèvent de facteurs identifiés et documentés sur la base de la pratique militaire qui a caractérisé de façon pertinente ce type d'action et son efficacité.

Les paramètres d'une opération KLE sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Description des paramètres d'une opération KLE.

paramètre	Type	Description
Leader ciblé	INT	L'identification de leader ciblé
Objectif du KLE	BOOLEAN	Objectif du KLE (Leader seul; propagation à d'autres)
Fluidité de la discussion	INT [1, 10]	(bruit technique ou sémantique généré par la traduction ou les variations dialectales locales)
Qualité du langage non-	INT [1,10]	Qualité du langage non-verbal (ex. écoute

verbal		active)
Incitation personnelle : intérêt	BOOLEAN	Représente l'incitation personnelle
Incitation personnelle : Vulnérabilité	FLOAT	Coordonnées GPS de l'agent

3.3 Co-opération Civilo-Militaire

Les crises revêtent aujourd'hui un caractère global et leurs origines sont, en général, nombreuses. Leur résolution implique, de plus en plus, une collaboration entre la force militaire, souvent multinationale, et l'environnement civil : la population locale et ses autorités, les organisations internationales et non-gouvernementales. Cette interaction est essentielle et doit être optimisée pour faciliter le bon déroulement des opérations liées à la sortie de crise.

3.3.1 Concepts

La coordination Civilo-Militaire constitue l'interface entre les objectifs de paix et de sécurité d'un côté, et les objectifs d'assistance et de reconstruction de l'autre. L'action civilo-militaire - ACM - (en anglais **CIMIC** pour Civil Military Cooperation) joue un rôle crucial dans le contexte d'une opération de paix complexe qui cherche à avoir un impact holistique sur le système de conflit qu'elle tente de réformer. La coopération civilo-militaire, ou CIMIC, est une « *fonction opérationnelle destinée à améliorer l'intégration des forces armées dans l'environnement civil d'un théâtre d'opération. Elle facilite l'accomplissement des missions militaires, le rétablissement d'une situation sécuritaire normale et la prise en compte de la gestion de la crise par les autorités civiles. Les principaux objectifs CIMIC sont donc l'appui à la Force et à l'environnement civil et humanitaire* » (armées 2012).

L'objectif et le but de la CIMIC est l'interaction entre les acteurs civils et militaires au sein d'un environnement complet pour soutenir le plan du commandant militaire. Cette interaction peut consister par exemple en la coordination, la coopération, le soutien mutuel, la planification conjointe cohérente et l'échange d'informations, couvrant le mandat politique, y compris les forces militaires, la gouvernance et les acteurs civils. Le résultat à long terme de la CIMIC est de créer et maintenir des conditions qui contribueront à la réalisation des objectifs dans le cadre de la Stratégie Militaire d'Influence.

L'opération CIMIC est vouée à mettre en œuvre les actions de la coopération civilo-militaire, qui comme toute manœuvre relevant des APEO ont pour objectif de favoriser l'intégration de la Force dans son

environnement humain, mais qui s'adressent spécifiquement à l'environnement civil. En pratique, les CIMIC étant à la fois une fonction et une capacité, elles couvrent une sphère d'opération très large incluant un dialogue continu avec les organisations non-gouvernementales opérant sur le théâtre. Dans le cadre du projet SICOMORES nous nous concentrons exclusivement sur les actions ciblant les populations civiles locales. Ces actions visent à remédier à la dégradation ou à l'absence d'équipements et de moyens à disposition des civils.

Nous décomposons les opérations en deux grandes catégories : les Actions CIMIC qui recouvrent des opérations ponctuelles dont les effets sont limités dans le temps, et les Projets CIMIC dont les effets sont permanents. Vu que le principe même des CIMIC est de favoriser des perceptions positives au sein de la population en répondant de manière raisonnée et efficace à ses besoins, leur modélisation impose mécaniquement d'intégrer au système un modèle de besoin pertinent et conceptuellement solide caractérisant chacun des agents de la population et qui sera déterminant pour la génération des effets. Dans la section suivante, nous présentons un modèle de besoin adapté à la simulation des opérations militaires d'influence.

3.3.2 Théories et Modèles conceptuels de besoins pour la modélisation d'une action CIMIC

Les agents composant la population de notre maquette doivent être dotés d'un attribut mesurant l'état de leurs besoins. Plusieurs travaux issus de divers domaines proposent une classification des besoins humains. Le psychologue Maslow identifie dans ses travaux (Maslow 1943, Maslow, Frager et al. 1970) cinq grandes catégories de besoins fondamentaux, qui fonctionnent de manière hiérarchique (Figure 40). Dans ce modèle, Un besoin ne devient motivant qu'après la satisfaction du besoin d'ordre inférieur, et lorsqu'un besoin a été satisfait, il cesse d'être motivant.

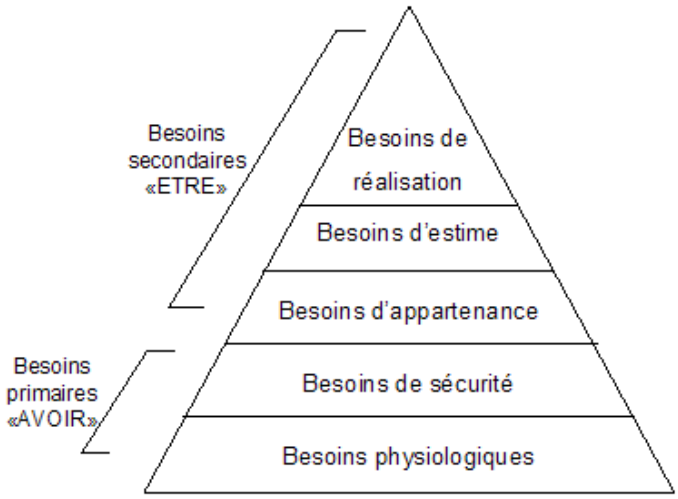


Figure 40. La phyramide des besoins selon Maslow.

La théorie de Maslow a été relativement peu vérifiée dans la réalité, principalement à cause de la structure très hiérarchisée des besoins. En réponse, Alderfer propose une théorie des besoins qui spécifie aussi que c'est la sensation de besoin qui motive l'individu au travail (Alderfer 1969). Alderfer recense trois types de besoins :

- Les besoins d'Existence. Ce sont les besoins primaires, physiques.
- Les besoins de sociabilité (Relatedness). Ce sont les besoins de relations interpersonnelles.
- Les besoins de développement (Growth). Ce sont les besoins de création d'utilisation et d'amélioration des compétences.

Dans le même contexte, le psychologue McClelland propose trois catégories de besoin, sans aucune hiérarchie :

- Le besoin d'affiliation. C'est le besoin de s'associer à d'autres personnes.
- Le besoin d'accomplissement. C'est le besoin de relever des défis, d'atteindre des objectifs.
- Le besoin de puissance. C'est le besoin d'avoir de l'influence sur ses pairs, d'être capable de les motiver vers un objectif précis.

McClelland a proposé en 1961 sa théorie selon laquelle un des trois besoins qu'il a recensés prédomine chez chaque individu et influe sur sa motivation (McClelland 1961).

Suite à une synthèse de plusieurs théories et modèles de motivation présentée dans un rapport technique du projet SICOMORES (Bergier 2016), nous avons intégré les besoins détaillés dans le Tableau 9 comme attributs de chaque individu de la population générée pour le système SICOMORES.

Tableau 9. Besoins retenus pour la simulation d'une CIMIC dans le système SICOMORES.

Besoin	Type
Eau	INT [1, 10]
Nourriture	INT [1, 10]
Logement	INT [1, 10]
Sécurité	INT [1, 10]
Lien social	INT [1, 10]

Régulation sociale, participation et libertés	INT [1, 10]
Facilités d'action (accès à l'énergie, aux infrastructures de transport)	INT [1, 10]

Dans la maquette, une opération CIMIC est caractérisée par les attributs suivants:

- Libellé
- Besoins impactés {(besoin, indice [1, 10])}
- Indicateurs visés
- Bénéficiaires {(zone géogr.), ou (zone géogr., ensemble de critères sociaux)}
- Eléments culturels valorisés
- Eléments culturels contrariés

Comme nous l'avons présenté précédemment, une opération CIMIC peut être une action ou un projet. Une Action CIMIC est caractérisée par :

- Type d'effets : durée

Les Projets CIMIC sont caractérisés ainsi par :

- Type d'effets : pérennes
- Nombre de participants locaux
- Critères sociaux de sélection des participants locaux
- Liste des participants locaux

4> Un cas d'étude : Intervention dans la vie civile d'une population virtuelle.

4.1 Reconstitution d'un scénario militaire

Dans les sections précédentes, nous avons étudié le comportement des modèles des opérations d'influence en transformant les modèles du niveau conceptuel au niveau opérationnel. Ces études nous ont permis de préparer des modèles de simulation pour les opérations militaires d'influence en tenant compte de plusieurs éléments de persuasion identifiés en sciences humaines et sociales.

Cependant, ces travaux nous disent peu quant à la capacité du modèle à reproduire, voire à décrire, des phénomènes réels quantifiés. Nous rappelons que notre approche de modélisation consiste à se référer systématiquement, dans la mesure du possible, à des données précises que nous pouvons trouver dans la littérature. C'est dans ce sens que chaque partie du modèle cognitif de nos agents se fonde sur des théories issues de la psychologie sociale ou des sciences cognitives (voir la section 2 du chapitre 5). En poursuivant cette approche, nous tentons de reproduire des phénomènes sociaux concrets et mesurés en appliquant notre modèle sur un cas d'étude virtuel. Dans ce cas d'étude nous avons mis en place la situation de l'intervention des forces dans la vie civile de la population de la ville désignée. Notre modèle a besoin de trois types de données : (1) une opération d'influence (OMI/PsyOps, CIMIC ou KLE) ou une séquence d'actions caractérisée par plusieurs caractéristiques, exécutées par un ou plusieurs acteurs sociaux (les sources) impactant une population (la cible), (2) des données représentant les attributs et les variables de la population ainsi que la typologie du réseau et (3) les modèles dynamiques donnant un aperçu de l'évolution des attitudes de la population vis-à-vis de cet ou ces acteurs sociaux sur une période.

Dans cette section, nous appliquons notre modèle au contexte des opérations militaires de stabilisation. Notre cas d'étude porte sur une intervention de forces au cours d'une phase de retour à la paix auprès de la population civile d'une ville. Les données relatives à ce cas d'étude concernant les caractéristiques démographiques et socio-culturelles de la population concernée sont basées sur des données empiriques d'une zone désignée issues de la littérature et les données concernant les actions des forces de stabilisation sont reconstituées à partir de la doctrine interarmées et des études de la littérature. Nous présentons dans un premier temps la zone dans laquelle vont s'appliquer ces opérations ainsi que les données démographiques et socio-culturelles de la population civile occupant la zone. Par la suite, nous décrirons l'élaboration des exemples d'actions d'influence et leur implémentation au sein du système SICOMORES. Enfin, nous détaillerons le processus d'interprétation et d'analyse des résultats au niveau

macroscopique (agrégés au niveau de la population) et microscopique (au niveau des individus) de la simulation.

4.2 Etude de terrain : Génération d'une population sur une zone désignée

La première étape dans la simulation des phénomènes de propagation d'un message et l'étude de son impact dans une zone est la génération de la société concernée. Cette étape consiste à générer une société artificielle qui s'appuie sur les caractéristiques d'une ville existante. Le but du projet SICOMORES est de simuler les actions militaires d'influence. Ces dernières sont définies comme « l'ensemble des activités intentionnelles destinées à obtenir un effet sur les perceptions dans le but de modifier les attitudes et/ou les comportements ». Ces actions n'utilisent pas la force mais plutôt un ensemble de messages. Pour ce faire, la maquette doit recréer une population que l'on pourrait qualifier de « réaliste », c'est à dire qui reprend les structures de la population souhaitée. Dans la suite de ce document nous présentons une brève description de la typologie de la population visée ainsi que les algorithmes de génération de la société d'agents en fonction d'éléments empiriques. A partir des données démographique et socio-culturelles niveau macro (CIA 2016, Unicef 2016), nous avons recréé une population au niveau individus sur la zone désignée (Tableau 10).

Cette partie se base sur les travaux présentés dans (Faucher, Bergier et al. 2015). Selon les auteurs, Une société sub-saharienne peut être modélisée et généralisée par un réseau social multiplexe qui s'appuie sur les couches suivantes :

- Couche familiale
- Couche de voisinage
- Couche d'amis
- Couche religieuse
- Couche politique
- Couche communautariste Ethnique/Religieuse

Les réseaux familiaux définissent un type de lien social qui se décline dans différentes sphères de la vie. Selon une étude publié dans (Pilon and Vignikin 2006), la taille moyenne des ménages est comprise entre 4 et 6 dans 22 pays. Sur ce point, l'algorithme de génération de la dimension familiale dans notre maquette crée des familles constituées en moyenne de 6 individus (voir annexe B). Un autre concept introduit dans la maquette représente le chef de famille qui traduit le rôle des individus au sein de la famille. Selon les pays et les familles, ce concept recouvre des situations, des pratiques et des responsabilités très différentes. Ces chefs de famille ont une influence sur le processus de propagation qui les rend leaders d'opinion jusqu'à un certain point (Faucher, Bergier et al. 2015).

Le lien de voisinage au sein d'une société africaine est très présent et une réalité qu'il ne faut pas exclure. Dans (Granovetter 1973), l'auteur identifie deux types de lien d'amitié ; lien faibles et lien forts. L'algorithme de génération ne crée que les liens forts entre les individus qui jouent un rôle dans l'influence sociale et la propagation d'information. Le lien social d'amitié fait partie des trois relations de sociabilité primaire identifiées par Cooley (Cooley 1956) qui a forgé le concept de groupe primaire (Charles 1909). La génération de ce lien est basée sur l'homophilie : les gens ont tendance à se lier avec des personnes qui leur ressemblent : même âge, même classe sociale, etc.

Nous avons créé deux dimensions qui sont assez semblables dans leur construction ; réseau religieux et politique. La dimension politique représente des groupes d'individus. Chaque groupe contient un leader qui, de par sa position centrale, est lié à tous les autres membres du groupe. L'un des individus a une position particulière dans le groupe puisqu'il en est le leader. Cet individu, choisi parce qu'il a dès de le départ un plus grand nombre de relations, va ensuite être lié à tous les individus du groupe. Cela va permettre lors des KLE de cibler les leaders à informer ou encore de faire passer un message de manière massive par l'intermédiaire du leader. La dimension religieuse présente les individus d'une même confrérie. Ces groupes d'individus partagent une même religion. Chaque groupe va avoir un leader qui est lié à tous les autres membres du groupe. Les leaders des différents groupes sont ensuite liés entre eux afin de créer des passerelles entre les différents groupes. Finalement, la couche est utilisée lorsque la situation du pays devient critique. Cette couche doit rendre compte de la situation critique en créant des nouvelles relations basées soit sur l'ethnie soit sur la religion.

Dans le but de modéliser la population de la ville visée, l'algorithme de génération a été configuré pour générer dans un premier temps les deux groupes majoritaires de la zone, puis la population globale en fonction des paramètres identifiés nécessaires.

- Population de religion « A »

Le module de génération de la population est configuré pour que 85% de la population générée soit de religion « A » et parle une même langue. Ce paramétrage se base sur une étude publié dans (CIA 2016, Unicef 2016).

L'attribut niveau social a été généré d'une manière stochastique: 10% des agents de ce groupe ont un niveau social fort, 40% ont un niveau social moyen, 50% ont un niveau social faible.

Les différents besoins (Eau, Nourriture, Logement, Sécurité, Lien social, Régulation sociale, libertés et Facilités d'action) sont modélisés sur une échelle de 1 (besoin très fort) à 10 (très faible besoin). Pour mieux modéliser ces attributs (les besoins), nous demandons au modélisateur de configurer le niveau minimum et maximum pour chaque besoin. L'opinion concernant la présence militaire sur le terrain est aussi modélisée sur une

échelle de 1 à 10 (de l'opinion très défavorable à l'opinion très favorable). Nous avons défini un niveau plus fin d'affectation de l'opinion aux individus de la population en demandant plusieurs informations à l'utilisateur : l'opinion maximum ainsi que le pourcentage associé. Il est possible de dégager quatre plages. Nous avons défini que 10% de ce groupe avait une opinion maximum de 1, 30% une opinion entre 2 et 3, 40% une opinion entre 4 et 6 et 20% une opinion entre 7 et 10. Enfin, concernant la localisation géographique des individus de ce groupe, les « A » sont présents presque dans tous les quartiers de la zone.

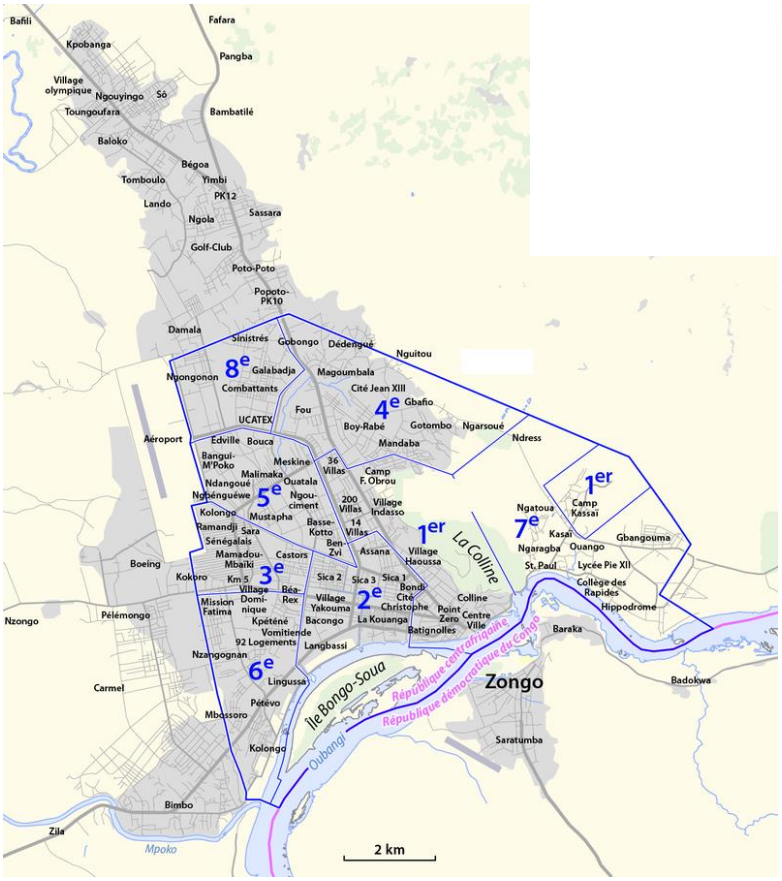


Figure 41. Carte des arrondissements et quartiers de la ville .

- Population de religion « B »

La population de religion « B » représente 15% de la population et la majorité des individus parle une même langue. Les niveaux sociaux dans ce groupe sont définis comme suit : 10% pour le niveau social le plus haut, 40% pour le niveau social moyen, 50% pour le niveau le plus bas. L'opinion sur la présence militaire est définie d'une manière aléatoire entre 1 et 10 pour l'ensemble des individus du groupe. La localisation des « B » est moins étendue que celle des « A ». La ville est possède une majorité de « A ». Les « B » se regroupent principalement dans trois quartiers. L'algorithme de génération réparti les « B » entre ces trois quartiers.

Tableau 10. Paramètres démographiques et socio-culturels de la population générée

Paramètre		Valeur	Description
Démographiques	Langue		La population parle la langue française
	illettrisme	37 %	Pourcentage d'illettrisme dans la population
	Personnes seules	10%	pourcentage de personnes sans famille
Accessibilité aux médias	TV	80%	Pourcentage des familles ayant accès à la télévision.
	Radio	70%	Pourcentage des familles ayant accès à la radio.
	Portable	10%	Pourcentage des familles qui peuvent recevoir des messages SMS.
Caractéristiques culturelles	Valeurs	Aléatoire [1, 10]	Facteurs culturels de la population
	Normes	Aléatoire [1, 10]	Facteurs culturels de la population
	Symboles	Aléatoire [1, 10]	Facteurs culturels de la population
Niveau Social	Niveau social 1	10	Pourcentage de la population avec un niveau social fort
	Niveau social 2	40	Pourcentage de la population avec un niveau social moyen
	Niveau social 3	50	Pourcentage de la population avec un niveau social faible
Religion	« A »	85%	Pourcentage des « A »
	« B »	15%	Pourcentage des « B »
Vulnérabilités	Besoins	Aléatoire [1, 10]	L'attribut reflétant le degré de besoins d'un agent (ex. nourriture, Eau etc.)
Opinion	Opinion1	40%	Pourcentage des agents ayant une opinion $\in$]1,3]
	Opinion2	40%	Pourcentage des agents ayant une opinion $\in$ [3,6]
	Opinion3	20%	Pourcentage des agents ayant une opinion $\in$]6,10]

Plusieurs caractéristiques paramétrables dans le fichier de configuration sont utilisées lors de la génération de la dimension familiale. Dans le cas d'une société africaine en particulier basé sur les éléments de la ville désignée, le pourcentage de personnes seules a été fixé à 10%, la proportion de familles matriarcale à 25% et le pourcentage de famille polygame à 25%. De plus, la proportion d'illettrisme a été fixée à 15%, l'accès des familles à la télévision à 80% et l'accès à la radio à 70% (CIA 2016, Unicef 2016).

Concernant la dimension amicale, deux informations doivent être initialisées : le nombre moyen d'amis par personne ainsi que les pondérations pour chaque caractéristique mesurant l'homophilie entre deux individus. Rappelons que pour mesurer l'homophilie, nous calculons la ressemblance entre deux individus sur les caractéristiques de sexe, d'âge, de niveau social, d'ethnie, de religion et de langue. Chacune de ces caractéristiques peut donc être pondérée afin de pouvoir favoriser une ou plusieurs caractéristiques selon le type de sociabilité souhaitée. Concernant la population de la ville, nous avons défini une moyenne de 10 amis par personne en favorisant les caractéristiques de religion et d'ethnie.

Enfin, deux informations sont demandées à l'utilisateur pour la relation de voisinage : le nombre moyen de voisins et la distance maximum en mètres pour considérer deux familles comme voisines. Moins il y a de monde dans la population modélisée, plus la distance doit être grande. Dans le cas de population supérieur de 10000 individus, nous avons fixé la distance maximum à 500 mètres. Toutes ces proportions ne sont pas indépendantes et ont des règles de cohérence qui rentrent dans le multi appartenance.

Pour l'étude de cas, nous avons généré une société de 1200 agents en fixant les paramètres d'entrée détaillés dans le Tableau 10.

4.2.1 Elaboration des actions d'influence

Les actions qui traduisent les opérations d'influence peuvent être définies aux niveaux opérationnel et tactique par une cellule spécialisée des info-OPS. De manière générale, les actions définies par cette cellule sont exprimées sous forme d'actions envisageables qui se préoccupent principalement des effets recherchés et des acteurs. Au niveau tactique, lorsqu'il s'agit de l'exécution des actions, elles sont d'abord attribuées à une cellule spécialisée qui les déclinent en missions contenant des informations relatives à la mise en œuvre d'une action. En bref, les missions sont des actions spécifiques qui sont formulées afin d'être exécutées par des équipes tactiques déployées sur le terrain. Pour cette raison, et afin de satisfaire le cas d'utilisation considéré dans le cadre du projet, les actions spécifiques seront formulées à travers l'interface mission.

Dans cette section nous décrivons les missions que nous avons implémentées dans nos simulations. Dans le cadre de notre modèle, nous

avons besoin de définir les actions par plusieurs caractéristiques (la date, le medium, la portée etc.). Nous avons créé un scénario fictif basé sur la description des opérations militaires présentées précédemment ainsi que des doctrines interarmées des militaires français et américains. Le but de cette opération est de tester les différentes fonctionnalités du système de notre maquette présentée dans le chapitre 3 et aussi pour étudier l'évolution de scénarios dans cet environnement. Pour l'étude de cas, nous nous sommes limités aux opérations de type PSYOP. Nous pouvons suivre la même méthodologie pour simuler et implémenter les autres opérations à savoir KLE ou CIMIC.

4.2.1.1 Mission OMI/PsyOps

Dans cette mission nous nous focalisons sur les PsyOps tactiques en utilisant des transmissions par radio pour soutenir les responsables militaires pendant un conflit afin d'impacter le comportement de la population civile. Les PsyOps tactiques fournissent des fonctions sur une échelle géographique réduite et limitée (échelle d'une ville ou d'une région) à un responsable militaire pris en charge dans une zone désignée des opérations.

La mission OMI/PsyOps implémentée est caractérisée par : le type d'action, les acteurs clés et rôles, le medium et sa portée. Dans le cas d'une transmission radio, la portée correspond à la distance maximale entre la station de transmission et le récepteur en km. La Figure 42 présente l'emplacement de la station de transmission radio dans la zone désignée ainsi que sa portée. Cette station radio est destinée au grand public. Les débats et les émissions sont diffusés en français. Elle est animée par des intervenants locaux, ses émissions portent sur les faits d'actualité, la musique, la culture et la religion. Son but est d'informer et de divertir la population locale comme toutes radios conventionnelles. Cependant, elle est utilisée aussi comme moyen de transmission des opérations psychologiques selon les objectifs de chaque mission.

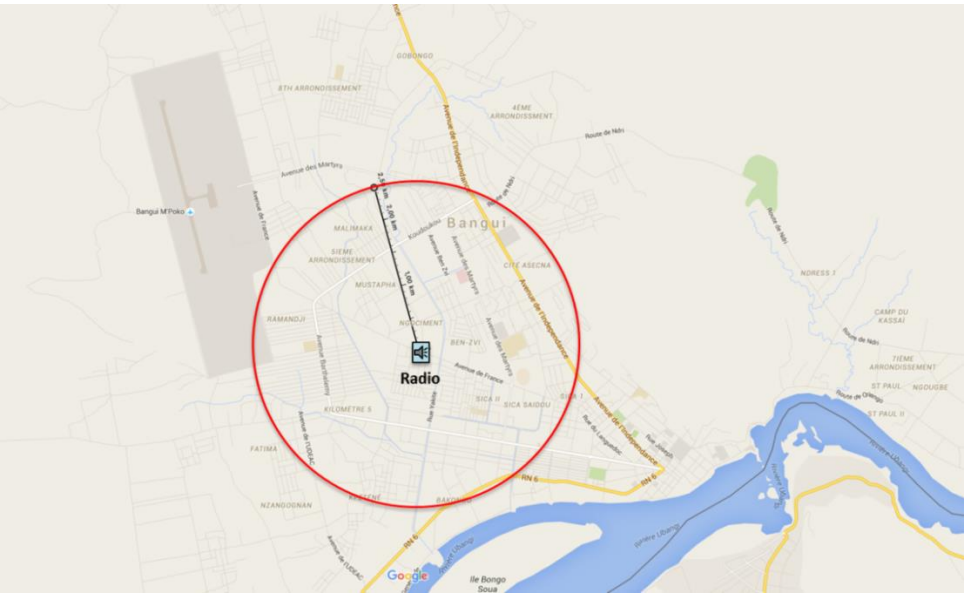


Figure 42. Emplacement de la station Radio dans la zone de conflit.

L'impact de la mission dans notre modèle se traduit par le changement de l'opinion du récepteur en fonction des caractéristiques du message ou de l'information ainsi que des attributs de l'émetteur et de la source. Le changement de l'opinion d'un agent après réception du message se base sur le mécanisme de changement d'opinion détaillé dans (Hegselmann and Krause 2002). Compte tenu de l'opinion du récepteur et après le traitement du message, le récepteur peut changer son opinion d'une borne en s'approchant ou en s'éloignant de celui de l'émetteur. Cet opinion a un certain degré de confiance généralement représenté soit comme symétrique ou asymétrique des variables fixés. Si l'opinion de l'émetteur est au-delà des seuils d'opinion du récepteur, ce dernier ne change pas d'opinion (Figure 43).

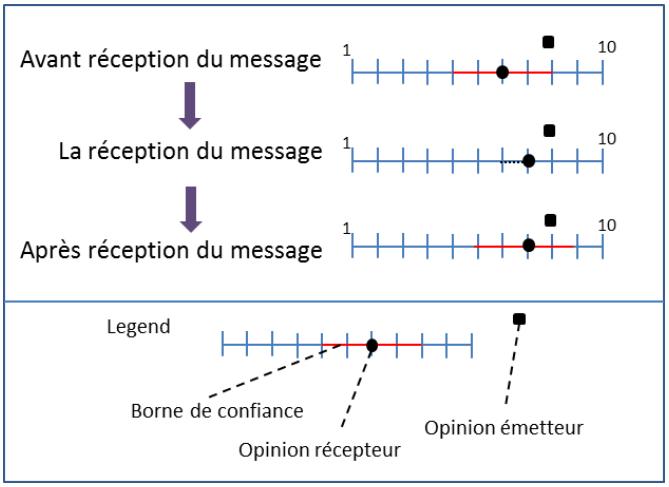


Figure 43. Mécanisme de changement d'opinion.

- Scénario 1 : Injection d'un seul Produit PsyOp

Dans ce scénario l'utilisateur injecte un seul produit PsyOp (qui peut être une information) qui a comme objectif le maintien d'une opinion positive par rapport à la présence des forces dans la zone désignée. La durée représente la date de début et de fin d'un produit PsyOp particulier. Plusieurs types de mission peuvent être envisagés à savoir l'injection d'un seul produit ou d'une série de produits différents. Dans ce scénario, nous nous sommes limités à la diffusion d'un seul produit par le biais d'une transmission radio. Cette mission sera simulée en deux étapes ; la première étape consiste à préparer le scénario par le modèle « générateur ». Ensuite, le modèle « GraphLoader » sélectionne les cibles directes (les agents qui ont accès à la radio qui se situent à l'intérieur de la portée de la station radio) et les connecte au générateur. Enfin, le générateur transmet le message sous forme d'un évènement aux info-cibles directes. La deuxième phase de l'exercice comprend la propagation du produit PsyOp ainsi que son effet sur le reste de la population civile suivant sa typologie. Après réception et traitement du produit PsyOp par les récepteurs cibles-directe, ces derniers peuvent accepter ou ignorer le message. Dans le cas d'une acceptation, les cibles

directe jouent un rôle d'intermédiaire et transmettent le produit vers les autres agents (ego-networks).

Code d'identification: YB236A01
Objectif: Acquérir et maintenir l'acceptation de la présence des forces.
Public ciblé: La population de la zone désignée.
Date: 13 Juin 2016.
Eléments de la persuasion: Les forces aideront le gouvernement local à protéger les citoyens innocents et les femmes des agressions et permettront d'installer le climat de la stabilité et de la sécurité dans la zone.
Moyen de transmission : émission radio.

Figure 44. Eléments de la mission PsyOp du scénario 1.

- Scénario 2 : Injection d'une suite de produits PsyOps

Nous décrivons ici un deuxième exemple d'une mission PsyOp pour supporter les programmes des forces dans la zone désignée. Dans ce scénario la mission PsyOp est gérée sous forme d'une série de produits PsyOp. Chaque produit peut avoir des éléments différents des autres (durée, moyen de transmission etc.). Nous proposons une mission PSYOP composé d'une série de deux produits PsyOp détaillés dans la Figure 45. Nous gardons les mêmes paramètres de la station de transmission radio utilisée dans le scénario 1. Concernant les tracts, ce sont des largages par avion sur des zones spécifiques (niveau arrondissement). Ils servent à informer la population sur un fait particulier. Nous avons défini un impact élevé des tracts car les individus sont impressionnés par la précision de leurs mises en œuvre. La synchronisation des deux produits PsyOp se définit selon un degré de priorité en fonction des objectifs de la mission ainsi que les événements sociaux et économiques dans la période de l'application.

Code d'identification: YB236B02
Objectif: Augmenter l'émotion positive de la population civile envers les forces.
Public ciblé: La population de la zone désignée.
Date: 15 Mai 2016.
Produit 1 : CX123A01
Objectif :
Eléments de la persuasion: Les forces aideront le gouvernement local à maintenir l'environnement calme et sécurisé.
Moyen de transmission : émission radio.
Produit 2 : CX123A02
Objectif : gagner la confiance de la population et maintenir les commandants des forces en tant que source d'information crédible.
Eléments de la persuasion: diffusion d'un ensemble d'images qui montrent que les militaires travaillent et aident le gouvernement local dans des tâches d'organisation et de contrôle.
Moyen de transmission : graphique (diffusion des tracts).

Figure 45. Eléments de la mission PSYOPS du scénario 2.

4.3 Résultats Macroscopiques

4.3.1 Plan d'expériences du modèle PSYOP

Dans cette partie, nous détaillons le plan d'expérience du scénario 1 présenté dans la partie précédente. Dans cette expérience, le modèle intégrant les éléments du scénario 1 est exécuté 50 fois avec les valeurs des paramètres statiques et dynamiques du modèle présentées dans le Tableau 11. L'ensemble des valeurs et des paramètres du modèle proviennent de l'interface mission configurée par l'utilisateur. Cette expérience permet de générer des prévisions à moyen terme de la propagation d'information et son impact sur le comportement de la population.

Tableau 11. Paramètres statiques du modèle et leurs valeurs

Paramètre		Valeur
Message PSYOP	Nombre d'arguments (N_a)	8
	Qualité des arguments (Q_a)	7
	Clarté de contenu (C_c)	7
	Complexité de contenu (Co_c)	4
	Appel à la curiosité/attention (C)	8
	Mise en évidence du thème du message (E_h)	7
	Type de discours (T_d)	bilatéral
Moyen de transmission	Medium (M)	Radio
	Bruit technique (B_t)	3
Source de l'information	Expertise de la source (E_s)	8

L'application des missions PsyOps peut engendrer une évolution du comportement au niveau des agents récepteurs des produits PSYOP en particulier un changement de leur opinion publique vis-à-vis des Forces. Cette évolution est modélisé dans notre système en se basant sur le mécanisme de changement d'opinion détaillé dans (Hegselmann and Krause 2002) (Voir Figure 43). Dans notre système, chaque agent a une opinion initiale borné entre 1 et 10 avec un intervalle de confiance [opinion-2, opinion+2]. Le taux d'évolution dépend de plusieurs paramètres (opinion de l'émetteur, opinion actuel du récepteur, moyen de transmission…). Pour chaque agent récepteur d'un produit PSYOP et après le traitement du produit (message) s'il accepte l'information, son opinion sera modifiée selon deux

mécanismes: Si le récepteur est une info-cible directe, il reçoit le message directement depuis les forces selon le medium d'injection utilisé. Dans le cas d'une émission par radio, les infos-cibles directes sont les agents ayant une accessibilité à la radio et qui se trouvent au moment de la diffusion de produit PsyOp dans le rayon de transmission de la station radio. L'opinion de ces agents sera modifiée selon l'équation suivante :

$$op'(a,p) = \begin{cases} op(a,p) + 0.1 * op(a,p); & si\ \ op(a,p) > 7\ ou\ \ op(a,p) < 3\ ) \\ & Sinon \\ & op(a,p) + 0.3 * op(a,p); \end{cases}$$

Dans le cas d'une propagation des produits PSYOP entre les agents civile de la zone désignée, l'opinion des agents récepteurs sera mise à jour selon le mécanisme suivant:

$$op'(a,p) = \begin{cases} op(a,p) + 0.1 * op(a,p); & si\ (op(a,p) \in [op(b,p),\ op(b,p) + 2] et\ op(a,p) > 7) \\ op(a,p) - 0.1 * op(a,p); & si\ (op(a,p) \in [op(b,p) - 2,\ op(b,p)] et\ op(a,p) < 3) \\ & Sinon \\ op(a,p) \pm 0.3 * op(a,p); & si\ (op(a,p) \in [op(b,p) - 2,\ op(b,p) + 2])\ sinon\ op(a,p) \end{cases}$$

Avec :

Op' : l'opinion de l'agent après réception d'un produit PSYOP

Op : opinion initial de l'agent avant l'opération PSYOP

a : l'agent récepteur d'un produit PSYOP

b : l'agent émetteur d'un produit PSYOP

p : une mission PSYOP

4.3.2 Résultats de la simulation et discussion

Nous présentons ici les résultats de différents scénarios appliqués au même jeu de données (même société d'agents, même zone d'intervention). Les résultats de simulation sont présentés sous forme de graphiques générées sous R. La simulation de la diffusion et de la propagation d'un produit PSYOP nous permet de vérifier le nombre de personnes atteintes selon les caractéristiques du message, le medium et les relations d'interaction entre les individus dans la zone désignée. Nous utilisons les mêmes paramètres du modèle représentés dans le Tableau 11.

Dans un premier temps, Nous vérifions, à travers différentes configurations choisies arbitrairement (activation et désactivation des liens de communication entre les individus), que l'architecture et la typologie du réseau ont un impact observable sur le nombre des personnes atteintes par les produits PSYOP et le taux d'acceptation. Supposons que les forces diffusent des produits PSYOP par une compagne de masse en se basant sur une émission Radio. Certains individus de la population seront intéressés par

cette information et en parleront activement autour d'eux. Ce flux d'information (Produit PSYOP) se propage en deux temps, de la station Radio à l'individu, puis d'un individu à un autre. Les forces aimeraient prévoir quelle proportion de la population sera normalement atteinte par cette information. Dans le but de mesurer et vérifier l'impact de la diffusion et la propagation d'un message sur le comportement des agents d'une zone désignée, nous avons adopté la méthodologie suivante : (1) le module de génération est utilisé pour générer la société d'agents **Rs** en se basant sur des caractéristiques démographiques et socioculturelles de la ville (section 4.2), puis (2) la diffusion et la propagation sur le réseau sont simulées en connectant le modèle à des agents, le réseau **Rs**, le modèle de propagation défini dans la section 3-2.2 et le plan d'expérience.

La Figure 46 représente un exemple de simulation basée sur le paramétrage du modèle de propagation présenté précédemment pour une population de 1200 agents. Conformément au paramétrage, les agents atteints par la radio sont ceux qui se positionnent à une distance inférieure ou égale à 2.5 km et qui ont l'accès à un récepteur radio et les échanges interpersonnels sont uniquement dus aux interactions entre agents intéressés par le produit PSYOP. La simulation dure 6 pas de temps, et atteint 92 % des agents car dans cet exemple nous avons activé tous les liens d'interaction entre les individus. Nous constatons que la proportion des agents atteints à chaque tour décroit légèrement pendant la propagation, puisque l'opération atteint des personnes possédant déjà l'information ou le produit PsyOp. La partie A) de la Figure 46 représente la proportion d'agents qui ont reçu l'information par le média (Radio) et par l'échange entre les individus ; la partie (B) montre le nombre d'agents qui sont intéressés par l'information (produit PSYOP) à chaque tour.

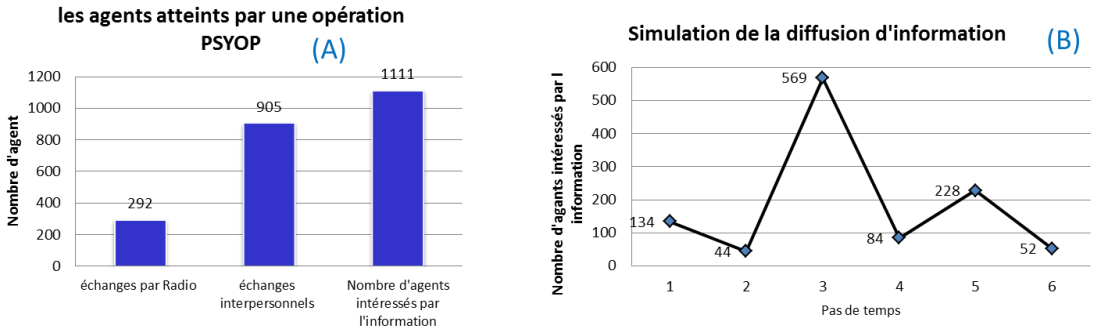


Figure 46. Exemple de simulation de la propagation d'information pour 1200 agents.

Impact de la sociabilité sur le nombre d'individus atteints par le produit PSYOP :

Le deuxième scénario consiste à simuler une mission PsyOp avec différentes configurations au niveau des liens d'interaction entre les agents. Ce test nous permet de vérifier l'impact de la sociabilité sur le nombre d'individus atteint par le produit et aussi sur temps de simulation (nombre de pas de temps).

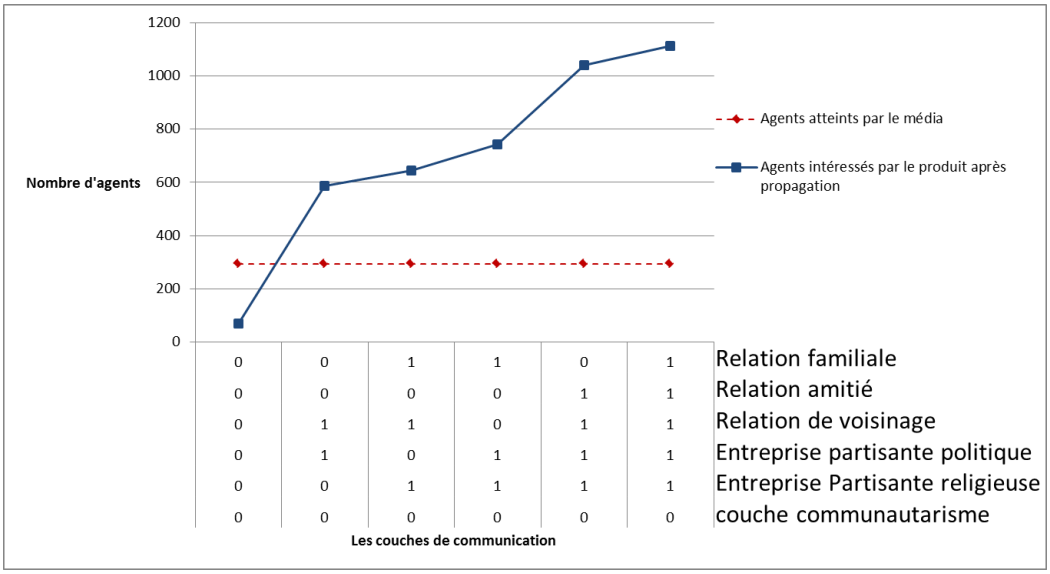


Figure 47. Le nombre d'agents intéressés ou impactés par le message en fonction des liens d'interactions.

La Figure 47 illustre les résultats de l'expérience. Il indique le nombre d'agents intéressés par le message lors de chaque itération. Pour chaque itération, la configuration de l'activation des couches a été modifiée d'une façon aléatoire. Cette figure permet d'observer des répercussions importantes ou des effets négligeables. D'une part, des combinaisons ne permettent pas d'atteindre 50% de la population. D'autre part, des combinaisons ont un impact profond sur le nombre d'agents intéressés par le message. La raison du succès / échec peut dépendre des voisins du réseau directes (ego-network) des info-sources ou le rejet des messages par les récepteurs tout au long de la chaîne de processus de diffusion.

La conclusion de cette expérience est que la topologie ou la structure d'un réseau est très importante dans les phénomènes de diffusion et même si le nœud a une bonne centralité le rendement des actions peuvent être insignifiant.

Impact des info-sources sur le processus de diffusion :

Lors de cette expérience, nous fixons tous les paramètres du modèle, y compris la structure du réseau, les paramètres de l'agent et les caractéristiques du produit PSYOP. Seul les info-sources seront changées. Nous avons supposé que les échange entre les forces et la population civile se fait par un contact direct. Pour cela nous avons désactivé le medium Radio comme moyen de transmission. Avant de commencer la simulation, nous nous connectons le générateur de la plateforme de simulation avec quatre agents différents (Info-sources). À chaque itération, nous définissons les info-sources d'une façon aléatoire (ils peuvent être des leaders de groupe ou des agents civils sans aucune influence sur les autres). A la fin de la simulation, nous stockons le résultat de 50 itérations dans un fichier. Après cela, nous analysons la variation et l'évolution de nombre d'agents atteint

ainsi que leur opinion en fonction des différentes combinaisons de points de départ. Dans ce scénario, la population est constituée de 1200 agents.

La Figure 48 illustre les résultats de l'expérience. Il indique le nombre d'agents intéressés par le message lors de chaque itération. Pour chaque itération, quatre points de départ ont été modifiés d'une façon aléatoire. Cette figure permet d'observer des répercussions importantes ou des effets négligeables. D'une part, plusieurs combinaisons ne déclenchent pas de processus de propagation. D'autre part, des combinaisons ont un impact profond sur la population. A travers cette expérience nous observons que certains points de départ qui ne sont pas identifiés comme des agents clés (comme ceux qui ne sont pas des chefs ou parfois qui ne sont pas bien interconnectés) peuvent être révélés par la simulation comme chemin clé ou critique pour maximiser l'influence de l'information. Un exemple de script sous R pour configurer la simulation est illustré dans (Annexe A).

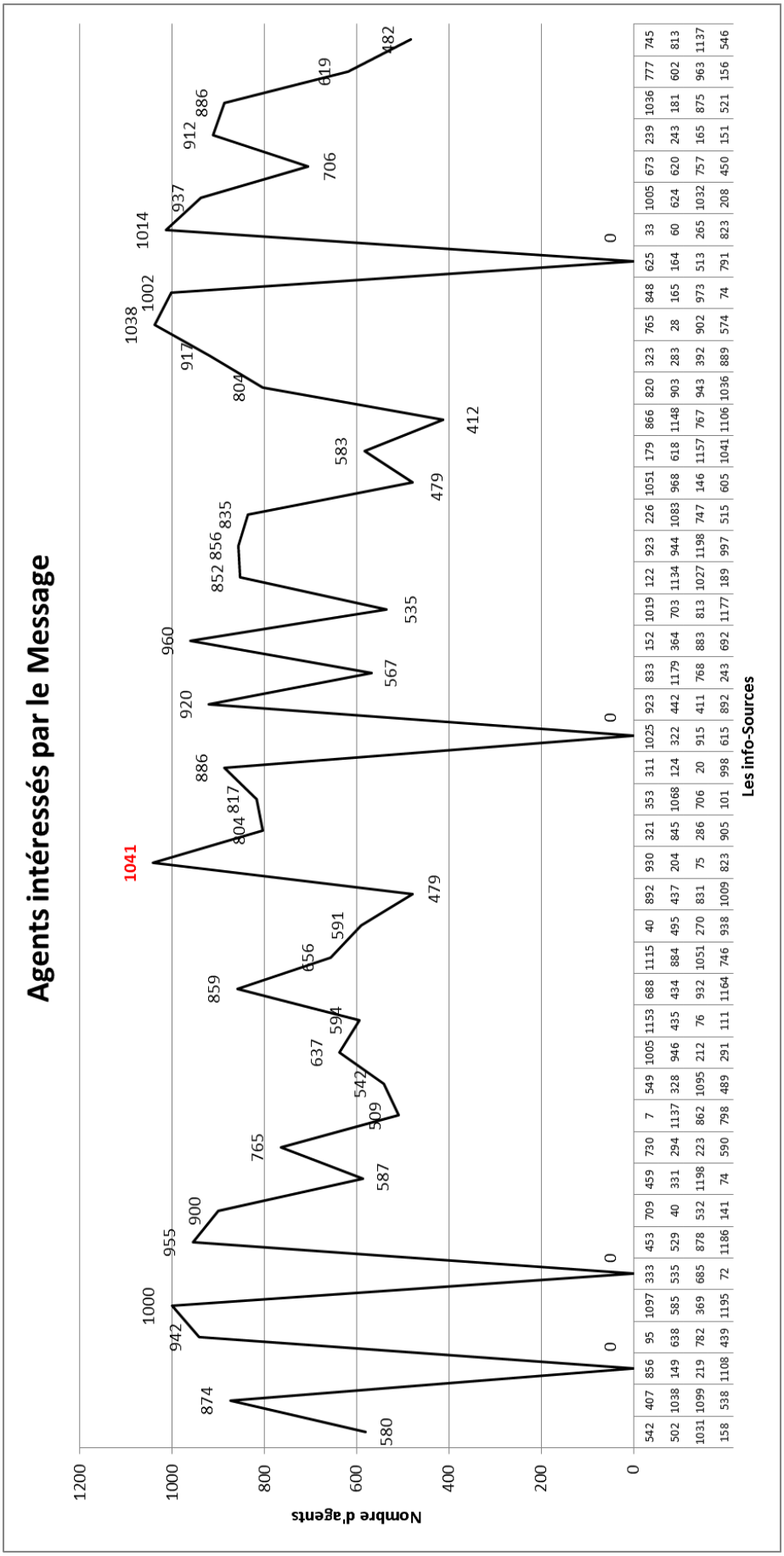


Figure 48. . Le nombre d'agents intéressés en fonction des info-sources.

Evolution de l'opinion des agents durant l'opération :

L'objectif de cette expérience est de suivre l'évolution de l'opinion de la population dans le temps suite à la propagation d'un produit PSYOP dans la zone désignée. L'analyse de cette évolution va permettre à la force de mettre en relation des causes et de leurs conséquences sur l'opinion ou encore l'émission de recommandations pour éviter ou corriger les éventuelles erreurs des militaires. La Figure 49 décrit l'opinion des agents à l'état initial (figure gauche) et après la simulation (figure droite).

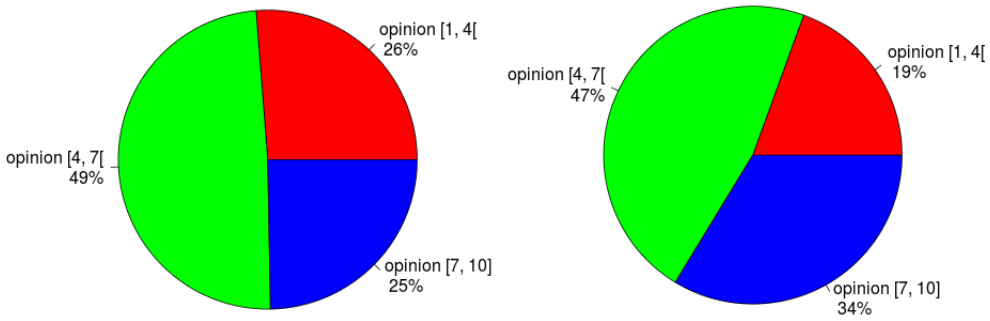


Figure 49. Proportion de l'opinion des agents

La simulation nous permet d'avoir des résultats au niveau des individus. L'analyse de ces résultats permet de classifier les agents selon leur opinion, d'apporter des modifications et des améliorations à la mission (par exemple changer le moyen de transmission, augmenter la fréquence de diffusion de produit, modifier les arguments etc.) ainsi que de déterminer les causes de l'échec de l'opération. Cependant, nous nous intéressons à des indicateurs agrégés au niveau de la population (niveau Macroscopique). Il est également possible de visualiser avec R les résultats sur un système d'information géographique type Google Maps (Figure 50).

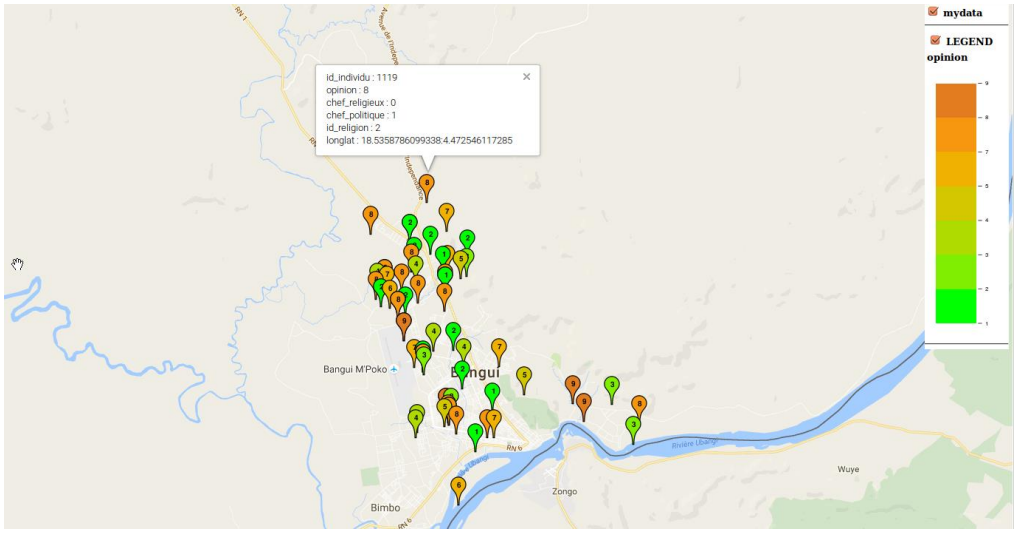


Figure 50. Visualisation des leaders de la population sur une carte géographique.

4.3.3 Conclusion

Dans cette section nous avons simulé et étudié une application dans le domaine militaire en se basant sur l'architecture et les concepts présentés précédemment. L'objectif de cette application est d'étudier l'impact des opérations militaires d'influence sur une population civile. D'abord, nous avons généré une population basée sur les caractéristiques démographiques et socio-culturelles de la zone désignée tenant compte des différents types de relations entre les individus. Ensuite, nous avons préparé une mission PSYOP en se basant sur des documents et des doctrines interarmées. Nous avons intégré tous ces éléments dans la maquette de simulation. Finalement, une analyse des résultats de différents scénarios a été présentée afin d'étudier l'impact des caractéristique de réseau, de produit PSYOP et aussi des facteurs culturels sur le comportement de la population. A ce stade, nous analysons les résultats macroscopiques de simulation à partir d'une agrégation des comportements au niveau micro. La méthode d'agrégation reste discutable car elle a fait l'objet d'hypothèses.

Dans le cadre du projet SICOMORES, nous avons rencontré plusieurs experts miliaires afin de soumettre nos choix de modélisation et confronter nos résultats à leurs expertises. Cependant, les délais du projet ne nous ont pas permis d'effectuer une validation complète de nos modèles. Néanmoins, ces travaux ont déjà été confrontés à des experts scientifiques du domaine dans le cadre de plusieurs conférences avec comité de lecture civiles (Forestier, Bergier et al. 2015, Bouanan, Zacharewicz et al. 2016) et militaires (Bergier and Faucher 2016).

II. Management des organisations

La recherche en science des organisations et de la production s'est focalisée à représenter les structures et leurs processus. Nous proposons de modéliser l'aspect réseau social qui peut être considéré comme une représentation complémentaire des approches précitées. L'objectif final étant d'obtenir une meilleure couverture du système à observer.

Nous proposons d'étudier deux organisations différentes (civile et industrielle). L'application civile rentre dans le cadre d'une collaboration qui a pu émerger d'une période d'invitation au laboratoire IMS du Professeur Gabriel Wainer. La deuxième étude, nous permet de nous rapprocher des thématiques classiques du groupe productique qui concernent la modélisation d'entreprise. Nous avons proposé d'observer comment cette modélisation des réseaux sociaux peut être intégrée ou complémentaire à la modélisation d'entreprise.

1> Etude de la communication dans les plans d'urgence lors d'un accident nucléaire.

1.1 Introduction

Dans cette section nous appliquons l'approche présentée précédemment pour simuler et étudier le réseau de la communication dans la chaine de commandement lors d'un plan d'urgence nucléaire espagnol. Les modèles conceptuels sont issus des travaux de (Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero et al. 2015). Les auteurs ont présenté une étude de cas d'un plan d'urgence nucléaire (PUN) en supposant l'existence d'une chaîne de commandement sans erreur et en considérant que les mesures prévues seront suffisantes pour contrôler et atténuer la situation d'urgence.

Lorsqu'une catastrophe naturelle ou industrielle se produit, les conséquences peuvent être dévastatrices. Il peut y avoir beaucoup de morts et de blessés et, pendant la situation d'urgence, les premiers intervenants ont pour mission de prendre soin de l'évacuation des personnes impliquées. La catastrophe peut également effectuer des pannes de l'infrastructure ou des défaillances dans les systèmes d'énergie. Cependant, lorsque les deux se produisent en même temps, les conséquences sont encore pires. Dans ces situations, la prise de décision sur l'endroit où affecter les ressources devient plus difficile. Les premiers intervenants doivent décider quelles situations ont la priorité et allouer les ressources en conséquence. Après la catastrophe, diverses organisations analysent les conséquences de l'accident. Ces études comprennent normalement une étude sur la façon dont la crise a été gérée en identifiant les points forts et faibles dans la gestion des crises. Cette analyse est utilisée par la suite pour améliorer les futures situations d'urgence. Par exemple, Après l'accident de Fukushima, la centrale nucléaire de TEPCO et

l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) ont souligné la nécessité d'améliorer les dispositifs d'intervention pour renforcer les systèmes de gestion ainsi que la transparence et l'efficacité des mécanismes de communication (Langlois 2013). Dans (Ruiz-Martin, Bouanan et al. 2016), nous avons présenté une nouvelle méthode pour l'étude de ces structures organisationnelles et pour évaluer leur robustesse par rapport aux différents scénarios d'urgence. Les auteurs ont proposé les méthodologies et outils hybrides basés sur : la modélisation à base d'agents, le formalisme DEVS et la théorie des réseaux proposé au chapitre 3 pour développer des modèles de plan d'urgence. Les avantages de cette combinaison de méthodes sont les suivant :

- Elle peut simuler la transmission de l'information dans le réseau d'urgence en tenant compte des différentes propriétés des technologies sous-jacentes et des comportements différents des entités.
- Elle repose sur une méthodologie de modélisation formelle et de simulation. L'utilisation du formalisme DEVS nous permet de séparer le développement du modèle de gestion d'urgence et sa mise en œuvre facilement.
- Elle peut combiner les modèles avec une simulation stochastique sur plusieurs scénarios d'urgence à évaluer afin de générer plusieurs résultats, et nous pouvons utiliser des techniques analytiques avancées (dans notre cas, R et le logiciel Rstudio) afin d'améliorer l'analyse des résultats.

1.2 Définition d'un Plan d'Urgence Nucléaire

Nous avons pu démontrer l'intérêt de notre architecture décrite dans le chapitre 4 sur une nouvelle application, ici une étude de cas basée sur des données réelles d'un Plan d'Urgence Nucléaire (PUN) de l'Espagne. Une description complète de l'étude de cas peut être trouvée dans (Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero et al. 2015). Nous allons expliquer les caractéristiques principales de l'architecture proposée dans cette recherche.

Le PUN suit la hiérarchie de la Figure 51. Plusieurs organismes indépendants sont impliqués dans la gestion de la situation d'urgence, comme le groupe radiologique (en charge du contrôle radiologique de la population), le groupe de santé (en charge de leur bien-être et de leur santé), le groupe de soutien logistique (en charge de fournir un soutien pour la nourriture, l'évacuation et la coordination), etc. Chaque groupe a sa propre structure et parfois ses propres mécanismes et moyens de communication.

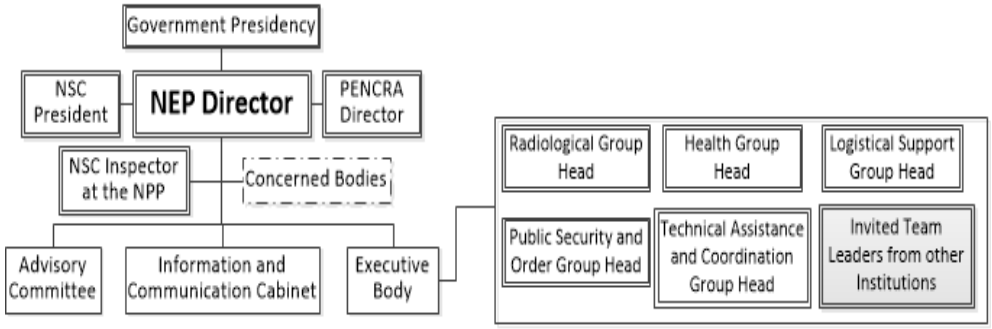


Figure 51. Aperçu de la structure de plan d'urgence nucléaire espagnole (Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero et al. 2015).

Les mécanismes de communication pris en compte pour le PUN comprennent les téléphones portables et fixes, fax, radiotéléphones, satellite, Internet et deux chaînes de radio différentes (Remer & Reman). Parfois, les membres du groupe de santé utilisent les téléavertisseurs. En outre, les canaux de communication militaires peuvent être utilisés sur demande, mais ils ne sont pas disponibles avant que l'infrastructure soit déployée (infrastructure déployée sur demande et selon la gravité de la situation).

Les relations entre les individus dans l'organisation sont caractérisées par la structure organisationnelle et les mécanismes de communication utilisés entre eux. Dans les travaux précédents initiés dans (Ruiz-Martin and Poza 2015), les auteurs ont supposé que tous les liens de communication sont équivalents afin d'avoir un réseau simplifié (graphe simple ou uniplexe). La topologie statique analysait ces réseaux à l'aide de scénarios uniquement. Cette hypothèse ne permet pas d'inclure des propriétés spécifiques en fonction de la catégorie du réseau et différents mécanismes de transmission entre les agents.

Nous proposons de traiter la chaine de communication de ce PUN comme un réseau multiplexe ou multicouche en tenant compte des différentes technologies de communication utilisés par les agents et nous pourrons ainsi mettre en œuvre des mécanismes de transmission différents pour chaque couche. De même, il est important de considérer que la structure de communication dans un plan d'urgence nucléaire est dynamique. Les communications possibles entre les individus changent avec leur emplacement et dans le temps. L'approche décrite au Chapitre 3 nous permet de simuler le réseau dynamique en ajoutant la propriété de l'emplacement des nœuds dans une couche spécifique pour identifier les agents dans un même lieu géographique ou dans une même zone de couverture de certains media lors de l'exécution. Les multicouches et les réseaux à structure dynamique nous permettent donc d'effectuer une étude plus complète par l'analyse en simulation de la chaine de communication de ce PUN.

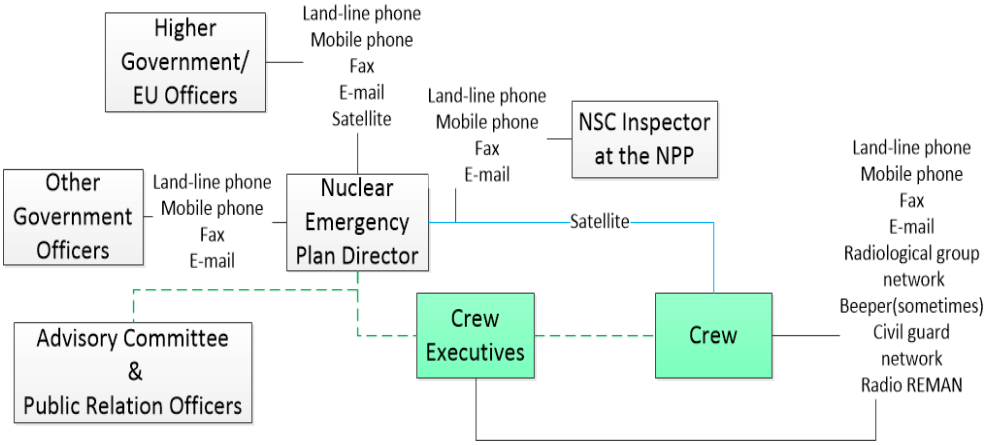


Figure 52. Le niveau supérieur d'abstraction du modèle PUN (Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero et al. 2015).

La Figure 52 décrit à un haut niveau la structure PUN. La représentation de cette structure sous forme d'un réseau se traduit par 7 nœuds et 10 liens d'interactions entre les nœuds. La première phase consiste à transformer la structure en un réseau DEVS ; chaque bloc de la structure est un agent (Modèles DEVS). Plus en détail, un agent DEVS représentant une équipe se traduit en un modèle Serveur et autant de modèles Proxies que les différents liens d'interaction entre l'agent et ses voisins tel que décrit en section 1.3 du chapitre 3.

Les cadres de l'équipe et les personnels peuvent être définis selon la Figure 53. Dans ces modèles, chaque agent exécutif représente une seule personne. Pour une observation détaillée, le groupe radiologique a été décomposé dans un troisième niveau comme l'illustre la Figure 54. Cette décomposition hiérarchique nous a permis de concentrer notre intérêt sur le niveau de détail nécessaire en fonction du besoin. Par exemple, nous nous sommes intéressés à étudier la façon dont le groupe radiologique fonctionne, nous avons donc eu besoin de ce troisième niveau pour décomposer plus en détail les équipes de la Figure 54.

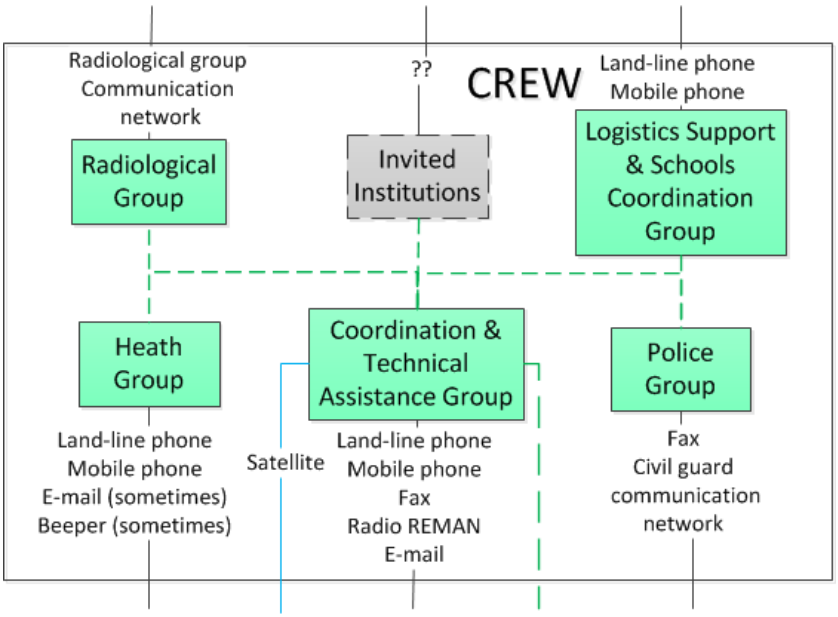


Figure 53. Décomposition de l'équipe CREW (Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero et al. 2015).

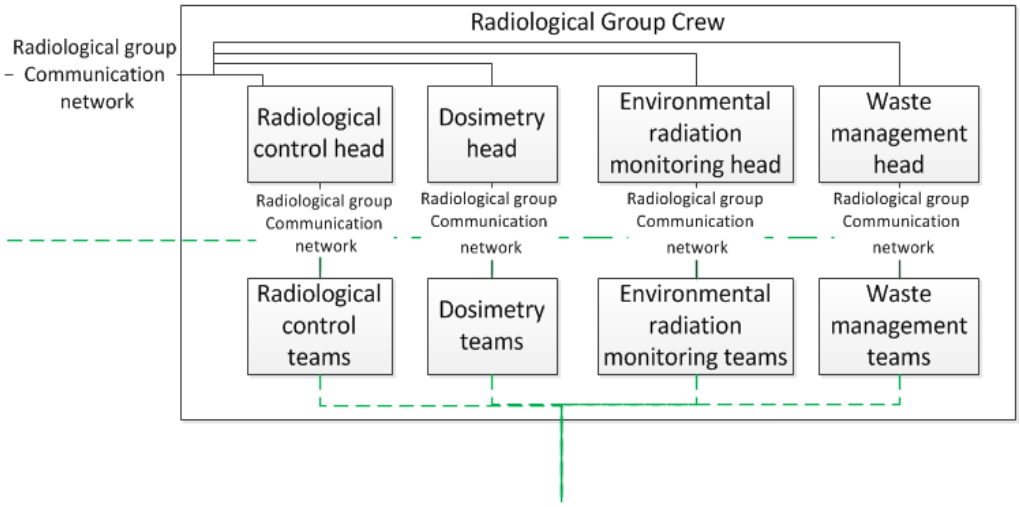


Figure 54. Décomposition de l'équipe radiologique (Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero et al. 2015).

1.3 Modélisation et Simulation d'un Plan d'Urgence Nucléaire

Nous devons d'abord définir les modèles DEVS selon les spécifications décrites dans la section précédente. Pour mettre en œuvre les modèles d'agents, nous considérons les informations échangées entre les agents à travers des messages comme des événements discrets dont les valeurs correspondent au contenu des échanges entre les individus de PUN. La réception de l'information est spécifiée par les messages d'entrée sur les ports du modèle. Le comportement du modèle est dirigé par les fonctions de transition DEVS. L'exécution de toutes les fonctions de transition des modèles de composants définit le comportement autonome de l'agent.

Nous utilisons un certain nombre de modèles DEVS définis dans les chapitres 3 et 4 (Bouanan, Zacharewicz et al. 2016), qui ont été construits en utilisant la classe Réseaux DEVS construite sur les classes de base fournies par VLE. Nous avons donc utilisé les deux types de modèles atomiques DEVS: modèle Serveur et modèle Proxy de cette classe. Les modèles de type proxy représentant la façon dont l'information est transmise dans le réseau d'urgence en tenant compte des différentes propriétés de communication de la couche. Les modèles de type serveur définissent le comportement des agents équipe ou entité et leur réaction quand ils reçoivent de l'information.

La Figure 55 montre un exemple de réseau multicouche avec 3 couches (à savoir, 3 différents types de communication) et 4 nœuds (agents). Les interactions intra-couche (représentées en traits pleins) montrent la relation entre des agents « Higher Government Officer » basée sur les canaux de communication. Les lignes pointillées représentent les interactions inter-couches (agents dans différents réseaux). Les composant P_x, P'_x et P''_x sont des agents proxy et ils contiennent des règles spécifiques pour chaque réseau et pour chaque individu. Les composants sont connectés à un modèle serveur S_x représentant l'état de l'individu et contenant les règles d'évolution

du comportement d'individu. Par exemple, lorsque l'information arrive à P_1 sur la couche « téléphone mobile » :

- Le composant P_1 envoie un événement au serveur S1
- S1 reçoit l'événement et transmet l'information à son réseau, P_1, P'_1 et P''_1.
- Les Composants P_1, P'_1 et P''_1 reçoivent l'événement et en fonction de leur état et de la configuration du réseau, peuvent diffuser l'information à leurs voisins. Dans ce cas, P_1 a déjà l'information et l'envoie à P_2; de même, P'_1 envoie l'événement à P'_2.
- Ensuite, les composants P_2 et P'_2 envoient l'événement à P_3 et P'_3 etc.

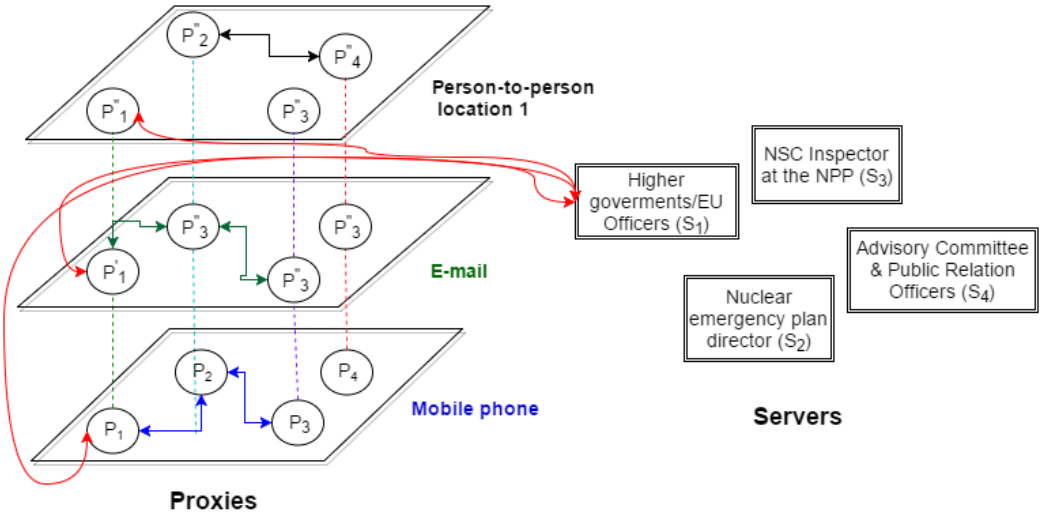


Figure 55. Aperçu d'un modèle DEVS avec 3 couches et 4 nœuds.

Le modèle est construit en prenant en compte les connexions définies dans le réseau. Nous utilisons GraphLoader (un modèle auxiliaire), introduit au chapitre 3 (Bouanan, Zacharewicz et al. 2016), pour relier les modèles de type proxy avec les serveurs selon les relations définies dans le réseau multiplexe. Ce modèle hérite de la classe devs ::exécutive afin d'être en mesure de manipuler le graphe de connexion. Ceci est une classe dynamique DEVS qui inclut la manipulation des graphes lors de l'exécution. Nous utilisons d'autres modèles auxiliaires pour générer les messages et les journaux d'événements qui sont analysées à l'aide de Rstudio. Ensuite, nous discuterons la mise en œuvre d'une étude de cas pour trois modèles différents d'un plan d'urgence nucléaire espagnol, représentant différents niveaux d'abstraction. Chaque modèle de réseau DEVS (Figure 56) est construit comme expliqué ci-dessus en utilisant le Graphloader.

Chaque nœud des graphes illustrés par la Figure 56 représente un agent qui est défini comme un modèle DEVS couplé comme indiqué sur la Figure 55 (un modèle de type serveur et plusieurs modèles d'entrée et sortie

de type proxy selon le nombre de mécanismes de communication). Les liens sur la figure représentent les connexions entre modèles couplés DEVS. La Figure 56a représente le plus haut niveau d'abstraction qui considère tout l'équipe en tant qu'agent unique. Il dispose de 7 nœuds (chaque nœud est un modèle DEVS) et 10 couches de communication. Sur la Figure 56b, on décompose les cadres les membres de l'équipe. Dans ce deuxième niveau, nous avons 17 nœuds et 12 couches de communication. Nous montrons un exemple plus en détail, y compris l'un des membres du groupe (le groupe radiologique). Dans ce cas, nous avons obtenu le réseau représenté sur la Figure 56c avec 24 nœuds et 13 couches de communication.

Nous avons simulé trois scénarios avec le même groupe de personnes, mais selon des configurations différentes des moyens de communication (Figure 56d). Dans chaque scénario, nous avons généré le réseau sur la base des relations définies dans la base de données et aussi selon le modèle de comportement de chaque agent. Dans le scénario 1, nous simulons le processus de transmission d'informations lorsque le message est injecté par le directeur du PUN (NEP Director représenté par le nœud 1) et que le réseau ne prend pas en considération les mécanismes de transmission 11 et 12 (La communication personne à personne n'est pas prise en compte en raison de l'aspect informel et les efforts visant à estimer la position des agents). Dans le scénario 2, nous lançons 50 simulations en connectant le générateur (au temps t=0) au directeur du PUN (nœud 1) et en changeant de façon aléatoire les couches inactives (nous désactivons deux couches au hasard à chaque itération). L'objectif de cette expérience est de montrer l'impact des canaux de communication sur la gestion des plans d'urgence. Dans ce contexte, nous avons simulé le troisième niveau (celui avec la plupart des détails), puis nous avons analysé les résultats pour vérifier les différentes hypothèses. Enfin, dans le scénario 3, nous avons désactivé les couches : 1, 2, 3, 4, 7, 11 et 12 pour observer l'évolution de la communication et aussi pour déterminer les agents qui ne peuvent pas recevoir le message.

Dans le premier scénario (à savoir, toutes les communications officielles définies dans le PUN sont activées à l'exception de la communication personne à personne), tous les agents obtiennent l'information. Dans le scénario 3, nous bloquons les moyens de communications suivant : téléphone fixe, téléphone portable, fax, E-mail et le mécanisme de communication Beeper. Dans ce cas, nous constatons que certaines personnes ne reçoivent pas l'information (représentée en rouge dans la deuxième rangée de la Figure 57). Ces individus diffèrent dans niveaux d'abstraction du modèle. Cependant, le nombre d'individus isolés augmente en fonction du niveau de détail du modèle parce que les individus sont groupés sous le même agent quand le degré d'abstraction du modèle est trop élevé.

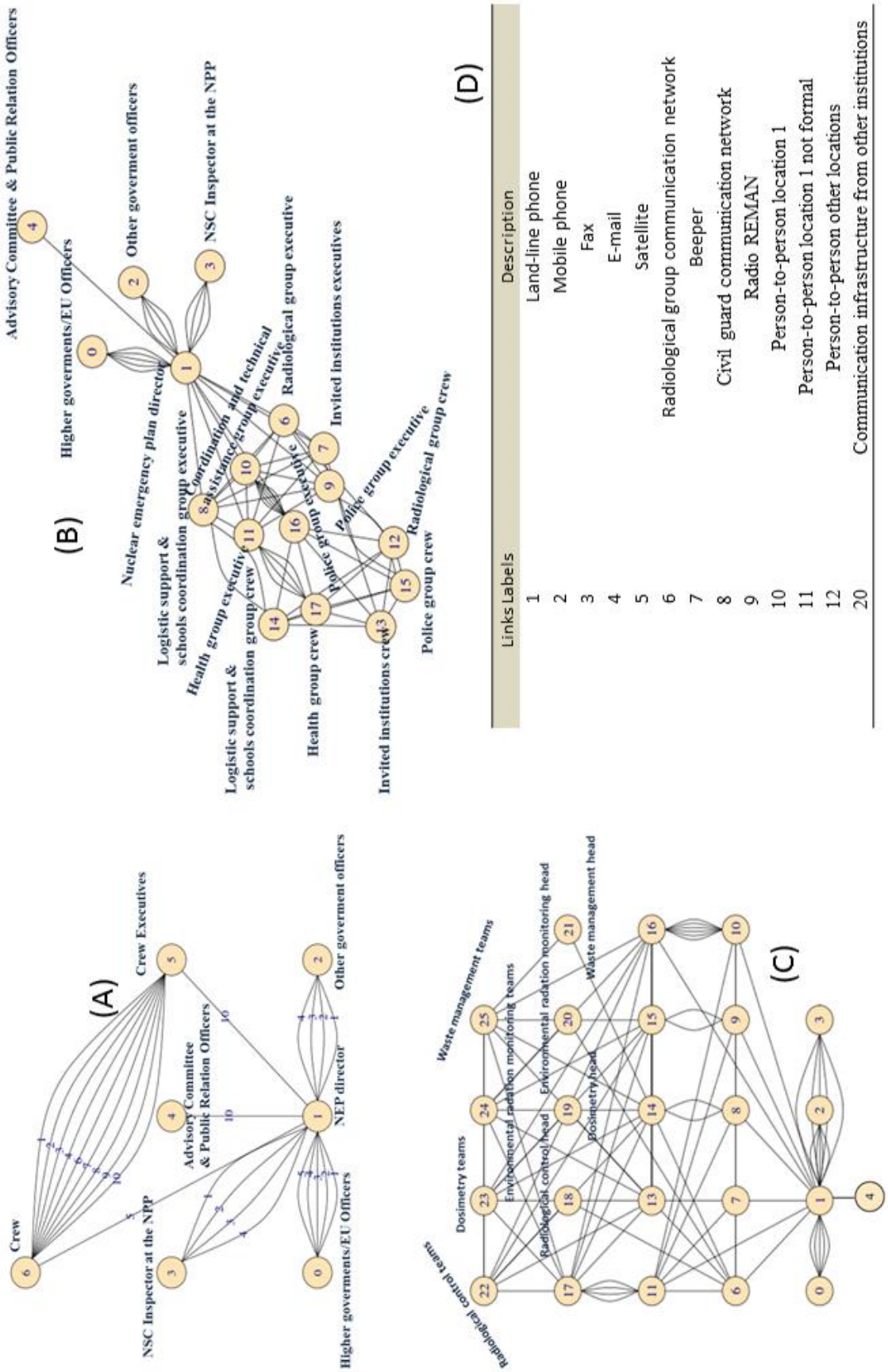


Figure 56. Représentation des trois différents modèles du PUN et la description des liens.

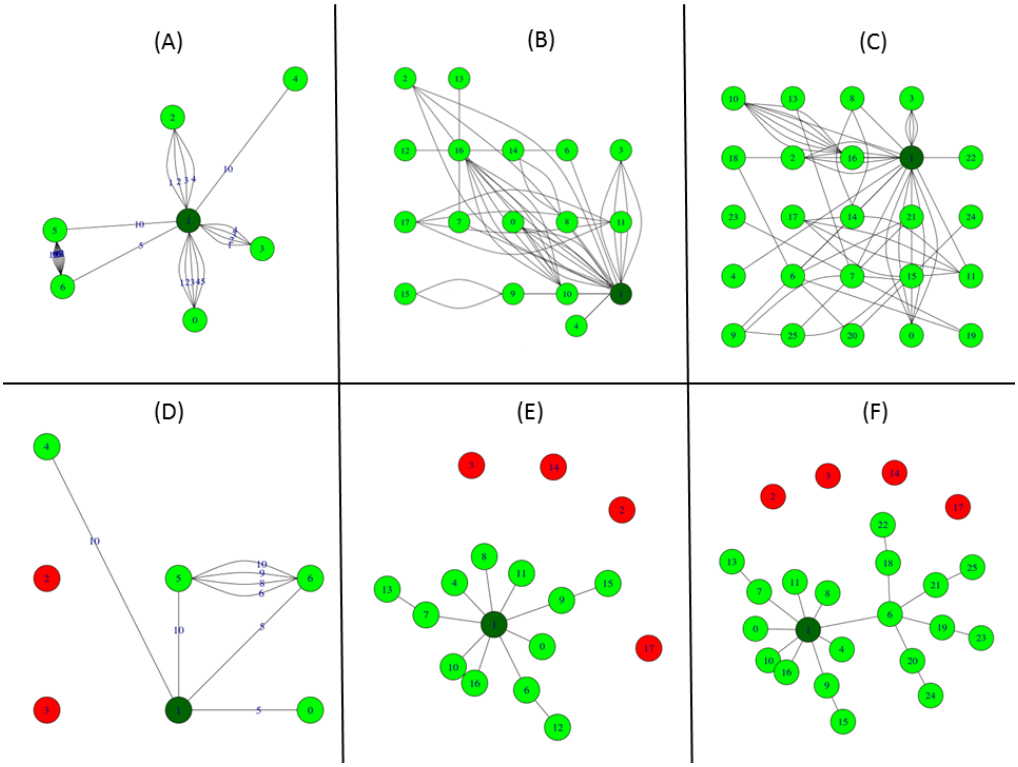


Figure 57. Résultats de simulation de la propagation d'information dans Le PUN.

La Figure 58 montre les résultats de simulation pour le scénario 2 (suppression aléatoire de deux couches de communication en même temps) pour le modèle le plus détaillé du PUN (Figure 56C). Nous représentons le nombre d'agents qui ont reçu les informations. Nous observons à travers ce scénario qu'il y a des combinaisons critiques impactant le processus de propagation des informations dans un Plan d'Urgence Nucléaire par exemple, si nous bloquons la communication personne à personne entre les agents et par le satellite, les ordres et les instructions ne seront reçus que par 4 agents. Avec cette dernière analyse, nous pouvons déterminer les combinaisons les plus critiques dans le processus de transmission de l'information dans le cas d'une situation d'urgence.

1.4 Conclusion

L'étude montre que la topologie des équipes ne suffit pas à identifier les groupes ou les personnes isolés d'une information considérée. En effet, la simulation des trois scénarios permet d'identifier les canaux clés qui peuvent affecter la réception des messages par les personnes impliquées dans l'opération d'urgence. Nous avons montré que des défaillances au niveau du réseau affectent la transmission d'information. En jouant des scénarios avec différentes configurations, nous avons pu optimiser la portée d'un message sur les différents groupes. Nous pouvons aussi tirer des conclusions importantes sur la façon dont les défaillances impactent la gestion des plans d'urgences. Par ailleurs, l'utilisation de l'architecture Proxy/Serveur a facilité l'ajout et la suppression des couches pour jouer les différentes caractéristiques et propriétés de la population des scénarios proposés.

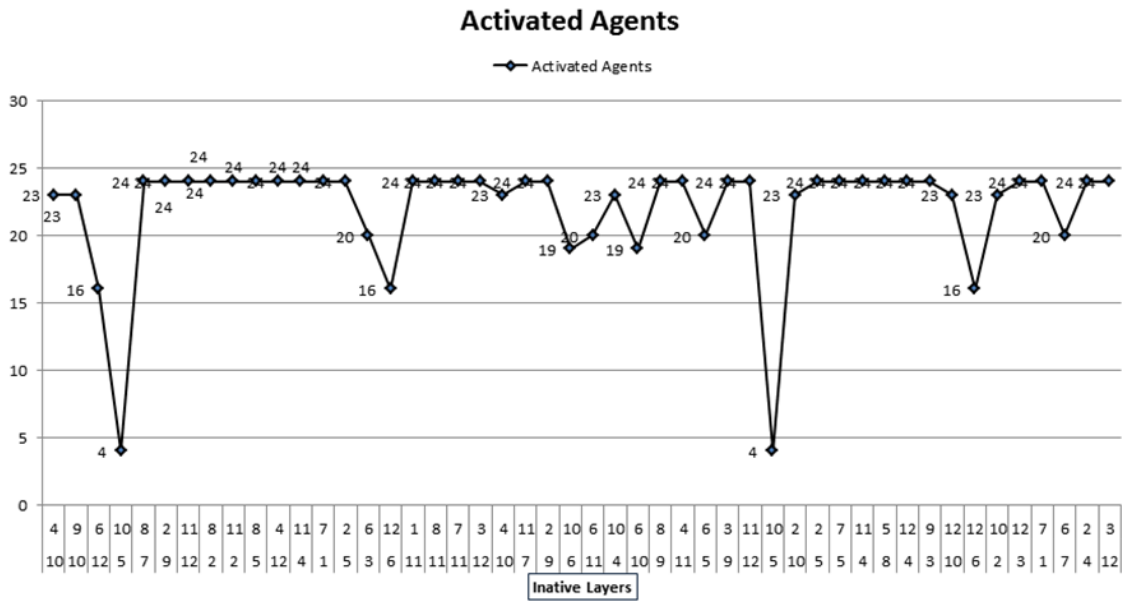


Figure 58. Nombre d'agent actif en fonction des moyens de communication.

2> Etude de la propagation d'information au sein des organisations par la simulation

2.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, la modélisation informatique et la simulation des réseaux ont eu un impact énorme sur l'avancement des connaissances dans plusieurs domaines tels que la physique, la chimie ou la biologie. Après une phase de validation des modèles de simulation dans ces domaines, ils commencent à être rapidement adoptés comme de nouveaux outils puissants pour compléter et étendre les outils, les modèles et les méthodologies utilisées en génie industriel et ingénierie. En effet dans ce domaine la majorité des modèles conceptuels proposent une vue statique de l'entreprise et plutôt centrée sur le système technique. L'aspect social est peu considéré. Dans cette section, nous discutons l'utilisation de la simulation pour l'étude du comportement des ressources humaines et du système organisationnel en prenant en compte les différents canaux de communication (formels et informels). Notre approche consiste à appliquer la théorie des réseaux, le concept de la modélisation et de la simulation à base d'agent et le formalisme DEVS pour étudier et comprendre l'impact de la propagation d'information au sein d'une entreprise structurée. La théorie des réseaux est une approche très importante pour modéliser et étudier les relations structurelles et de la communication dans les organisations. L'idée est de représenter une organisation comme un réseau composé du personnel

de l'organisation (représenté sous forme de nœuds dans un graphe) et les relations entre eux (représentés sous forme de liens) (Newman 2003). Le formalisme DEVS nous permet d'intégrer le comportement microscopique des individus et de simuler l'évolution de ce comportement dans le temps. Les réseaux sociaux ont également été utilisés pour examiner et étudier le fonctionnement intra-organisationnelle, caractérisant les nombreuses connexions formelles ou informelles qui relient les cadres ensemble et les connexions entre les employés de l'organisation (Podolny and Baron 1997).

L'information représente le pivot du système organisationnel de l'entreprise. Au sein des organisations modernes, la circulation de l'information est véhiculée par la hiérarchie et le système d'information. Lorsque l'information circule correctement, elle favorise la communication et devient, de ce fait, facteur de cohésion, de motivation, de décision efficace et de créativité. Il est possible d'observer qu'une partie de l'information emprunte des liens sociaux autres que la hiérarchie et le S.I. Considérer ces nouveaux circuits d'information serait donc une force pour l'entreprise, cela lui permet de diffuser l'information utile au bon endroit et moment. Dans ce contexte, il devient important et primordial pour le manager de savoir diffuser l'information et de savoir utiliser les flux appropriés pour le développement efficace de sa communication interne.

2.2 Propagation de l'information au sein des organisations

La communication interne est l'un des grands secteurs de la communication des organisations. Elle a pour rôle principal de favoriser une construction commune du sens dans une organisation. La communication interne est souvent liée au mode d'organisation de la structure. Dans une structure centralisée, la communication est formelle, le plus souvent écrite. L'information suit donc un sens vertical : de la direction vers les salariés (descendante). L'émetteur est le seul à être compétent pour maîtriser les problèmes complexes qu'il doit décomposer en éléments simples et indiquer les solutions précises. L'échange entre les employés peut aussi se faire d'une façon informelle. Pour éviter les désagréments de ce genre de communication, comme la propagation de rumeurs qui peuvent mettre en doute la crédibilité de tel ou tel service, un pas vers la structuration est indispensable.

Cependant, les réseaux de communication dans l'organisation ne respectent pas toujours l'organigramme et la structure de l'établissement. En effet, les communications informelles ont toujours existé et elles ont toujours été source de circulation de l'information dans les organisations. Ces canaux informels de circulation et propagation de l'information apparaissent en fonction du statut des salariés (les cadres déjeunent ensemble, les secrétaires prennent leurs pauses au même moment, etc.), du service d'appartenance des collaborateurs, etc. Ces relations interpersonnelles permettent généralement d'accroître la rapidité de la propagation de l'information. Non officiellement

reconnus, les liens informels sont utilisés pour transmettre une information à des collaborateurs. Ils permettent une plus grande flexibilité de la circulation de l'information et favorisent la création du sens commun au sein de l'organisation.

En général, il existe plusieurs supports et formes de la propagation d'information et la circulation de la communication au sein des organisations. Par exemple, les réunions, les conférences, l'affichage, les courriers, les entretiens individuels, les échanges informels entre les collaborateurs, les systèmes d'information, etc. le choix de support d'injection et de diffusion d'une information impact l'action de manager et sa décision. La simulation des réseaux sociaux peut être un outil efficace pour prédire la voie de circulation d'information permettant de mettre en œuvre une décision stratégique.

2.3 Analyse des réseaux au sein des organisations

L'analyse des réseaux permet de découvrir les modes de communication émergente et informelle présentes dans une organisation. Ces modèles émergents peuvent être utilisés pour expliquer plusieurs phénomènes organisationnels. Par exemple, le rôle des collaborateurs dans le réseau de communication, l'impact de l'information sur la motivation des employés, le contrôle de l'information, etc. Les modèles de relations entre les employés et les autres membres de l'organisation peuvent aider à expliquer pourquoi les employés développent certaines attitudes à l'égard des événements ou des décisions liées à leurs emplois (Pollock, Whitbred et al. 2000). Depuis peu, il y a un intérêt croissant pour l'utilisation des modèles des réseaux sociaux dans l'analyse et l'étude des organisations telle que l'adaptation organisationnelle (Carley and Lin 1997), changement de poste de travail (Granovetter 1995) et la structuration de l'organisation (DiMaggio 1986). Ces travaux se basent sur une représentation plutôt statique et structurelle et n'intègrent pas l'aspect dynamique des réseaux. L'utilisation de la simulation pour l'étude des phénomènes de la gestion permet d'apporter une vue dynamique afin de mieux comprendre et d'analyser le phénomène.

Dans nos travaux, nous proposons la simulation pour étudier le phénomène de propagation au sein d'un réseau organisationnel (réseau représentant la structure d'une organisation ; les individus sont les nœuds et les relations représentent les arcs) afin de prévoir l'impact des caractéristiques de l'information ainsi que la structure et la topologie du réseau sur les récepteurs de l'information. Dans la partie suivante, nous présenterons l'application de l'architecture et la maquette de simulation développés pour l'étude d'une organisation.

2.4 Simulation de la propagation d'information formelle et informelle au sein d'une organisation

Aujourd'hui, l'environnement économique demande aux organisations de dépasser une structure statique pour suivre les changements rapides et l'évolution du contexte. Cet environnement exige une adaptation interne par la construction de structures flexibles aux changements de l'extérieur. Tenant compte des différents canaux d'échange d'information (formels et informels), il devient difficile de traiter ce problème avec une approche analytique. En détail, il est difficile de formuler des expressions générales qui intègrent les différents paramètres et variables. Pour ces raisons, les approches de modélisation et simulation modulaires peuvent apporter une réponse. En effet, un système complexe peut être décomposé en sous-systèmes modélisés et simulés.

Dans cette section, nous présentons des perspectives d'application de notre architecture de simulation pour l'étude et l'analyse des relations formelles et informelles au sein d'une organisation. Un exemple d'organisation est illustré dans la Figure 59. L'organisation représente une entreprise fictive de 31 individus et se compose de 3 composants. Les employés sont colorés par emplacement du bureau où ils travaillent et des fonctions similaires d'organisation sont regroupées par emplacement aussi.

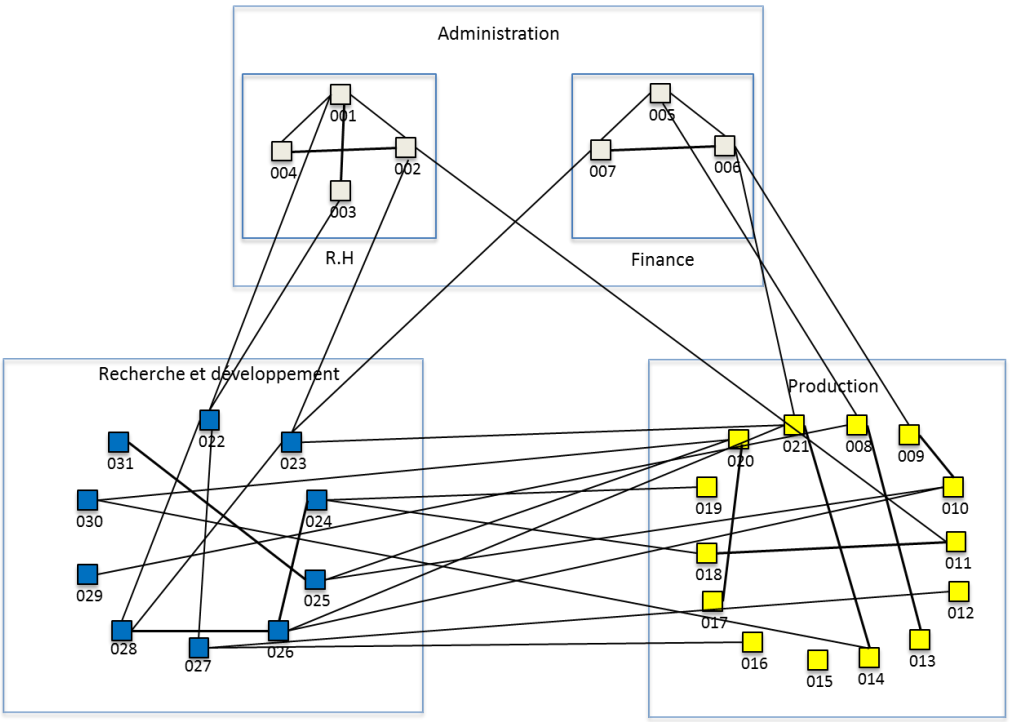


Figure 59. Représentation de l'entreprise.

La première question que les employés se posent est « Avec qui je peux échanger des informations, des documents et d'autres ressources et par quel moyen ? ». Dans ce contexte, l'utilisation de la simulation est très important pour :

- Simuler plusieurs scénarios en intégrant la dynamique de la structure et les canaux informels de l'échange. La simulation permet d'apporter une vue dynamique et d'identifier les différentes combinaisons de configurations afin de contrôler les échanges d'information et contribuer ainsi à formuler des décisions stratégiques. Une fois que les combinaisons identifiées et étudiées, la bonne solution de communication peut être mise en œuvre pour supporter l'évolution et le changement de l'entreprise.

- Visualiser et analyser les relations et l'inter connectivité massives entre des collaborateurs au sein de l'entreprise. L'analyse de ces relations permet de comprendre comment les flux d'information et de décisions circulent au sein de l'entreprise. A ce stade, on peut appliquer aussi les concepts de la théorie des réseaux pour étudier la structure de l'entreprise en modélisant les individus sous forme de nœuds et les relations (formelles ou informelles) sous forme d'arcs (Figure 60). De ce fait, nous pouvons déterminer les nœuds centraux qui peuvent échanger des informations avec plusieurs et différents nœuds. Ces Nœuds représentent des individus qui sont souvent fortement engagés dans l'entreprise. Ils peuvent être ainsi invités à participer à des réunions ou entretiens individuels avec la direction afin de bien transmettre et partager des nouvelles décisions et changements. En identifiant et manageant proprement les nœuds centraux, le changement et les nouvelles décisions peuvent être adoptés plus facilement et aussi les perturbations coûteuses qui peuvent être limitées. Un deuxième nœud très important à déterminer est le nœud critique qui crée le lien entre les groupes. Dans ces nœuds, le partage d'information et des idées peut se bloquer.

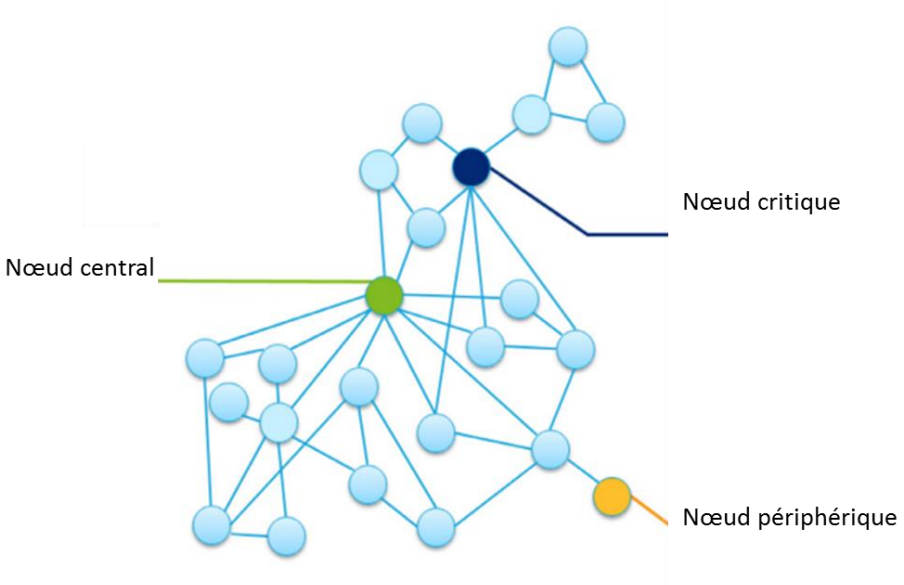


Figure 60. Exemple d'un réseau représentant une organisation.

Finalement, on trouve aussi des nœuds périphériques qui sont faiblement connectés au reste de l'entreprise. Ces derniers peuvent être un risque pour l'organisation en particulier s'ils ont des talents et des compétences exceptionnelles.

2.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons discuté l'intégration de l'analyse des échanges formels et informels au sein des organisations par la simulation. En appliquant la simulation de réseaux sociaux dans le domaine des organisations, nous pouvons mieux étudier, analyser et comprendre une partie du système peu traité dans le domaine de la modélisation d'organisation et d'entreprise. En détail, cette étude fait apparaître l'impact des relations sociales entre les employés sur le fonctionnement de l'organisation. Ces relations ne sont ni contrôlées ni intégrées dans les flux d'information des processus métiers. Nous pensons que ces communications peuvent cependant participer à l'échec ou à la réussite d'un changement au sein de l'organisation. Il sera donc intéressant dans la suite de comprendre leur interaction avec les modèles d'entreprise et d'organisation afin d'améliorer la spécification de ces systèmes.

Chapitre 6. Conclusion

Nous présentons, dans ce chapitre, un résumé des travaux effectués en nous attachant principalement aux apports réalisés au cours de cette thèse. Nous pouvons résumer ces contributions ainsi : la définition d'une spécification d'un réseau social dans le formalisme DEVS où la principale caractéristique est la transformation dynamique d'un réseau social en une instance de la classe des modèles de réseau DEVS. La proposition d'un nouveau modèle de propagation dont le but est de séparer l'action de diffusion et celle de l'influence ; la définition d'une spécification des agents dans le cadre des systèmes multi-agents en utilisant l'ensemble des spécifications précédentes ; le développement d'une architecture et maquette de simulation des phénomènes de propagation au sein d'un réseau social multicouche regroupant les définitions introduites dans cette thèse et, en dernière étape, l'élaboration et la simulation de phénomènes de propagation dans différents domaines (militaire, civil et industriel) afin de prévoir et d'analyser l'impact de propagation au sein d'un réseau social. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous discutons des perspectives de nouveaux travaux à partir des études réalisées dans ce manuscrit.

1> Résumé de nos travaux

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire apportent un certain nombre de contributions à la simulation des phénomènes de propagation et à l'étude des réseaux sociaux.

Le premier chapitre pose la problématique qui identifie le modèle simulable des réseaux sociaux. Le deuxième chapitre Etat de l'Art fait apparaître les limites des approches actuelles et en particulier le besoin de comprendre leur comportement et ainsi couvrir un spectre plus important des systèmes sociotechniques. Le troisième chapitre résume les premiers travaux réalisés durant cette thèse. Ces travaux se basent sur l'ensemble des spécifications précédentes et intègrent aussi la spécification de la structure dynamique. Cette spécification utilise les principes de DEVS et de son extension DS-DEVS, la modularité, la hiérarchie de modèles et la dynamique de la structure, pour définir les différentes entités. Nous avons proposé un agent qui possède deux parties distinctes. Une première qui définit le comportement et une deuxième qui définit les interactions avec l'environnement et les autres agents. Les interactions sont réalisées par des entités nommées modèles proxies en interaction avec les autres agents et avec l'environnement dans lequel l'agent se situe. Un modèle proxy représente un type de lien entre les agents et il est modélisé par un modèle DEVS atomique. Le comportement de l'agent est réalisé par une entité nommée modèle serveur et il est formalisé par un modèle DEVS atomique. Notre formalisation suit un principe simple : affecter à chaque entité une classe de comportement. Le but est de réaliser des modèles DEVS qui n'accomplissent qu'un seul type d'actions afin de diminuer la complexité. Le

couplage des modèles DEVS gère alors les interactions entre ces différentes entités.

Dans la deuxième partie du chapitre 3, nous proposons un algorithme de propagation intégrant l'action de diffusion et l'influence de l'information au sein d'un réseau social. En effet, en partant du constat que les travaux traditionnels sur les réseaux sont principalement stochastique et ne tenaient pas compte de l'évolution dynamique du réseau et sa complexité. Nous avons donc proposé une approche générique, permettant la modélisation et la simulation d'un phénomène de propagation sur des réseaux multiplexes. Cette approche permet d'étudier l'impact de la sociabilité sur le phénomène de propagation. Les travaux menés ont également des implications directes pour l'étude des réseaux sociaux, puisqu'ils nous amènent à nous interroger sur les méthodes de modélisation de la dynamique et des processus prenant place sur les réseaux.

Dans le chapitre 4, nous présentons le développement de l'architecture et de la maquette de la modélisation et de la simulation des phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux multiplexes qui intègre l'ensemble des travaux présentés dans le chapitre 3. La maquette permet dans un premier temps de générer une société d'agents caractérisés par un ensemble d'attributs et de variables en fonction des caractéristiques démographiques et socio-culturelles d'une zone bien désignée. Ensuite, au sein de la plate-forme VLE, qui est une plate-forme de multi-modélisation et de simulation de systèmes dynamiques basée sur le formalisme à événements discrets DEVS, nous avons développé une architecture permettant de transformer dynamiquement le réseau d'agents généré à un réseau de modèle DEVS. Nous avons aussi proposé des modèles auxiliaires pour la simulation de la propagation d'un message au sein du réseau. Enfin, le module de la visualisation et l'exploitation des résultats de simulation a été développé sous RStudio afin d'étudier et traiter les données de sortie de la phase de simulation. Dans cette partie, nous avons aussi proposé une interface graphique pour simplifier la configuration et le pilotage de la simulation.

Finalement, dans le chapitre 5, nous avons étudié trois différentes applications (militaire, civile et industrielle). La première application issue du projet SICOMORES consiste à simuler et à étudier l'impact de la propagation des opérations et actions militaire d'influence sur une population lors de la phase de stabilisation. Dans le contexte d'une opération de stabilisation d'un conflit, la population est l'enjeu et la cible principale de ce type d'actions, relevant de la manœuvre informationnelle, les PsyOpS, les CIMIC, et le KLE. Les résultats d'une mission PsyOP nous ont permis d'étudier l'impact de la sociabilité sur la propagation des actions d'influence. Nous avons observé aussi l'impact des info-sources sur le processus de propagation d'une information au sein de la population d'une zone désignée. La deuxième application étudiée dans la suite du chapitre 5 montre l'intérêt de notre architecture et maquette de simulation dans le domaine la gestion de la communication d'un plan d'urgence. Dans cette

application, nous avons simulé et étudié le réseau de la communication dans la chaine de commande lors d'un plan d'urgence nucléaire espagnole. A la fin du chapitre 5, nous avons discuté les perspectives d'application de la simulation dans le domaine du management et de la gestion au sein d'une organisation structurée. La simulation de la propagation d'information au sein des organisations nous permet de mieux étudier, analyser et comprendre l'impact des relations entre les employés eu sein de l'organisation, le contrôle et la gestion des flux d'information dans un processus métier ainsi que l'échec ou la réussite d'une transformation ou d'un changement au sein de l'organisation.

2> Perspectives

Les travaux réalisés dans ce mémoire laissent apparaître certaines limites. Afin de dépasser ces limites, nous proposons de nouvelles perspectives de recherche qui pourront être abordées dans des travaux futurs.

En ce qui concerne la propagation au sein des réseaux sociaux multiplexes et dynamiques, les travaux menés dans ce mémoire se sont uniquement intéressés à des populations qui ne changent pas de zone durant le processus de propagation. Nous avons supposé que le temps de diffusion est inférieur au temps que les individus passent sur une zone géographique. Une évolution de cette approche serait de supposer que même dans leur état de mobilité, les individus peuvent passer plus ou moins de temps sur les zones qu'ils visitent : cinéma, centre commercial, musée, hôpital, etc. Un des objectifs serait d'étudier comment le temps d'immobilité passé sur une zone influence le processus de diffusion.

Une autre piste intéressante concerne l'étude de l'évolution du comportement des individus face aux phénomènes de propagation. En effet, dans le contexte de la diffusion d'une information résultante d'un ensemble d'événements, les individus répondent à l'apparition et à la propagation de l'information par deux actions : la première est l'adoption de comportements de défense, qui peuvent se traduire au niveau du réseau social sous-jacent par des suppressions de liens avec des individus sources de propagation, la création de nouveaux liens avec des individus actifs ou l'adoption d'une opinion négative de l'événement. La deuxième action consiste à accepter le message qui peut se traduire par l'augmentation des liens entre des individus ou le développement d'une opinion positive de l'événement ou produit de propagation. La dynamique sur le réseau est alors le résultat d'une part de comportements cognitifs individuels ou sociaux, mais pourrait également être modifiée ou adaptée selon l'état du voisinage des nœuds ou le comportement psychologique des individus. L'évolution de cette étude serait d'intégrer le comportement psychologique des individus dans le traitement de message afin de rendre l'agent plus intelligent.

Les méthodes présentées dans ce mémoire pourront également trouver des applications complétant les modèles d'entreprise et

d'organisation classiquement utilisées. Typiquement, le domaine de transformation de modèles pour la simulation. Par exemple, la simulation d'un modèle BPMN en le transformant d'une manière semi-automatique en un modèle DEVS (Bazoun, Bouanan et al. 2014) pourra être complétée en vue d'une simulation sous la plate-forme VLE par un modèle de réseau social. Ainsi, la prévision de la réaction des employés au sein d'une entreprise face à des changements pourra être mieux anticipée. Ceci permettait d'améliorer les stratégies et de minimiser ou limiter les coûts de perturbations des organisations.

L'étude de la sensibilité et de la robustesse des modèles de propagation représente également des perspectives d'études intéressantes. L'étude de la sensibilité des modèles s'attache à déterminer l'impact local ou global des facteurs d'entrée sur le modèle. La robustesse caractérise le fait qu'une légère modification des conditions expérimentales (un ou plusieurs paramètres) ne modifie que très peu la réponse mesurée. Cette propriété est bien sûr très intéressante si plusieurs observateurs doivent intervenir pour réaliser une même série d'analyses ou si l'on ne dispose que d'opérateurs peu expérimentés. Un modèle DEVS (modélisant l'agent, le message ou les interactions), dans notre maquette de simulation, est paramétrable par plusieurs types d'initialisations. Cependant, le modélisateur ne connaît pas toujours les relations entre les paramètres d'entrées et les sorties de son modèle. Il existe différentes méthodes, les unes plus complexes que d'autres, pour effectuer l'analyse de sensibilité d'un modèle. L'étude de la sensibilité est très proche du calibrage de modèle. La différence réside, dans le cas de l'étude de sensibilité, à faire varier les valeurs des paramètres et d'observer la variation des sorties du modèle, dans le cas du calibrage, nous cherchons la valeur optimale des paramètres en fonction des sorties que nous nous fixons.

Dans le cadre de ces travaux, nous avons été confrontés au défi de la collecte de données pertinentes et détaillées. Dans le même contexte et suite à un séjour au laboratoire VMASC de l'Université Old Dominion, nous avons développé une bibliothèque qui permet d'exploiter des données Twitter. Cependant, cet outil n'est pas intégré pour l'instant dans notre outil de simulation. Cette piste pourra être détaillée afin de valider des modèles de simulation en exploitant des données de réseaux sociaux en ligne (ex. Twitter).

Enfin, s'intéresser à des interactions individuelles nous amène à nous interroger sur les stratégies de développement actuelles des systèmes d'information au sein des entreprises. En effet, nous avons pu mettre en évidence l'impact d'interaction et d'échange entre les individus sur les stratégies de gestion au sein des organisations. Or, les systèmes d'information industriels actuels ne prennent pas suffisamment en compte cette réalité. Ainsi, une piste de recherche prometteuse serait d'étudier et de prendre en compte l'échange d'informations dans les réseaux sociaux en complétant des flux de données définies dans les systèmes d'informations.

Dans cet objectif, ces approches pourraient avoir des applications intéressantes. Elles pourraient en effet être utilisées pour prédire les stratégies d'intervention tenant compte de l'impact humain dans les problèmes d'interopérabilités dans le domaine de la modélisation d'entreprise. Les modèles des réseaux sociaux et du comportement des individus viendront pour faciliter l'interopérabilité dans le cas d'un écosystème. Dans des travaux ultérieurs, nous pourrons aussi nous intéresser à la question de l'abstraction adéquate et de l'utilité des modèles sociétaux. Le défi de la validation qui handicape la génération actuelle de modèles de société serait dans ce cas aussi traité.

Références

- CICDE, (2008). Doctrine interarmées des opérations militaires d'influence, CICDE.
- (CIA), C. I. A. (2016). "The world Factbook." Retrieved Juillet 2016, 2016, from https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ct.html.
- Adams, B. D., J. Sartori and S. Waldherr (2007). Military influence operations: Review of relevant scientific literature, DTIC Document.
- Adner, R. and D. Levinthal (2001). "Demand heterogeneity and technology evolution: implications for product and process innovation." Management science **47**(5): 611-628.
- Aggarwal, C. C. and H. Wang (2011). Text mining in social networks. Social network data analytics, Springer**:** 353-378.
- Ajzen, I. (1991). "The theory of planned behavior." Organizational behavior and human decision processes **50**(2): 179-211.
- Albano, A., J.-L. Guillaume and B. Le Grand (2012). File diffusion in a dynamic peer-to-peer network. Proceedings of the 21st international conference companion on World Wide Web, ACM.
- Albright, M. D. and P. E. Levy (1995). "The Effects of Source Credibility and Performance Rating Discrepancy on Reactions to Multiple Raters1." Journal of Applied Social Psychology **25**(7): 577-600.
- Alderfer, C. P. (1969). "An empirical test of a new theory of human needs." Organizational behavior and human performance **4**(2): 142-175.
- Anderson, R. M., R. M. May and B. Anderson (1992). Infectious diseases of humans: dynamics and control, Wiley Online Library.
- Apolloni, A., K. Channakeshava, L. Durbeck, M. Khan, C. Kuhlman, B. Lewis and S. Swarup (2009). A study of information diffusion over a realistic social network model. Computational Science and Engineering, 2009. CSE'09. International Conference on, IEEE.
- armées, E.-m. d. (2012, août 2012). "La coopération civilo-militaire." Retrieved Juillet 2016, 2016, from http://www.defense.gouv.fr/ema/interarmees/le-centre-interarmees-des-actions-sur-l-environnement/la-cooperation-civilo-militaire.
- Axelrod, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social sciences. Simulating social phenomena, Springer**:** 21-40.
- Axelrod, R. (2006). "Simulation in the social sciences." Rennard (2006): 90-100.
- Bailey, N. T. (1975). The mathematical theory of infectious diseases and its applications, Charles Griffin & Company Ltd, 5a Crendon Street, High Wycombe, Bucks HP13 6LE.
- Barabási, A.-L. and R. Albert (1999). "Emergence of scaling in random networks." science **286**(5439): 509-512.
- Barros, F. J. (1995). Dynamic structure discrete event system specification: a new formalism for dynamic structure modeling and simulation. Proceedings of the 27th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society.

- Barros, F. J. (1997). "Modeling formalisms for dynamic structure systems." ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS) **7**(4): 501-515.
- Bazoun, H., Y. Bouanan, G. Zacharewicz, Y. Ducq and H. Boye (2014). Business process simulation: transformation of BPMN 2.0 to DEVS models (WIP). Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative, Society for Computer Simulation International.
- Becker, R. A., J. M. Chambers and A. R. Wilks (1988). "The new S language." Pacific Grove, Ca.: Wadsworth & Brooks, 1988 **1**.
- Bergier, J.-Y. (2016). Typologie des modèles d'actions.
- Bergier, J.-Y. and C. Faucher (2016). Persuasive communication from a military force to local civilians: a PsyOps system based on the Elaboration Likelihood Model. ICCI*CC 2016 15th IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing. Stanford University, USA.
- Boccaletti, S., V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez and D.-U. Hwang (2006). "Complex networks: Structure and dynamics." Physics reports **424**(4): 175-308.
- Bollobás, B. (1998). Random graphs, Springer.
- Bonacich, P. (2007). "Some unique properties of eigenvector centrality." Social networks **29**(4): 555-564.
- Booth-Butterfield, S. (2006). Steve's Primer of Practical Persuasion and Influence, Retrieved.
- Borgatti, S. P. and M. G. Everett (2006). "A graph-theoretic perspective on centrality." Social networks **28**(4): 466-484.
- Börner, K., S. Sanyal and A. Vespignani (2007). "Network science." Annual review of information science and technology **41**(1): 537-607.
- Bouanan, Y., G. Zacharewicz, B. Vallespir, J. Ribault and S. Y. Diallo (2016). DEVS based Network: Modeling and Simulation of Propagation Processes in a Multi-Layers Network Spring Simulation Conference, MSCIAAS. Pasadena, CA, USA.
- Bouanan, Y., G. Zacharewicz, B. Vallespir, J. Ribault and S. Diallo Y. (2016). DEVS based Network: Modeling and Simulation of Propagation Processes in a Multi-Layers Network
- Spring Simulation Conference, MSCIAAS. Pasadena, CA, USA.
- Brandolese, A., A. Brun and A. Portioli-Staudacher (2000). "A multi-agent approach for the capacity allocation problem." International Journal of Production Economics **66**(3): 269-285.
- Brass, D. J. and M. E. Burkhardt (1992). "Centrality and power in organizations." Networks and organizations: Structure, form, and action **191**: 215.
- Braunsberger, K. (1996). The effects of source and product characteristics on persuasion, University of Texas at Arlington.
- Brockmann, D., L. Hufnagel and T. Geisel (2006). "The scaling laws of human travel." Nature **439**(7075): 462-465.
- Brodka, P. and P. Kazienko (2014). Multi-Layered Social Networks. Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining, Springer.

- Bródka, P., P. Kazienko, K. Musiał and K. Skibicki (2012). "Analysis of neighbourhoods in multi-layered dynamic social networks." International Journal of Computational Intelligence Systems **5**(3): 582-596.
- Bruzzone, A. G., M. Massei, S. Poggi, C. Bartolucci and A. Ferrando (2015). Intelligent Agents for Human Behavior Modeling as Support to Operations. Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Springer**:** 119-132.
- Burt, R. S. (2009). Structural holes: The social structure of competition, Harvard university press.
- Carley, K. M. (2001). Computational approaches to sociological theorizing. Handbook of sociological theory, Springer**:** 69-83.
- Carley, K. M. and Z. Lin (1997). "A theoretical study of organizational performance under information distortion." Management Science **43**(7): 976-997.
- Centre InterArmées de Concepts, d. D. e. d. e. (2008). Doctrine interarmées des opérations militaires d'influence. N° 069/DEF/CICDE/NP.
- Centre interarmées de concepts, d. d. e. d. e. (2011). L'ASSISTANCE MILITAIRE OPÉRATIONNELLE (AMO) À UNE FORCE ARMÉE ÉTRANGÈRE CICDE.
- Chaib-Draa, B., I. Jarras and B. Moulin (2001). "Systèmes multi-agents: principes généraux et applications." Edition Hermès: 1030-1044.
- Chaiken, S. (1987). The heuristic model of persuasion. Social influence: the ontario symposium.
- Chaiken, S. and D. Maheswaran (1994). "Heuristic processing can bias systematic processing: effects of source credibility, argument ambiguity, and task importance on attitude judgment." Journal of personality and social psychology **66**(3): 460.
- Charles, H. C. (1909). "Social organization: A study of the larger mind." Charles Scribner's Sons, New York.
- Cheng, J.-J., Y. Liu, B. Shen and W.-G. Yuan (2013). "An epidemic model of rumor diffusion in online social networks." The European Physical Journal B **86**(1): 1-7.
- Cherkaoui, M. (2001). "Macrosociology/microsociology." Encyclopaedia for Social and Behavioral Sciences (Amsterdam: Elsevier).
- Cherkaoui, M. (2003). "The individual and the collective." European Review **11**(04): 489-504.
- Christakis, N. A. and J. H. Fowler (2010). "Social network sensors for early detection of contagious outbreaks." PloS one **5**(9): e12948.
- Christley, R. M., G. Pinchbeck, R. Bowers, D. Clancy, N. French, R. Bennett and J. Turner (2005). "Infection in social networks: using network analysis to identify high-risk individuals." American journal of epidemiology **162**(10): 1024-1031.
- Cicourel, A. V. (2008). "Micro-processus et macro-structures." traduit de l'anglais par Alain Accardo et Francis Chateauraynaud, révisé par Philippe Corcuff), Sociologies, revue en ligne **29**.
- Cohen, R., K. Erez, D. Ben-Avraham and S. Havlin (2000). "Resilience of the Internet to random breakdowns." Physical review letters **85**(21): 4626.
- Cohen, R., K. Erez, D. Ben-Avraham and S. Havlin (2001). "Breakdown of the Internet under intentional attack." Physical review letters **86**(16): 3682.

- Conte, R., N. Gilbert and J. S. Sichman (1998). MAS and social simulation: A suitable commitment. Multi-agent systems and agent-based simulation, Springer.
- Cooley, C. H. (1956). Social organization, Transaction Publishers.
- Couture, S. (2012). RECORD: an open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems. Workshop "Adaptation of irrigated agriculture to climate change". 2012-04-022012-04-05, Bangalore, IND.
- Cukier, R., H. Levine and K. Shuler (1978). "Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems." Journal of computational physics **26**(1): 1-42.
- Daley, D. and D. G. Kendall (1965). "Stochastic rumours." IMA Journal of Applied Mathematics **1**(1): 42-55.
- Danon, L., A. P. Ford, T. House, C. P. Jewell, M. J. Keeling, G. O. Roberts, J. V. Ross and M. C. Vernon (2011). "Networks and the epidemiology of infectious disease." Interdisciplinary perspectives on infectious diseases **2011**.
- DiMaggio, P. (1986). "Structural analysis of organizational fields: A blockmodel approach." Research in organizational behavior.
- Duboz, R. (2004). Intégration de modeles hétérogenes pour la modélisation et la simulation de systemes complexes, Université du Littoral-Côte d'Opale.
- Duboz, R., E. Ramat and G. Quesnel (2004). "Systèmes multi-agents et théorie de la modélisation et de la simulation: une analogie opérationnelle." Actes des douzièmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)-Systèmes multi-agents défis scientifiques et nouveaux usages, Paris, Novemver.
- Eagly, A. H. and S. Chaiken (1993). The psychology of attitudes, Harcourt Brace Jovanovich College Publishers.
- Easley, D. and J. Kleinberg (2010). Networks, crowds, and markets: Reasoning about a highly connected world, Cambridge University Press.
- Eliot, E. and E. Daude (2006). "Spatial diffusion of epidemics: Approaches of complexities in geography." Espace populations societes **2**: 403.
- Entwisle, B., K. Faust, R. R. Rindfuss and T. Kaneda (2007). "Networks and Contexts: Variation in the Structure of Social Ties1." American Journal of Sociology **112**(5): 1495-1533.
- Erd6s, P. and A. Rényi (1960). "On the evolution of random graphs." Publ. Math. Inst. Hungar. Acad. Sci **5**: 17-61.
- Eubank, S. (2005). "Network based models of infectious disease spread." Japanese journal of infectious diseases **58**(6): S.
- Faucher, C., J.-Y. Bergier and M. Forestier (2015). Capturing Sub-Saharan African Sociality in Social Networks to Generate a Culturally Realistic Population. 2015 International Conference on Culture and Computing (Culture Computing), IEEE.
- Ferber, J. and O. Gutknecht (1998). A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. Multi Agent Systems, 1998. Proceedings. International Conference on, IEEE.
- Ferber, J. and J.-F. Perrot (1995). Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective, InterEditions.

- Filippi, J.-B. and P. Bisgambiglia (2004). "JDEVS: an implementation of a DEVS based formal framework for environmental modelling." Environmental Modelling & Software **19**(3): 261-274.
- Fishman, G. S. (1973). Concepts and methods in discrete event digital simulation.
- Fishwick, P. A. and B. P. Zeigler (1992). "A multimodel methodology for qualitative model engineering." ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS) **2**(1): 52-81.
- Flache, A., M. Macy, C. M Macal, D. Sallach and M. J North (2005). Social life from the bottom up: Agent modeling and the new sociology. Proceedings of the Agent 2004 Conference, The University Argonne National Laboratory of Chicago.
- Forestier, M., J.-Y. Bergier, Y. Bouanan, J. Ribault, G. Zacharewicz, B. Vallespir and C. Faucher (2015). Generating Multidimensional Social Network to Simulate the Propagation of Information. Proceedings of the 2015 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2015, ACM.
- Freeman, L. C. (1978). "Centrality in social networks conceptual clarification." Social networks **1**(3): 215-239.
- Freigassner, R., H. Praehofer and B. Zeigler (2000). Systems approach to validation of simulation models, na.
- Geller, A. and S. J. Alam (2010). "A Socio ‐ Political and ‐ Cultural Model of the War in Afghanistan1." International Studies Review **12**(1): 8-30.
- Giambiasi, N., B. Escude and S. Ghosh (2001). GDEVS: A generalized discrete event specification for accurate modeling of dynamic systems. Autonomous Decentralized Systems, 2001. Proceedings. 5th International Symposium on, IEEE.
- Giambiasi, N. and S. Ghosh (2001). Min-Max-DEVS: A new formalism for the specification of discrete event models with min-max delays. 13th European Simulation Symposium.
- Gilbert, G. N. (2008). Agent-based models, Sage.
- Gilbert, N. and K. Troitzsch (2005). Simulation for the social scientist, McGraw-Hill Education (UK).
- Goldenberg, J., B. Libai and E. Muller (2001). "Talk of the network: A complex systems look at the underlying process of word-of-mouth." Marketing letters **12**(3): 211-223.
- González-Avella, J. C., M. G. Cosenza, K. Klemm, V. M. Eguíluz and M. S. Miguel (2007). "Information feedback and mass media effects in cultural dynamics." arXiv preprint arXiv:0705.1091.
- Granovetter, M. (1978). "Threshold models of collective behavior." American journal of sociology: 1420-1443.
- Granovetter, M. S. (1973). "The strength of weak ties." American journal of sociology: 1360-1380.
- Granovetter, M. S. (1995). Getting a job: A study of contacts and careers, University of Chicago Press.
- Greenberg, B. S. and P. H. Tannenbaum (1961). "The effects of bylines on attitude change." Journalism & Mass Communication Quarterly **38**(4): 535-537.

- Greenhalgh, T., G. Robert, F. Macfarlane, P. Bate and O. Kyriakidou (2004). "Diffusion of innovations in service organizations: systematic review and recommendations." Milbank Quarterly **82**(4): 581-629.
- Greenwald, A. G. (1968). "Cognitive learning, cognitive response to persuasion, and attitude change." Psychological foundations of attitudes: 147-170.
- Greve, A. and J. W. Salaff (2001). "The development of corporate social capital in complex innovation processes." Gabbay, S. y Leenders, R. Social Capital of Organizations. Kidlington: Elsevier.
- GROUP, M. (2014). Document spécifications pour l'analyse après action et les Indicateurs.
- Gruer, P., V. Hilaire, A. Koukam and K. Cetnarowicz (2002). "A formal framework for multi-agent systems analysis and design." Expert Systems with Applications **23**(4): 349-355.
- Gruhl, D., R. Guha, D. Liben-Nowell and A. Tomkins (2004). Information diffusion through blogspace. Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web, ACM.
- Guadagno, R. E. and R. B. Cialdini (2002). "Online persuasion: An examination of gender differences in computer-mediated interpersonal influence." Group Dynamics: Theory, Research, and Practice **6**(1): 38.
- Guille, A., H. Hacid, C. Favre and D. A. Zighed (2013). "Information diffusion in online social networks: A survey." ACM SIGMOD Record **42**(2): 17-28.
- Hegselmann, R. and U. Krause (2002). "Opinion dynamics and bounded confidence models, analysis, and simulation." Journal of Artificial Societies and Social Simulation **5**(3).
- Helton, J. C. (1993). "Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal." Reliability Engineering & System Safety **42**(2-3): 327-367.
- Hendrick, C. and R. Borden (1970). "Effects of extraneous fear arousal and birth order on attitude change." Psychonomic Science **18**(4): 225-226.
- Hethcote, H. W. (2000). "The mathematics of infectious diseases." SIAM review **42**(4): 599-653.
- Hiebeler, D. (1994). "The swarm simulation system and individual-based modeling." Proceedings of Decision Support 2001: Advanced technology for natural resource management: 20-26.
- Hocaoglu, M., H. Sarjoughian and C. Firat (2002). DEVS/RAP: Agent-based simulation. AI, Simulation and Planning in High-Autonomy Systems.
- Hull, J. F. (2009). Iraq: Strategic reconciliation, targeting, and key leader engagement, DTIC Document.
- Ihaka, R. and R. Gentleman (1996). "R: a language for data analysis and graphics." Journal of computational and graphical statistics **5**(3): 299-314.
- In, M. "simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société." Londres.
- Iosim, I., T. Iancu, G. Popescu and M. D. Orboi (2010). "The Impact of Informal Communications in Organizations." Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture **67**(2): 125-130.

- J-Y. Bergier, C. F. (2016). Persuasive communication from a military force to local civilians: a PsyOps system based on the Elaboration Likelihood Model. 15th IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing, Stanford University, USA.
- Jin, F., E. Dougherty, P. Saraf, Y. Cao and N. Ramakrishnan (2013). Epidemiological modeling of news and rumors on twitter. Proceedings of the 7th Workshop on Social Network Mining and Analysis, ACM.
- Keeling, M. J. and K. T. Eames (2005). "Networks and epidemic models." Journal of the Royal Society Interface **2**(4): 295-307.
- Kelton, W. D. and A. M. Law (2000). Simulation modeling and analysis, McGraw Hill Boston.
- Kermack, W. O. and A. G. McKendrick (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. Proceedings of the Royal Society of London A: mathematical, physical and engineering sciences, The Royal Society.
- Khimeche, L., R. Messouci, C. Frydman, C. Faucher, A. El-Hamri and G. Zacharewicz (2012). CIMIC and PSYOPS models prefigure the future for Comprehensive Approach CGF. Fall Simulation Interoperability Workshop 2012 (2012 Fall SIW).
- Kilduff, M. and D. Krackhardt (1994). "Bringing the individual back in: A structural analysis of the internal market for reputation in organizations." Academy of management journal **37**(1): 87-108.
- Kim, S., H. Sarjoughian and V. Elamvazhuthi (2009). DEVS-Suite: a component-based simulation tool for rapid experimentation and evaluation. Spring Simulation Multi-conference, San Diego, CA, USA.
- Kimura, M., K. Saito and R. Nakano (2007). Extracting influential nodes for information diffusion on a social network. AAAI.
- Klovdahl, A. S. (1985). "Social networks and the spread of infectious diseases: the AIDS example." Social science & medicine **21**(11): 1203-1216.
- Kofman, E. (2002). "A second-order approximation for DEVS simulation of continuous systems." Simulation **78**(2): 76-89.
- Kofman, E., N. Giambiasi and S. Junco (2000). FDEVS: A general DEVS-based formalism for fault modeling and simulation. Proceedings of European Simulation Symposium.
- Krackhardt, D. (1990). "Assessing the political landscape: Structure, cognition, and power in organizations." Administrative science quarterly: 342-369.
- Kwon, Y. W., H. C. Park, S. Jung and T. G. Kim (1996). Fuzzy-DEVS formalism: concepts, realization and applications. Proceedings Of The 1996 Conference On AI, Simulation and Planning In High Autonomy Systems, Citeseer.
- Langlois, L. (2013). "IAEA action plan on nuclear safety." Energy Strategy Reviews **1**(4): 302-306.
- Lansing, J. S. (2002). "“Artificial societies” and the social sciences." Artificial Life **8**(3): 279-292.
- Law, A. M. (2009). How to build valid and credible simulation models. Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter, IEEE.

- Lazega, E. (1994). "Analyse de réseaux et sociologie des organisations." Revue française de sociologie: 293-320.
- Lazega, E. (2014). Réseaux sociaux et structures relationnelles:«Que sais-je?» n° 3399, Presses universitaires de France.
- Leskovec, J., M. McGlohon, C. Faloutsos, N. S. Glance and M. Hurst (2007). Patterns of Cascading behavior in large blog graphs. SDM, SIAM.
- Liben-Nowell, D. and J. Kleinberg (2008). "Tracing information flow on a global scale using Internet chain-letter data." Proceedings of the National Academy of Sciences **105**(12): 4633-4638.
- Lindenberg, S. (2000). "It takes both trust and lack of mistrust: The workings of cooperation and relational signaling in contractual relationships." Journal of management and governance **4**(1): 11-33.
- Lloyd, A. L. and R. M. May (2001). "How viruses spread among computers and people." Science **292**(5520): 1316.
- López-Pintado, D. (2008). "Diffusion in complex social networks." Games and Economic Behavior **62**(2): 573-590.
- M'Kendrick, A. (1925). "Applications of mathematics to medical problems." Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society **44**: 98-130.
- Macy, M. W. and R. Willer (2002). "From factors to actors: Computational sociology and agent-based modeling." Annual review of sociology: 143-166.
- Magnani, M. and L. Rossi (2011). The ML-model for multi layer network analysis. 2011 IEEE international conference on advances in social networks analysis and mining, Kaohsiung. IEEE Computer Society, Los Alamitos.
- Maslow, A. H. (1943). "A theory of human motivation." Psychological review **50**(4): 370.
- Maslow, A. H., R. Frager, J. Fadiman, C. McReynolds and R. Cox (1970). Motivation and personality, Harper & Row New York.
- McClelland, D. C. (1961). "The achievement society." Princenton, NJ: Von Nostrand.
- McCormack, R. and W. Salter (2010). An application of epidemiological modeling to information Diffusion. Advances in social computing, Springer**:** 382-389.
- McGuire, W. J. (1969). "The nature of attitudes and attitude change." The handbook of social psychology **3**(2): 136-314.
- McKenna, S. and R. Hampsey (2010). "The “COIN Warrior” waging influence: hints for the counterinsurgency (COIN) strategy in Afghanistan." Special to Small Wars Journal.
- McPherson, M., L. Smith-Lovin and J. M. Cook (2001). "Birds of a feather: Homophily in social networks." Annual review of sociology: 415-444.
- Meyer, T. (2000). "Le modèle de traitement heuristique systématique de l'information: motivations multiples et régulation du jugement en cognition sociale." L'année psychologique **100**(3): 527-563.
- Meyers, L. A., B. Pourbohloul, M. E. Newman, D. M. Skowronski and R. C. Brunham (2005). "Network theory and SARS: predicting outbreak diversity." Journal of theoretical biology **232**(1): 71-81.

- Michalski, R. and P. Kazienko (2015). Maximizing Social Influence in Real-World Networks—The State of the Art and Current Challenges. Propagation Phenomena in Real World Networks, Springer: 329-359.
- Milgram, S. (1967). "The small world problem." Psychology today **2**(1): 60-67.
- Minsky, M. L. (1970). "Some universal elements for finite automata." Automata Studies(34): 117-128.
- Morris, M. D. (1991). "Factorial sampling plans for preliminary computational experiments." Technometrics **33**(2): 161-174.
- Moss, S. (2001). "Game theory: limitations and an alternative." Available at SSRN 262547.
- Mugny, G., E. Tafani, J. M. Falomir-Pichastor and C. Layat (2000). "Source credibility, social comparison and social influence." Revue internationale de psychologie sociale **13**(3): 151-175.
- Murphy, P. K., T. A. Holleran, J. F. Long and J. A. Zeruth (2005). "Examining the complex roles of motivation and text medium in the persuasion process." Contemporary Educational Psychology **30**(4): 418-438.
- Nekovee, M., Y. Moreno, G. Bianconi and M. Marsili (2007). "Theory of rumour spreading in complex social networks." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **374**(1): 457-470.
- Newman, M. (2010). Networks: an introduction, OUP Oxford.
- Newman, M. E. (2002). "Spread of epidemic disease on networks." Physical review E **66**(1): 016128.
- Newman, M. E. (2003). "The structure and function of complex networks." SIAM review **45**(2): 167-256.
- Nutaro, J. J. "Adevs (A Discrete EVent System simulator)." Retrieved Juillet, 2016, from http://web.ornl.gov/~1qn/adevs/.
- Pastor-Satorras, R., C. Castellano, P. Van Mieghem and A. Vespignani (2015). "Epidemic processes in complex networks." Reviews of modern physics **87**(3): 925.
- Pastor-Satorras, R. and A. Vespignani (2001). "Epidemic dynamics and endemic states in complex networks." Physical Review E **63**(6): 066117.
- Pastor-Satorras, R. and A. Vespignani (2002). "Immunization of complex networks." Physical Review E **65**(3): 036104.
- Petty, R. and J. T. Cacioppo (2012). Communication and persuasion: Central and peripheral routes to attitude change, Springer Science & Business Media.
- Petty, R. E. and J. T. Cacioppo (1986). The elaboration likelihood model of persuasion. Communication and persuasion, Springer: 1-24.
- Petty, R. E. and J. T. Cacioppo (1996). Attitudes and persuasion: Classic and contemporary approaches, Westview Press.
- Petty, R. E., J. T. Cacioppo and R. Goldman (1981). "Personal involvement as a determinant of argument-based persuasion." Journal of personality and social psychology **41**(5): 847.
- Phan, D. and F. Amblard (2007). Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences, Bardwell Press Oxford.

- Pilon, M. and K. Vignikin (2006). Ménages et familles en Afrique subsaharienne, Archives contemporaines.
- Podolny, J. M. and J. N. Baron (1997). "Resources and relationships: Social networks and mobility in the workplace." American sociological review: 673-693.
- Pollock, T. G., R. C. Whitbred and N. Contractor (2000). "Social information processing and job characteristics." Human Communication Research **26**(2): 292-330.
- Pornpitakpan, C. (2004). "The persuasiveness of source credibility: A critical review of five decades' evidence." Journal of Applied Social Psychology **34**(2): 243-281.
- Pujol, G., B. Iooss, M. B. Iooss and S. DiceDesign (2016). "Package 'sensitivity'."
- Quesnel, G. (2006). "Approche formelle et opérationnelle de la multi-modélisation et de la simulation des systèmes complexes." PHD trésis Laboratoire d'Informatique du Littoral (LIL). Calais-France.
- Quesnel, G., R. Duboz and É. Ramat (2009). "The Virtual Laboratory Environment–An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems." Simulation Modelling Practice and Theory **17**(4): 641-653.
- Reingen, P. H. and J. B. Kernan (1993). "Social perception and interpersonal influence: Some consequences of the physical attractiveness stereotype in a personal selling setting." Journal of Consumer Psychology **2**(1): 25-38.
- Reinhard, M.-A., M. Messner and S. L. Sporer (2006). "Explicit persuasive intent and its impact on success at persuasion—The determining roles of attractiveness and likeableness." Journal of Consumer Psychology **16**(3): 249-259.
- Rogers, E. M. (2010). Diffusion of innovations, Simon and Schuster.
- Ruiz-Martin, C., Y. Bouanan, G. Wainer, G. Zacharewicz and A. López Paredes (2016). A Hybrid Approach to Study Communication in Emergency Plans Winter Simulation Conference. Washington, D.C. VA, USA.
- Ruiz-Martin, C. and D. J. Poza (2015). "Project configuration by means of network theory." International Journal of Project Management **33**(8): 1755-1767.
- Ruiz-Martin, C., M. Ramirez-Ferrero, J. L. Gonzalez-Alvarez and A. López-Paredes (2015). "Modeling of a Nuclear Emergency Plan: Communication Management." Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal **21**(5): 1152-1168.
- Saito, K., M. Kimura, K. Ohara and H. Motoda (2009). Learning continuous-time information diffusion model for social behavioral data analysis. Advances in Machine Learning, Springer**:** 322-337.
- Saito, K., M. Kimura, K. Ohara and H. Motoda (2012). "Efficient discovery of influential nodes for SIS models in social networks." Knowledge and information systems **30**(3): 613-635.
- Saito, K., K. Ohara, Y. Yamagishi, M. Kimura and H. Motoda (2011). Learning diffusion probability based on node attributes in social networks. Foundations of Intelligent Systems, Springer**:** 153-162.

- Salathé, M. and J. H. Jones (2010). "Dynamics and control of diseases in networks with community structure." PLoS Comput Biol **6**(4): e1000736.
- Salathé, M., M. Kazandjieva, J. W. Lee, P. Levis, M. W. Feldman and J. H. Jones (2010). "A high-resolution human contact network for infectious disease transmission." Proceedings of the National Academy of Sciences **107**(51): 22020-22025.
- Salerno, J. J., B. Romano and W. Geiler (2011). The national operational environment model (noem). SPIE Defense, Security, and Sensing, International Society for Optics and Photonics.
- Saltelli, A. (2002). "Sensitivity analysis for importance assessment." Risk Analysis **22**(3): 579-590.
- Sargent, R. G. (2005). Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 37th conference on Winter simulation, winter simulation conference.
- Schattenberg, B. and A. M. Uhrmacher (2001). "Planning agents in JAMES." Proceedings of the IEEE **89**(2): 158-173.
- Schneider, K., C. Rainwater and E. A. Pohl (2011). Assessing multi-layered social networks using reliability models. Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2011 Proceedings-Annual, IEEE.
- Scott, J. (2012). Social network analysis, Sage.
- Seo, C., B. P. Zeigler, R. Coop and D. Kim (2013). DEVS modeling and simulation methodology with ms4me software. Symposium on Theory of Modeling and Simulation-DEVS (TMS/DEVS).
- Serazzi, G. and S. Zanero (2004). Computer virus propagation models. Performance Tools and Applications to Networked Systems, Springer**:** 26-50.
- Silverman, B. G., G. Bharathy, B. Nye and R. J. Eidelson (2007). "Modeling factions for "effects based operations": part I—leaders and followers." Computational and Mathematical Organization Theory **13**(4): 379-406.
- Simon, H. A. (1996). The sciences of the artificial, MIT press.
- Sobol, I. M. (2001). "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates." Mathematics and computers in simulation **55**(1): 271-280.
- Somech, A. and A. Drach‐Zahavy (2002). "Relative power and influence strategy: The effects of agent/target organizational power on superiors' choices of influence strategies." Journal of Organizational Behavior **23**(2): 167-179.
- Soulié, J.-C. (2001). Vers une approche multi-environnements pour les agents, Université de la Réunion.
- Standardization, I. O. f. (1994). ISO 8402: 1994: Quality Management and Quality Assurance-Vocabulary, International Organization for Standardization.
- Svenmarck, P., J. Huibregtse, A. van Vliet, D. A. van Hemert, P. J. van Amerongen, M. Lundin and E. Sjoberg (2010). Message dissemination in social networks for support of information operations planning, DTIC Document.

- Szell, M., R. Lambiotte and S. Thurner (2010). "Multirelational organization of large-scale social networks in an online world." Proceedings of the National Academy of Sciences **107**(31): 13636-13641.
- Team, R. (2014). "RStudio: integrated development for R." RStudio, Inc., Boston, MA. URL http://www. RStudio. com/ide.
- Team, R. C. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013, ISBN 3-900051-07-0.
- Treuil, J.-P., A. Drogoul and J.-D. Zucker (2008). Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques, Dunod.
- Tukey, J. W. (1977). "Exploratory data analysis."
- Turányi, T. (1990). "Sensitivity analysis of complex kinetic systems. Tools and applications." Journal of Mathematical Chemistry **5**(3): 203-248.
- Uhrmacher, A. M. and R. Arnold (1994). Distributing and maintaining knowledge: agents in variable structure environments. AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems, 1994. Distributed Interactive Simulation Environments., Proceedings of the Fifth Annual Conference on, IEEE.
- Uhrmacher, A. M. and B. G. Kullick (2000). Plug and test: software agents in virtual environments. Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation, Society for Computer Simulation International.
- Unicef. (2016). "Données statistiques du centreAfrique." Retrieved Juillet 2016, 2016, from http://www.unicef.org/french/infobycountry/car_statistics.html?p=printme.
- Valente, T. W. (1995). Network models of the diffusion of innovations, Hampton Press Cresskill, NJ.
- Van Tendeloo, Y. (2013). "Research Internship I: Efficient DEVS simulation."
- Van Tendeloo, Y. and H. Vangheluwe (2014). The modular architecture of the Python (P) DEVS simulation kernel. Proceedings of the 2014 Symposium on Theory of Modeling and Simulation-DEVS.
- Wainer, G. (2002). "CD++: a toolkit to develop DEVS models." Software: Practice and Experience **32**(13): 1261-1306.
- Wainer, G. A. and N. Giambiasi (2001). "Application of the Cell-DEVS paradigm for cell spaces modelling and simulation." Simulation **76**(1): 22-39.
- Wallace, R. (1991). "Social disintegration and the spread of AIDS: thresholds for propagation along 'sociogeographic'networks." Social Science & Medicine **33**(10): 1155-1162.
- Waltz, E. (2008). Situation analysis and collaborative planning for complex operations, DTIC Document.
- Ward, C. D. and E. McGinnies (1974). "Persuasive effects of early and late mention of credible and noncredible sources." The Journal of Psychology **86**(1): 17-23.
- Wasserman, S. and K. Faust (1994). Social network analysis: Methods and applications, Cambridge university press.

- Wathen, C. N. and J. Burkell (2002). "Believe it or not: Factors influencing credibility on the Web." Journal of the American society for information science and technology **53**(2): 134-144.
- Watts, D. J. and S. H. Strogatz (1998). "Collective dynamics of 'small-world'networks." nature **393**(6684): 440-442.
- Wickens, T. D. (1982). Models for behavior: Stochastic processes in psychology, WH Freeman & Co Ltd.
- Wierman, J. C. and D. J. Marchette (2004). "Modeling computer virus prevalence with a susceptible-infected-susceptible model with reintroduction." Computational statistics & data analysis **45**(1): 3-23.
- Wooldridge, M. (2009). An introduction to multiagent systems, John Wiley & Sons.
- Yang, J. and J. Leskovec (2010). Modeling information diffusion in implicit networks. Data Mining (ICDM), 2010 IEEE 10th International Conference on, IEEE.
- Young, H. P. (2009). "Innovation diffusion in heterogeneous populations: Contagion, social influence, and social learning." The American economic review: 1899-1924.
- Zacharewicz, G. (2006). Un environnement G-DEVS/HLA: Application à la modélisation et simulation distribuée de workflow, Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III, manuscrit de thèse.
- Zanette, D. H. (2002). "Dynamics of rumor propagation on small-world networks." Physical review E **65**(4): 041908.
- Zeigler, B. P., H. Praehofer and T. G. Kim (2000). Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems, Academic press.
- Zhang, M., M. Seck and A. Verbraeck (2013). A DEVS-based M&S method for large-scale multi-agent systems. Proceedings of the 2013 Summer Computer Simulation Conference, Society for Modeling & Simulation International.

Annexes

Annexe A : Script de l'analyse exploratoire des données de simulation sous R

A.1. Visualisation géographique de la population sous R

```
# Script pour visualiser l'état initial de la population sur une carte
google map.
library('RODBC')
library("RgoogleMaps")
library("spacetime")
library("sp")
library("plotGoogleMaps")
library("raster")
library("dismo")
library("googleVis")

Connex=odbcConnect(dsn="localhost",uid="root",pwd="admin")
request2 <- SELECT id_individu, opinion, chef_religieux,
chef_politique, id_religion, longitude, latitude FROM individus where
id_population= 623

Attributs <- sqlQuery(Connex, request2)
mydata <- Attributs
mydata$longlat <- paste(mydata$longitude, mydata$latitude, sep=":")
coordinates(mydata)<-~longitude+latitude
proj4string(mydata) <- CRS('+init=epsg:4326')

T <- plotGoogleMaps(mydata, zcol='opinion', filename=
'myMap_StartSimulation1.htm', mapTypeId = "hybrid")

#######################################################################
```

A.2. configuration de la simulation sous R

```
# Script pour la simulation Monte-Carlo en configurant les info-
sources aléatoirement à chaque itération.
library('rvle')
   for(k in 1:100)
{
f=rvle.open("GraphsPropagation.vpz", "PropagationNetworks")
     yy1<-sample(0:1199,1)
     test <-0
     while(test == 0)
     {
      yy2<-sample(0:1199,1)
      if(yy1 != yy2 ) {test<-1}
     }
     test1 <-0
     while(test1 == 0)
     {
      yy3<-sample(0:1199,1)
```

```
      if(yy1 != yy3 && yy3 != yy2 ) {test1<-1}
     }
     test2 <-0
     while(test2 == 0)
     {
      yy4<-sample(0:1199,1)
      if(yy1 != yy4 && yy4 != yy2 && yy4 != yy3 ) {test2<-1}
     }
    Source1<-yy1
    Source2<-yy2
    Source3<-yy3
    Source4<-yy4

     rvle.setIntegerCondition(f, "info-source", "source1", Source1)
     rvle.setIntegerCondition(f, "info-source", "source2", Source2)
     rvle.setIntegerCondition(f, "info-source", "source3", Source3)
     rvle.setIntegerCondition(f, "info-source", "source4", Source4)
     rvle.setBooleanCondition(f, "Network", "Layer1", 1)
     rvle.setBooleanCondition(f, "Network", "Layer2", 1)
     rvle.setBooleanCondition(f, "Network", "Layer3", 1)
     rvle.setBooleanCondition(f, "Network", "Layer4", 1)
     rvle.setBooleanCondition(f, "Network", "Layer5", 1)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop","complexity_content",2)
     rvle.setIntegerCondition(f, "MessagePsyop", "A_Curiosity", 8)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop", "clarity_content", 8)
     rvle.setIntegerCondition(f, "MessagePsyop", "F_Message", 10)
     rvle.setIntegerCondition(f, "MessagePsyop", "#_arg", 7)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop","highlighting_theme",8)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop","LegibilitySupport",8)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop", "TypeDiscourse", 2)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop", "ArgumentQuality", 8)
     rvle.setIntegerCondition(f,"MessagePsyop", "ExpertiseSource", 9)

res=rvle.run(f)

final<-  read.csv(file="exp_FinalView.dat",  skip=3,  header=F,  sep="",
dec = ".", col.names=c("ID","ACCEPT","OPINION"))
row.has.na <- apply(final, 1, function(x){any(is.na(x))})
final <- final[!row.has.na,]
FinSim1 <- final[unique(final$ID),]

init<- read.csv(file="exp_InitView.dat", skip=3, header=F, sep="", dec
= ".", col.names=c("ID","ATTEINT","OPINION"))
row.has.na <- apply(init, 1, function(x){any(is.na(x))})
init <- init[!row.has.na,]
```

```
    Node_ACCEPT<-length(FinSim1$ID)
    Node_ATTEINT<-length(init$ATTEINT)
    Opinion_Average<- mean(FinSim1$OPINION)
    Opinion_Average <- as.integer(Opinion_Average)

Fin<-data.frame(Source1,  Source2,  Source3,  Source4,  Node_ATTEINT,
Node_ACCEPT, Opinion_Average)
if(k == 1  )
{
    write.table(Fin,"Data_sicomores_info_sources.csv",    append=TRUE
    ,row.names=FALSE, col.names = TRUE, sep=",")
}
else
{
    write.table(Fin,"Data_sicomores_info_sources.csv",   append=TRUE,
    col.names=FALSE, sep=",", row.names=FALSE)
}
}
#######################################################################
```

A.3. Affichage de résultats sous forme de Pie chart sous R

```
# Affichage de l'opinion sous forme de Pie chart

op1 <- length(attributs$opinion[attributs$opinion <4])
op2 <- length(attributs$opinion[attributs$opinion < 7])
op2 <- setdiff(op2, op1)
op3 <- length(attributs$opinion[attributs$opinion >= 7])

titre <-"Pie Chart of initial opinion"
opinion=c(op1, op2, op3)
lbls <- c("opinion [1, 4[\n", "opinion [4, 7[\n", "opinion [7, 10]\n")
pct <- round(opinion/sum(opinion)*100)
lbls <- paste(lbls,pct) # add percents to labels
lbls <- paste(lbls,"%",sep="") # ad % to labels
x11()
outfile <- tempfile(fileext='.png')

# Generate the PNG
png(outfile, width=480, height=400)
pie(opinion, labels = lbls, col=rainbow(length(lbls)), main= titre)

dev.off()

#######################################################################
```

Annexe B : Exemple d'un algorithme de génération de la population

Dans le cadre du projet SICOMORES, les auteurs du (Forestier, Bergier et al. 2015) ont proposé des algorithmes pour la génération d'une population réaliste. Ci-dessous un exemple d'algorithme implémenté dans notre maquette de simulation pour la génération de la dimension familiale en se basant sur des caractéristiques démographiques et socio-culturelles d'une zone sub-saharienne.

```
Algorithme GenerationDimensionFamiliale(int nbIndividus)

    int perSeules := nombre de personnes seules dans le groupement
    int proportionFamilleNucléaire := proportion de familles
    nucléaires dans le groupement
    int proportionFamilleEtendue := proportion de familles étendues
    dans le groupement
    int proportionFamilleElargie := proportion de familles élargies
    dans le groupement
    int proportionMatri := proportion de familles matrimoniales dans
    le groupe
    int proportionPoly := proportion de familles polygames dans le
    groupe
  Tant que ((nombre de personne ∈ une famille - perSeules) > 0) Faire
     String ethnie := choix de l'ethnie, langue := choix de la
    langue, religion := choix de la religion.
     Si (proportion de familles matriarcales < proportionMatri) Alors
          booléen matri := true
     Sinon Si (proportion de familles polygames < proportionMatri) Alors
          booléen poly := true
     Fin si
    // on construit les familles
     Si (proportionFamilleNucléaire < nombre de familles nucléaires) Alors
          GenerationFamilleNucleaire(g, ethnie, religion, langue,
          matri, booléen polygame)
    Sinon si (proportionFamilleEtendue < nombre de familles étendues) Alors
          GenerationFamilleEtendue(g, ethnie, religion, langue,
          matri, polygame)
    Sinon si (proportionFamilleElargie < nombre de familles élargie) Alors
          GenerationFamilleEtendue(g, ethnie, religion, langue,
          matri, polygame)
    Fin si
  Fin tant que
    // on génère les personnes seules
  Pour (toutes les personnes seules) Faire
          int sexe := nombre aléatoire entre 1 et 2, age := nombre
          aléatoire entre 1 et 3
          String ethnie := choix de l'ethnie, langue := choix de la
          langue, religion := choix de la religion
          nœud personneSeule = setAttributs(sexe, age, chefFamille,
          individu, ethnie, religion, langue)
  Fin Pour

Fin algorithme
```

Annexe C : Simulateur abstrait DEVS

C.1. Simulateur abstrait pour un modèle DEVS atomique

Nous présentons ici la description sous forme de pseudo code de l'algorithme du simulateur d'un modèle atomique proposé par B. Zeigler dans (Zeigler, Praehofer et al. 2000).

DEBUT simulateur devs

```
DEBUT déclation variables
      Parent      // le coordinateur
      S           // l'ensemble des états
      Tl          // la date d'entrée dans l'état « s »
      tn          // la date du prochain événement
      DEVS        // le nom du modèle DEVS associé au simulateur
      e           // le temps passé dans l'état « s »
      y           // la valeur courante de sortie du modèle
FIN declaration variables

QUAND réception d'un événement d'initialisation (i,t) au temps t
      tl = t
      tn = tl+ta(s)
FIN QUAND

QUAND réception d'un événement de transition interne (*, t)
      SI t = tn ALORS
            y = λ(s)
            Envoyer au parent l'événement de sortie (y,t)
            s = δint(s)
            tl =t
            tn = tl+ta(s)
      FIN SI
      SINON
            Erreur: mauvaise synchronisation
FIN QUAND

QUAND réception d'un événement de transition externe: (x,t)
      SI (tl<=t<=tn) ALORS
            e = t-tl
            s= δext(s,e,x)
            tl=t
            tn = tl+ta(s)
      FIN SI
      SINON
            Erreur : mauvaise synchronisation
FIN QUAND
```

FIN Simulateur DEVS

C.2. Simulateur abstrait pour un modèle DEVS couplé

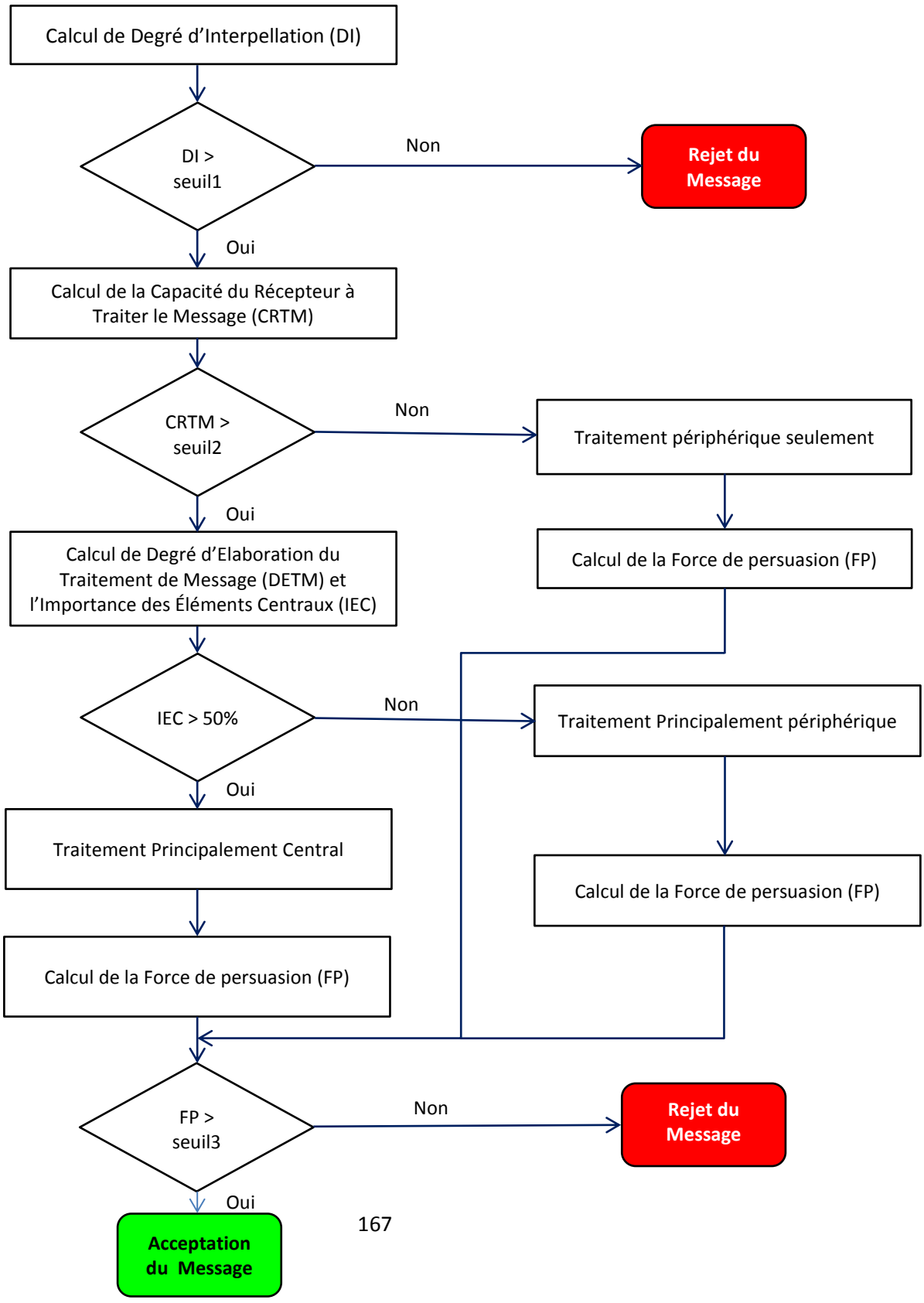
Nous présentons le simulateur abstrait d'un coordinateur DEVS. Ce simulateur correspond au modèle DEVS couplé. Les composants coordinateurs sont en charge de l'échange synchronisé des messages entre les simulateurs. Les coordinateurs maintiennent un échéancier contenant les événements planifiés pour leurs successeurs. Les événements sont représentés par une date, une valeur et par un simulateur destinataire.

```
Devs-Coordinator
    variables
          parent        //parent coordinator
          tl            // time of last event
          tn            // time of next event
          DEVN          // Associated network
          event-list    //ordered list of events
          d*            // Selected imminent child
    when receive imessage (i,t) at time t
          for each d in D do
                send i-message to child d
          end for
          sort event list
          tl = max(tld|d in D)
          tn = min(tnd|d in D)
    when receive *message (*,t) at time t
          if t ≠ tn then
                error: bad synchronization
          end if
          d*= first(event-list)
          send *-message to d*
          sort event-list according to tn_d and Select
          tl =t
          tn = min {tn_d | d in D}
    when receive Xmessage (x,t) at time t
           if not (tl<= t <=tn) then
                error: bad synchronization
           end if
          // consult external input coupling to get children
          // influenced by the input
           receivers={r|r in D, N in I_r, Z_N,r(x) not empty set}
           for each r in receivers
                send Xmessage (x_r,t) with input value x_r=ZN,r(x) to r
           end for
           sort event-list according to tn_d and Select
           tl=t
           tn = min {tn_d | d in D}
    when receives Ymessage (yd*, t) with output y_d* from d*
           // check external coupling to see if there is an external
           // output event
           if d* in I_N and Z_d*,N(y_d*) not empty set then
           Send Ymessage with value yN = Zd*,N(yd*) to parent
           // check internal coupling to get chidren influenced by
           // output y_d* of d*
           receivers={r|r in D, d* in I_r, Z_d*,r(y_d*) not empty set}
           for each r in receivers
                send Xmessages with input value x_r=Z_d*,r(y_d*) to r

End DEVS coordinator
```

Annexe D : Processus de persuasion en se basant sur le modèle E.L.M

Le Processus du traitement cognitif d'un message adopté dans le cadre du projet SICOMORES est basé sur le modèle E.LM. Le processus de communication persuasive d'une force militaire aux civils locaux: est détaillé dans (Bergier and Faucher 2016). Ci-dessous l'organigramme du modèle de traitement du message par les récepteurs d'un produit PsyOp implémenté dans notre maquette de simulation.



Contribution à une Architecture de Modélisation et de Simulation à Evénements Discrets : Application à la Propagation d'Information dans les Réseaux Sociaux..

Résumé étendu:

La diffusion d'information est définie comme le processus de communication par lequel une idée ou une information se propage dans une population et qui peut impacter le comportement des individus. L'interaction sociale joue un rôle important dans l'étude de la propagation de l'information, l'innovation, les idées, et de l'influence au sein de ses membres. Quand un événement d'information apparaît, il peut soit disparaitre rapidement ou fait des percées importantes dans une population. Les interactions pourraient être faites par la proximité des contacts physiques, la collaboration à distance, les réunions sociales et certaines formes de communication verbale ou écrite en fonction des situations. Les institutions, tout comme les entreprises, cherchent à comprendre et à prévoir l'impact de la propagation d'information sur les individus. Une approche de modélisation et simulation permet de mieux comprendre ce processus social et de répondre à ces questions. La modélisation et la simulation à base d'agents offre une approche puissante pour modéliser un tel processus social. Toutefois, les modèles actuels simplifient fortement les facteurs culturels et informations représentées dans le modèle ainsi que les différents liens interconnectant les individus. Ces éléments sont centraux et déterminants pour le processus de propagation.

Afin d'améliorer les modèles de propagation, nous explorons dans ce mémoire une représentation de la population plus réaliste. Nous proposons une architecture de modélisation et simulation permettant de simuler les phénomènes de propagation au sein des réseaux sociaux multiplexes et dynamiques basée sur le formalisme DEVS. L'exploration par simulation des paramètres du modèle de propagation permet de mieux comprendre le phénomène de propagation d'information et de remettre en cause certaines attentes des entreprises ou des institutions. Nous intéressons aussi à la formalisation du comportement des individus afin de simuler l'évolution et la dynamique de leurs attitudes. Les contributions apportées par nos travaux sont les suivantes :

- Un logiciel de la génération d'une population en se basant sur des données démographiques et socio-culturelles d'une zone désignée.
- Une méthode pour la formalisation d'un réseau multicouche basée sur le formalisme DEVS.
- Un modèle « centré-individu » pour prévoir la diffusion de l'information dans les réseaux sociaux.

- Une maquette de simulation permettant la modélisation, la simulation et l'analyse des phénomènes de propagation au sein d'un réseau social dynamique et multiplexe.

Extended Abstract :

Diffusion of information is defined as the communication process by which an idea or information spreads within a social system and it can impact the behaviour of individuals. Social interaction plays an important role in studying the propagation of information, innovation, ideas, and influence among its members. When an informational event appears it can either die out quickly or makes significant inroads into a population. The interactions could be done by physical proximity contact, remote collaboration, any types of social meetings and some forms of verbal or written communication depending on the situations. Institutions and firms search to understand and predict the impact of information propagation on individuals. Agent-based modelling is a powerful approach for studying such a collective process. However, existing models oversimplify adopters' cultural attributes, different type of link and information content, despite the evidence of their central role in diffusion process.

In this dissertation, we challenge the feasibility and utility of a more realistic representation of population. We use the DEVS formalism, extended by DS-DEVS and PDEVS in order to set to simulate the propagation phenomena within a multi-layer social network (MSN). The exploration of the propagation model parameters by the simulation allows a better understand of the propagation phenomenon and to challenge certain expectations of companies and institutions. We are also interested in formalizing the behaviour of individuals in order to simulate the evolution and dynamics of their attitudes. The contributions of our work are:

• Software to generate a realistic population based on demographic and socio-cultural characteristics in a designated area.

• Method for the formalization of a multi-layer network using the formalism DEVS.

• An "individual-centered" model to predict the spread of information in social networks.

• Simulation framework for modelling, simulation and analysis of the propagation phenomena in a multiplex social network.

Discipline, Spécialité : Ingénierie de Production, Informatique, Intelligence Artificielle

Mots clés : Modélisation formelle, Multi-modélisation, Simulation, DEVS, Evènements discrets, propagation d'information, Réseau Social.

Keywords : Formel modelling, multi-modelling, simulation, DEVS formalism, discrete events, diffusion process, information propagation, social network.