

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE - PARIS VI

Spécialité Informatique

# Vers une modélisation plus réaliste de la diffusion d'innovations à l'aide de la simulation multi-agents

Thèse présentée devant

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE - PARIS VI

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

par

**Samuel THIRIOT**

Soutenue le 9 avril 2009 devant le jury composé de

Guillaume DEFFUANT	Directeur de recherches, CEMAGREF - LISC <i>Rapporteur</i>
Alexis DROGOUL	Directeur de recherches, IRD - UMMISCO <i>Rapporteur</i>
Jean-François PERROT	Professeur émérite, Université Paris VI - LIP6 <i>Examineur</i>
Jean-Daniel ZUCKER	Directeur de recherches, IRD - UMMISCO <i>Examineur</i>
Amal EL FALLAH SEGHROUCHNI	Professeur, Université Paris VI - LIP6 <i>Directrice de thèse</i>
Jean-Daniel KANT	Maître de conférences, Université Paris VI - LIP6 <i>Encadrant</i>



*Trois nouvelles vies sont apparues pendant cette thèse : Jade, Ethan, et Naël.  
Ils méritent que l'on comprenne mieux le monde pour le leur rendre plus beau...*



# Résumé

La diffusion d'innovations est définie comme le processus de communication par lequel une idée, pratique, ou produit perçu comme nouveau se propage dans une population. Une innovation peut être une solution contraceptive, la décontamination de l'eau, ou l'achat de téléphones à l'ergonomie novatrice. Les institutions, tout comme les entreprises, cherchent à comprendre et prévoir le succès ou l'échec d'une innovation ; elles espèrent aussi faciliter sa diffusion à moindre coût, notamment en facilitant le bouche à oreille. Une approche de modélisation-simulation permet de mieux comprendre ce processus social et de répondre à ces questions. La simulation multi-agents offre une approche puissante pour modéliser un tel processus social. Toutefois, les modèles actuels simplifient fortement les croyances et informations représentées dans le modèle ; ces éléments sont pourtant reconnus comme centraux dans le processus de diffusion, puisqu'ils expliquent le succès ou l'échec de la diffusion, et constituent des variables décisionnelles de l'institution.

Afin d'améliorer la descriptivité et l'utilité potentielle d'un modèle de diffusion d'innovations, nous explorons dans cette thèse une représentation des croyances plus réaliste. Le modèle se doit néanmoins de demeurer assez simple pour être paramétré et comparé à des diffusions réelles. Nous proposons de représenter les croyances des adoptants potentiels sous forme de réseaux associatifs, et définissons les mécanismes de manipulation de croyances adaptés. Un protocole d'entretien est proposé, qui rend le modèle paramétrable et validable. Le protocole de communication décrit la recherche et l'émission motivée de ces croyances sur des objets sociaux. L'exploration par simulation des paramètres du modèle permet notamment de mieux comprendre l'importance de la recherche d'information dans la dynamique d'information, et de remettre en cause certaines attentes du marketing viral. Le modèle développé exhibe un gain en descriptivité important, permettant notamment de décrire le marketing événementiel ou l'échec de la diffusion d'innovation dû à l'incompréhension des messages institutionnels.

Comme la plupart des modèles orientés agent, celui-ci s'avère extrêmement sensible à la structure des interactions ("réseau social") définie dans le modèle. Faute de structure d'interaction réaliste, aucune validation du modèle, ni prédiction sérieuse, ne peuvent être envisagées. Les réseaux sociaux sont généralement considérés comme non collectables à grande échelle. Nous soulignons l'existence de statistiques et d'observations qualitatives sur ces liens, et proposons de formaliser ces connaissances sous forme de réseau bayésien, ainsi qu'un algorithme générateur de réseaux d'interaction inspiré des théories actuelles sur les processus de sélection sociale. L'utilisabilité de ce générateur est illustrée par la génération d'un réseau d'interaction pour le Kenya rural, dans lequel est représentée la structure familiale, les liens entre collègues et amis, dans un environnement spatialisé. Ce générateur ouvre la voie à l'utilisation de réseaux d'interactions plus plausibles, susceptibles d'améliorer la descriptivité des modèles de phénomènes sociaux, diffusion d'innovations incluse.



# Abstract

Diffusion of innovations is defined as the communication process by which a new practice, idea or product spreads within a social system. For example, an innovation could be the adoption of a new contraceptive solution, practicing water boiling or buying new ergonomic handphones. Institutions and firms search to understand and predict whether their innovations will diffuse, in what extent, or fail. They are also interested in decreasing communication costs and attach an increasing interest in viral marketing. Agent-based modeling is a powerful approach for studying such a collective process. However, existing models oversimplify adopters' beliefs and information content, despite the evidence of their central role in diffusion. Indeed, beliefs and information content explain diffusion failure due to misunderstanding of institutional messages, and they constitute decisional variables of institutions.

In this thesis, we challenge the feasibility and utility of a more realistic representation of beliefs. Such a model should nevertheless remain simple enough to be parameterized, manipulated and validated against field data. We propose to represent adopters' beliefs as associative networks and define in what ways these beliefs are manipulated. We propose and test an interview protocol, which enables to parameterize and validate the model against real diffusion cases. We also define a communication protocol describing proactive communication and active information search. Associative networks improve the model's descriptivity, as illustrated by the simulations of event marketing, or of diffusion failure caused by information-beliefs inadequacy. The exploration of the model's parameter space highlights the importance of active search in information dynamics, and leads to question several expectations from viral marketing.

Our agent-based model, like most others, reveals a strong sensitivity to the interaction network (also called "social network"). As a consequence, the lack of descriptive large-scale networks forbids rigorous validation of agent-based models and limits their prediction potential. The wide use of trivial networks generators is justified by the untractability of data collection for large-scale networks. Hence, we highlight the existence of scattered statistics and qualitative knowledge about these networks, which may be used to constraint interaction graphs. We propose to formalize these statistics using Bayesian networks, and define an algorithm inspired by social choice theories. To illustrate this generator functionality, we create a large interaction network for rural Kenya in which family links, colleagues and friendships links are generated in a spatialized environment. This generator opens the way to an intuitive and low-cost generation of interaction networks, probably leading to more descriptive simulations of innovation diffusion and other social phenomena.



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Guillaume Deffuant pour avoir accepté de rapporter cette thèse. De la diversité et de la rigueur de ses nombreuses recherches, je n'ai vraiment étudié que ses travaux sur le projet IMAGES ; c'était déjà suffisant pour constituer un rare exemple de simulation sociale réellement ancrée sur le terrain, qui m'a servi de référence pendant ces recherches. Ses remarques mesurées, à l'issue d'une conférence, me furent plus précieuses que bien des commentaires laudatifs. Je lui suis redevable de nombreux éléments de cette thèse.

Alexis Drogoul, avant d'accepter de rapporter cette thèse, a imprégné ces trois années de recherches. Ses cours me firent découvrir la richesse du concept d'agent, ses questions devinrent des guides, son recul demeure un horizon à poursuivre. J'espère ne pas avoir trahi excessivement ses enseignements.

Je remercie Jean-François Perrot pour avoir accepté le rôle d'examineur pour cette thèse. L'expérience qu'il nous transmet à chaque présentation de ses travaux, la rigueur scientifique qui en rayonne, constituent une référence que je ne rêve pas d'égaliser dans ces recherches teintées de sciences humaines. Je remercie également Jean-Daniel Zucker d'offrir, par sa participation au jury, un avis éclairé par la pluridisciplinarité de ses recherches et son expérience en simulation basée agents. J'adresse ici mes plus vifs remerciements à ma directrice de thèse, Amal El Fallah Segrouchni, pour sa confiance et sa disponibilité pendant ces dernières années.

Je tiens à remercier chaleureusement Jean-Daniel Kant pour son encadrement pendant cette thèse. Il m'a transmis sa volonté de construire des modèles sociaux toujours plus descriptifs, m'a fait découvrir le fonctionnement de la recherche universitaire, et m'a soutenu avec patience dans mes errances de jeune chercheur. Tout en m'obligeant à justifier chacun de mes choix, il m'a offert l'inestimable liberté d'explorer des pistes de recherche hasardeuses. Mais avant tout, nos rencontres furent amicales autant que professionnelles.

Cette thèse a commencé par un peu de hasard et beaucoup de bonnes volontés : Jean-Daniel Kant, Alexis Drogoul, Thierry Bouron, Yann Renard et bien sûr Amal El Fallah-Segrouchni. Sans leur intervention, ce document n'existerait pas.

Cette thèse CIFRE<sup>1</sup> s'est déroulée dans le double cadre de l'entreprise France Télécom R&D Rennes, et du Laboratoire d'Informatique de Paris 6. J'ai trouvé dans chacune de ces structures un accueil chaleureux et un soutien essentiel. France Télécom, en plus de me donner des conditions de travail confortables, m'a offert des interactions enrichissantes avec des professionnels aux spécialités les plus variées. Le LIP6 a constitué pour moi une terre d'accueil riche dans sa diversité, qui a émaillé cette thèse de rencontres avec des chercheurs ouverts et pédagogues.

Au delà des structures anonymes, de nombreuses personnes m'ont aidé au-delà de ce que leurs fonctions exigeaient. Ce fut le cas de mes supérieurs hiérarchiques chez France Télécom R&D, Thierry Iafrate puis Virginie Nogré, qui m'ont par exemple permis de me rendre dans des conférences pour lesquelles ils n'avaient pas d'intérêt immédiat. Stéphanie Fray, en plus d'endosser à la volée le rôle de correspondant marketing de cette thèse, m'a amicalement conseillé sur les techniques d'entretien, et m'a guidé dans les réseaux sociaux de l'entreprise. Ricardo Pastrana-Vidal a joyeusement outrepassé ses prérogatives de collègue en me transmettant plétoire de judicieux conseils sur le déroulement d'une thèse. Brigitte Stroh-Goujard a accepté de consacrer une fraction de son budget pour financer des entretiens prospectifs, sans lesquels cette thèse serait demeurée déconnectée du terrain. Caroline Dubois m'a non seulement fait bénéficier de son expérience d'ergonome, mais m'a aussi orienté vers la psychologie sociale ; sans Moscovici, Tarde et Asch, j'aurais conservé une meilleure image de l'être humain, mais n'aurais pu faire aboutir ces recherches. Pierre-Henri Willemin a su m'expliquer clairement ce que je faisais en dilettante avec ses réseaux Bayésiens. Je tiens également à remercier Jacques Ferber pour ses commentaires enthousiastes lors d'une conférence ; mérités ou non, ses compliments insufflèrent un nouveau souffle dans l'isolement inévitable du processus de recherche.

Côté France Télécom, j'ai partagé avec bonheur trois ans de thèse avec Nicolas Ramin, grâce auquel la cigarette solitaire s'est transformée en agréables discussions, souvent en compagnie de Ricardo Pastrana-Vidal, Gaspard Breton, Eduardo Sanchez, Christophe Garcia et bien d'autres. Il était impossible de revenir au laboratoire de Paris sans joie, puisque j'y retrouvais l'équipe des doctorants parisiens, dont Daniel Domingue, Thomas Béline et Yasmine Charif. Zach Lewkovicz, en plus d'être d'excellente compagnie, a mis son anglais au service des corrections d'articles, et m'a offert de passionnantes discussions. Mes amis, et ma famille proche ou éloignée, ont fait preuve d'une patience louable pendant cette période autistique.

Je dois plus que des remerciements à mes parents, Patrick et Sylvie, qui m'ont donné goût à la lecture et à la découverte, ainsi qu'à mes soeurs Séverine et Sarah pour leur indispensable présence. Sans les patientes relectures de ma mère, ce document fourmillerait encore de fautes d'orthographe. J'ai enfin une pensée pour mon grand-père Jean, qui accumula toute sa vie de la connaissance, et n'eût que le temps de me transmettre la volonté d'en faire autant.

---

<sup>1</sup>Subvention ANRT (Agence Nationale pour la Recherche Technique) n°993/2005

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>1</b>
<b>I Modéliser la diffusion d’innovations : problématiques, constats et modèles</b>	<b>3</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>5</b>
1.1 Diffusion d’innovations . . . . .	5
1.2 Modéliser la diffusion d’innovations . . . . .	7
1.3 Décrire connaissances et croyances . . . . .	8
1.4 Plan du mémoire . . . . .	9
<b>2 Modélisation de dynamiques sociales</b>	<b>11</b>
2.1 Modéliser . . . . .	11
2.2 Modélisation basée agents . . . . .	16
2.3 Processus de modélisation . . . . .	22
2.4 Qu’est-ce qu’un “bon” modèle? . . . . .	26
2.5 Notre approche de modélisation . . . . .	31
<b>3 Observations sur la diffusion d’innovations</b>	<b>33</b>
3.1 Point de vue de l’institution . . . . .	35
3.2 Diffusion d’innovations : analyse macroscopique . . . . .	41
3.3 Comportement individuel . . . . .	45
3.4 Interactions . . . . .	51
3.5 Résumé . . . . .	61
<b>4 Modèles existants</b>	<b>63</b>
4.1 Modèle de Bass . . . . .	64
4.2 Modèles individu-centrés analogiques . . . . .	67
4.3 Modèle épidémique de la transmission d’information . . . . .	73
4.4 Modèles multi-agents évolués . . . . .	78
4.5 Discussion . . . . .	83

<b>II</b>	<b>Modèle CoBAN et générateur de réseaux d'interactions</b>	<b>89</b>
<b>5</b>	<b>Représentation des croyances</b>	<b>91</b>
5.1	Modèles de représentation des croyances . . . . .	93
5.2	Représentation des croyances dans CoBAN . . . . .	100
5.3	Activation des croyances dans CoBAN . . . . .	104
5.4	Révision des croyances dans CoBAN . . . . .	106
5.5	Indicateurs sur la connaissance . . . . .	113
5.6	Protocole de collecte . . . . .	114
5.7	Bilan . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Modèle de communication</b>	<b>125</b>
6.1	Éléments du modèle de communication . . . . .	125
6.2	Protocole de communication . . . . .	128
6.3	Comportement de communication d'un agent-adoptant . . . . .	132
6.4	Résumé . . . . .	138
<b>7</b>	<b>Expérimentations avec le modèle CoBAN</b>	<b>139</b>
7.1	Implémentation . . . . .	139
7.2	Expériences sur la dynamique d'information . . . . .	143
7.3	Adoption et segments . . . . .	159
7.4	Descriptivité de CoBAN . . . . .	184
7.5	Discussion sur les expérimentations . . . . .	188
<b>8</b>	<b>Réseaux d'interaction</b>	<b>193</b>
8.1	Modéliser les réseaux d'interaction . . . . .	193
8.2	Objet d'étude : que représente le réseau? . . . . .	194
8.3	Observations et modèles existants . . . . .	198
8.4	Modèle . . . . .	209
8.5	Réseaux générés . . . . .	222
8.6	Bilan . . . . .	226
<b>9</b>	<b>Discussion</b>	<b>231</b>
9.1	Bilan . . . . .	231
9.2	Apports pour la diffusion d'innovations . . . . .	234
9.3	Apports pour la simulation orientée agents . . . . .	235
9.4	Perspectives de recherche . . . . .	236
	<b>Bibliographie</b>	<b>243</b>

Première partie

**Modéliser la diffusion  
d'innovations :  
problématiques, constats et  
modèles**



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Diffusion d'innovations

En 1890, Gabriel Tarde écrit dans *Les lois de l'imitation* : “Pourquoi, parmi cent innovations diverses simultanément imaginées - qu’il s’agisse de formes verbales, d’idées mythologiques, ou de procédés industriels et autres - y en a-t-il dix qui se répandent dans le public à l’exemple de leurs auteurs, et quatre-vingt-dix qui restent dans l’oubli ? Voilà le problème.” [Tarde, 1895]. Soixante-dix ans plus tard, Everett M. Rogers synthétise dans *Diffusion of Innovations* [Rogers, 1962] plus de 200 études conduites indépendamment par la sociologie rurale, le marketing, la communication, la santé publique, la géographie et l’anthropologie. Il définit la **diffusion d’innovations** comme **le processus par lequel une nouvelle pratique, idée ou un nouveau produit se diffuse dans une société**. Pour Rogers comme pour Tarde, ce processus est la base même de l’évolution d’une société ; étudier la diffusion d’innovations, c’est étudier les mécanismes qui permettent à une société de se transformer. C’est aussi comprendre comment inciter une population à adopter une innovation dont l’avantage n’est pas immédiatement évident. Favoriser le tri sélectif, faire adopter le préservatif pour limiter les épidémies de VIH<sup>1</sup>, inciter au planning familial, autant d’exemples d’innovations qui prouvent la vaste portée de ce domaine. Les entreprises, qui cherchent quotidiennement à promouvoir de nouveaux produits, sont bien sûr concernées par cette démarche.

Du point de vue de l’institution qui cherche à la promouvoir, la diffusion d’une innovation est un processus de persuasion. Publicités et agents de changement permettent d’attirer l’attention sur l’innovation et de persuader l’adoptant potentiel de son intérêt. Si l’institution est convaincue de l’apport de l’innovation, la population la juge par le prisme de sa culture, de ses connaissances ou de ses motivations. Or, cette nouveauté remet en cause des connaissances ou pratiques préexistantes, provoquant des inquiétudes et des incertitudes dans la population visée. En quoi faire bouillir l’eau éviterait-il d’être malade ? (voir l’exemple ci-dessous). Pourquoi utiliser un moyen de contraception ? (*cf.* p. 33) N’est-ce pas dangereux pour la santé ? Le conjoint, la mère seront-ils d’accord ? En réaction à ces interrogations, l’être humain communique. Il demande l’avis des

---

<sup>1</sup>virus de l’immunodéficience humaine

proches ou des personnes mieux informées. Des enthousiastes ou des réfractaires transmettent leur point de vue. Les discussions informelles font parfois naître de véritables rumeurs, comme nous le verrons dans le cas de la pilule contraceptive en Kenya rural (3). Ces interactions permettent à la population de construire une représentation collective de l'innovation. Parfois déformée ou fautive, cette représentation subjective de l'innovation servira de base à son évaluation et à son adoption - ou à son rejet.

Quel que soit son apport réel, une innovation se diffuse lentement dans une population. Une innovation au bénéfice indéniable peut n'être jamais adoptée par la population, ou être adoptée pour de mauvaises raisons. Un exemple édifiant est rapporté par Rogers [Rogers, 2003, pp. 1-5] : le refus d'un village péruvien de faire bouillir l'eau avant consommation [Wellin, 1955], malgré l'avantage indéniable de cette pratique (éviter les épidémies) et son coût négligeable.

#### **Faire bouillir l'eau : un cas d'échec de diffusion d'innovation**

Le village péruvien de Los Molinas, situé sur la région côtière du Pérou, connaît au début du XX<sup>ème</sup> siècle les mêmes problèmes sanitaires que l'ensemble du pays. Les trois sources dans lesquelles est puisée l'eau par des bidons, seaux, gourdes ou tonneaux sont polluées et contaminées. Les paysans à peine sortis du dispensaire reviennent se faire soigner de la fièvre typhoïde ou d'autres maladies. Parmi les nombreuses actions lancées par les autorités sanitaires pour améliorer cette situation, la mesure phare est d'inciter la population à faire bouillir l'eau avant consommation. Une campagne de deux ans est lancée, appuyée localement par une infirmière, et accompagnée par plusieurs conférences d'un médecin. Étant donné les avantages indéniables de cette technique (éviter la maladie et gagner en durée de vie), le coût raisonnable de la pratique (faire bouillir une bonne quantité d'eau le matin), et l'importance des moyens mis en oeuvre pour convaincre la population, l'adoption de cette pratique semblait inévitable. Pourtant, après deux ans de campagne, seuls onze des deux cents foyers du village font bouillir l'eau utilisée pour leur consommation.

Pour expliquer cet échec, il faut prendre conscience de la somme de connaissances nécessaires à la compréhension de cette innovation. Cette eau contient des microbes, dit-on aux villageois. Mais comment pourrait-elle contenir quelque chose, si on ne voit rien ? Si ces choses sont si petites, comment pourraient-elles faire du mal ? Les fourmis sont très petites, et sont sans danger. Et en quoi faire bouillir l'eau ferait-il disparaître ces choses que l'on ne voit même pas ?

Par ailleurs, le système de croyances local attribue une température particulière aux aliments, indépendamment de leur température réelle. Cette température définit des régimes alimentaires adaptés à la grossesse, à l'allaitement ou à la maladie. Un malade ne doit pas consommer d'aliments à une température extrême ; il ne mangera donc pas de porc (très froid) et ne boira pas de brandy (très chaud). D'ailleurs, l'une des rares femmes à faire bouillir l'eau souffre de sinusite chronique ; dans le village, on l'appelle "la malade". Elle a adopté l'innovation, car l'eau bouillie correspond à son état. Pour les autres villageois, il est inconcevable de boire de l'eau tiédie si l'on n'est pas malade. Seuls les malades, ou

ceux qui sont déjà dissociés des réseaux sociaux - comme les foyers récemment immigrés - se risqueront à bouillir l'eau avant de la boire.

L'essence de la recherche en diffusion d'innovations, telle que conceptualisée par Rogers, est de **comprendre pourquoi, et comment, une innovation parvient ou non à se diffuser**. En comprenant ce processus, on pourrait éviter les échecs et faciliter la diffusion de nouvelles idées, pratiques et produits. Rogers synthétise les observations de nombreuses études indépendantes dans une même analyse. La diffusion d'une innovation est fondamentalement un processus de communication, qui permet aux adoptants potentiels de réduire l'incertitude sur cette innovation ; ils recherchent de l'information pour mieux la comprendre et réduire leurs craintes. Rogers identifie plusieurs facteurs explicatifs du succès ou de l'échec d'une innovation. Celle-ci doit (notamment) être *comprise* pour que ses bénéfices soient perçus. Elle doit être compatible avec les croyances, les motivations et les besoins des adoptants potentiels ; elle doit aussi s'accommoder des normes du système social. Rogers décrit le processus comportemental qui conduit un individu de la connaissance de l'innovation à la persuasion, puis éventuellement à l'adoption ou au rejet de cette innovation. Ces observations demeurent essentiellement discursives ; elles permettent de mieux comprendre le processus et les échecs de diffusion, sans toutefois permettre de les reproduire ni de les anticiper. C'est pourquoi cette problématique est aujourd'hui abordée avec une approche de modélisation.

## 1.2 Modéliser la diffusion d'innovations

Modéliser, c'est construire une représentation simplifiée du monde pour satisfaire un but. Un bon modèle est un modèle utile, en ce qu'il permet de mieux comprendre un processus, de confirmer des hypothèses sur les causes d'un phénomène, ou même de prévoir une dynamique future. Un modèle computationnel (informatique) permet de *simuler* un processus complexe, comme on simule l'évolution météorologique à l'échelle du globe. La simulation orientée agents est une approche de modélisation récente, qui propose de représenter explicitement le comportement des individus, leurs interactions, et de simuler la dynamique collective issue de ces processus locaux. Cette approche s'avère donc pertinente pour étudier le processus social qu'est la diffusion d'innovations. Plusieurs modèles orientés agents ont été développés pour étudier la diffusion d'innovations. Ils étudient la propagation d'information dans un système social, la pression sociale, ou encore la dynamique d'opinions. Chacun a fait progresser nos connaissances sur ce processus, et a satisfait les buts propres de ses créateurs.

Pour une institution, le modèle idéal décrirait une société artificielle réagissant de la même façon qu'une société réelle. On pourrait le paramétrer avec les connaissances disponibles sur la population, et l'utiliser comme laboratoire pour tester différents scénarios. Il accepterait donc les différentes variables décisionnelles de l'institution - caractéristiques de l'innovation, contenu des messages promotionnels envoyés par l'institution dans la population - et simulerait la réaction de cette population : adoption ou

rejet, vitesse de diffusion, etc. Un tel modèle serait descriptif des réactions individuelles et des interactions sociales ; il devrait avoir été validé sur de nombreux cas de diffusion pour vérifier sa descriptivité. Ce modèle idéal constitue à l'heure actuelle un objectif lointain. Nous sommes aujourd'hui dans la même situation que la météorologie à ses débuts : nous disposons d'outils puissants, de quelques connaissances sur les processus qui sous-tendent le phénomène, mais n'avons pas abouti à un modèle descriptif ni prédictif. Nous ne pouvons qu'espérer faire un pas supplémentaire en sa direction.

Cette progression nécessite entre autres la **prise en compte des variables décisionnelles de l'institution** (afin qu'elle puisse tester différentes actions), **l'amélioration de la descriptivité du modèle** (afin que les réactions de la population soient plausibles), et la **possibilité de paramétrer et de comparer le modèle sur des données réelles** (afin de pouvoir évaluer sa descriptivité et le valider). La diffusion d'innovations est un processus social compliqué qui fait intervenir une multitude de sous-modèles décrivant la communication, la structure d'interactions, le jugement et la décision, les motivations, etc. Progresser sur l'une de ces composantes constitue en soi un apport pour la diffusion d'innovations. Rogers propose des thèmes de recherche qui lui semblent essentiels. Il insiste sur la nécessité d'étudier les échecs de diffusion d'innovations, afin d'en comprendre les causes et de les prévenir. Il souligne le manque de connaissances sur la structure des interactions dans la population, qui s'avère déterminante dans le phénomène de diffusion. Depuis quelques années, les entreprises se penchent également sur les processus collectifs. Le marketing viral espère assurer à bas coût la promotion de nouveaux produits et services par le bouche à oreille. Celui-ci peut d'ailleurs altérer ou construire une image de marque ou de produit. Les effets de mode sont toujours plus présents dans les sociétés de consommation. Ces problématiques sont compatibles, et souvent similaires, à celles du domaine plus général de la diffusion d'innovations.

### 1.3 Objectif : décrire la communication et les croyances liés aux innovations

Un examen attentif des observations de Rogers, d'études de diffusion de terrain, mais aussi du marketing, révèle le rôle crucial des croyances et de la communication dans le processus de diffusion. La curiosité des adoptants potentiels est attirée, ou non, par le *contenu du message institutionnel*. A l'instar des habitants de Los Molinas, les adoptants potentiels ne comprennent pas toujours l'intérêt d'une innovation, par manque de *connaissances*. C'est d'ailleurs pour compléter ces connaissances, et *vérifier leurs croyances*, que les adoptants recherchent de l'information. La diffusion de la seconde génération d'une innovation est plus rapide, car les *croyances préalables* qui devaient être modifiées l'ont été par la première génération. Les adoptants peuvent être différenciés par segments, qui exigent des informations plus ou moins crédibles pour adopter ; le bouche à oreille est d'ailleurs un facteur puissant parce qu'il permet de récupérer des *informations à la crédibilité élevée*. D'ailleurs, le bouche à oreille est fondamentalement un processus de transmission d'information.

Les croyances et les messages constituent donc à la fois des facteurs explicatifs du succès ou de l'échec d'une innovation, ainsi que des variables décisionnelles de l'institution. Or, l'étude des modèles existants, computationnels ou non, révèle une simplification importante de ces processus. La communication est souvent considérée comme un processus épidémique, dans lequel la recherche d'information est négligée. Les modèles orientés agents simplifient généralement les croyances sous forme de quelques variables, qui peuvent difficilement être rattachées aux croyances complexes, subjectives, observées sur le terrain. Cette simplification sur un point estimé aussi important dans le phénomène réel nous a conduits à **décrire de façon plus réaliste les croyances et leur communication dans la diffusion d'innovations.**

Cette problématique soulève de nombreuses questions auxquelles nous chercherons à répondre dans cette thèse. Comment représenter les croyances de façon plus réaliste, tout en conservant un modèle lisible et paramétrable ? Comment les manipuler, et comment décrire leur communication par bouche à oreille ? Quels outils doit-on développer pour collecter ces croyances sur le terrain, de façon à paramétrer et valider un tel modèle ? Comment observer une dynamique d'information quand cette information est représentée avec un niveau de détail élevé ? Avant toute chose, une description plus réaliste des croyances et de la communication permet-elle d'élargir le champ des phénomènes descriptibles ? Permet-elle de mieux reproduire les observations de terrain ? Peut-elle nous aider à générer de la connaissance pour la diffusion d'innovations et le marketing ?

## 1.4 Plan du mémoire

Dans le **chapitre 2**, nous revenons sur le **processus de modélisation**, et résumons les règles méthodologiques identifiées en simulation orientée agents. Notre travail de modélisation s'appuiera non seulement sur les observations de diffusion d'innovation, mais aussi d'autres domaines comme la psychologie sociale ou le marketing. Les **faits stylisés** que nous nous attacherons à reproduire sont identifiés dans ces domaines au **chapitre 3**. Le **chapitre 4** dresse une analyse des apports et limites des **modèles existants**. Les **chapitres 5 et 6** décrivent respectivement la **représentation des croyances et le modèle de communication** adapté. Nous verrons qu'une représentation des croyances sous forme de réseau associatif permet de décrire des phénomènes au niveau individuel, tels que la compréhension ou la l'incompréhension, la recherche motivée d'information, ainsi que certaines des heuristiques utilisées par les adoptants pour évaluer une innovation. Nous testerons également une méthodologie d'entretien permettant de collecter des croyances réelles chez des adoptants. Le modèle de communication décrit la communication motivée de croyances sur des objets sociaux. Le chapitre 7 propose les principaux résultats d'expérimentation. La recherche active d'information se révélera jouer un rôle très différent de l'émission proactive, remettant en question la plausibilité de l'approche épidémique de l'information. Nous constaterons que le modèle permet de décrire l'échec d'une diffusion par manque de compréhension, le marketing événementiel ou la

diffusion d'innovations liées. Ces expérimentations nous mèneront à questionner quelques éléments de l'état de l'art, comme les promesses du marketing viral, ou la segmentation des adoptants par leur innovativité proposée par Rogers.

Notre modèle se révélera très sensible au “réseau social” utilisé pour décrire les interactions au sein de la population. Un constat similaire est d'ailleurs dressé pour la plupart des simulations individu-centrées. Faute d'une structure descriptive des interactions dans de grandes populations, l'espoir de développer un jour un modèle descriptif ou prédictif de dynamiques sociales à grande échelle semble vain. Dans le **chapitre 8**, nous reprendrons cette problématique à ses racines, en traitant la **génération de réseaux d'interaction** comme un problème de modélisation. Nous montrerons qu'il existe un grand nombre de données sur les interactions au sein d'une population, disponibles sous forme de statistiques éparses et d'observations qualitatives. Nous envisagerons une formalisation de ces diverses données sous la forme unique de réseaux Bayésiens, et proposerons un générateur de réseaux inspiré des processus de formation des liens sociaux. Nous illustrerons le fonctionnement de ce générateur en décrivant la structure d'interactions dans le Kenya rural, telle qu'elle est décrite par les études de terrain sur la pilule contraceptive. Dans le réseau généré, chaque agent est positionné dans son environnement familial, professionnel et géographique en fonction de ses caractéristiques socio-démographiques.

Comme nous le discuterons dans le **chapitre 9**, une représentation des croyances plus détaillée élargit le spectre des phénomènes descriptibles. Elle permet de mieux tenir compte des stratégies mises en oeuvre par l'institution pour promouvoir son innovation. Elle décrit l'altération de la dynamique de diffusion due à l'incompréhension, à l'existence de croyances préalables ou à la nature privée d'une innovation. Le protocole de collecte de données, associé au générateur de réseaux d'interactions, permet de limiter la distance entre modèle et terrain. Le processus de modélisation nous a permis de générer de la connaissance pour la diffusion d'innovations et le marketing, tandis que le générateur de réseaux d'interactions pourrait intéresser le domaine de la simulation orientée agents. Nous ne pouvons toutefois prétendre, en trois ans de recherches, finaliser un modèle impliquant de nombreux facteurs individuels et humains; ce premier pas nécessite maintenant un travail pluridisciplinaire de terrain, dans le double objectif de confirmer certaines composantes du modèle et de rapporter le modèle à des cas de diffusion réels.

## Chapitre 2

# Modélisation de dynamiques sociales

We all know that Art is not truth.  
Art is a lie that makes us realize  
truth, at least the truth that is  
given us to understand.

---

Pablo Picasso

### 2.1 Modéliser

#### 2.1.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

Un modèle est *une simplification du monde réalisée dans un objectif précis*. Avant d'être un domaine scientifique, la modélisation est un processus que chacun utilise quotidiennement. Nos décisions et actions reposent, non sur le monde réel, mais sur des modèles mentaux de ce monde basées sur notre compréhension de notre environnement (voir par exemple [Johnson-Laird, 1980, Johnson-Laird *et al.*, 1996]). En planifiant votre itinéraire en voiture, vous utilisez un modèle mental qui rassemble le plan de la ville, les sens de circulation des rues, l'existence des travaux temporaires et la charge habituelle de chaque route. Ces modèles mentaux sont individuels, approximatifs et inconscients. Ils sont très puissants pour permettre à un individu de résoudre ses problèmes quotidiens, mais ne conduisent pas à des connaissances objectives vérifiables sur le monde.

Le processus de modélisation dans la recherche est représentatif de la démarche scientifique. Il s'agit de ramener toute connaissance à l'explicite, en utilisant (et/ou en aboutissant à) un modèle explicite d'un système ou phénomène réel. Marvin Minsky définit ainsi un modèle : *“To an observer B, an object A\* is a model of an object A to the extent that B can use A\* to answer questions that interest him about A”* [Minsky, 1965]. Un modèle est donc une abstraction qui permet de répondre à des questions sur l'objet réel. Cet objet peut être un processus (la perception d'informations), un système (système

social ou mécanique) ou un phénomène (ségrégation urbaine). Lorsque l'on construit cette abstraction  $A^*$ , il faut définir la *frontière du modèle* de façon à détailler suffisamment  $A^*$  pour répondre aux questions posées sur  $A$ , tout en évitant une description trop détaillée qui limiterait la manipulation du modèle et irait finalement à l'encontre de l'objectif du modélisateur (voir 2.4.5). Le modèle demeurant une construction réalisée dans un objectif précis, il existe potentiellement une infinité de modèles  $A^*$  d'un même phénomène  $A$ . Par exemple, pour prédire le déplacement d'un objet sur un référentiel terrestre, la mécanique Newtonnienne est pertinente ; par contre, l'astrophysique repose sur la théorie de la relativité. La lumière est étudiée comme particule ou comme onde, deux constructions qui permettent de décrire son comportement dans des conditions précises. Tout comme le dit Pablo Picasso à propos de l'Art, un modèle n'est pas la réalité ; il est juste une construction qui nous permet de comprendre la réalité, ou plutôt la réalité qu'il nous est offert de comprendre.

Les modèles **descriptifs, explicatifs et prédictifs** [Edmonds, 2005b, Bulle, 2005] diffèrent par le but du modélisateur et la question posée au modèle. Un *modèle descriptif* vise à décrire et parfois reproduire le phénomène observé. La question posée est "Comment ?". Dans le cas de la diffusion d'innovations, n'importe quel modèle apte à reproduire une courbe en "S" décrit *comment* une innovation est adoptée dans le temps. Un *modèle explicatif* cherche à comprendre *pourquoi* ce phénomène se produit ainsi, en dégagant des *facteurs explicatifs*. Un modèle qui tient compte des interactions sociales faisant émerger la courbe en "S" est potentiellement explicatif. Un modèle explicatif est nécessairement, dans une certaine mesure, descriptif ; s'il s'avérait incapable de décrire le résultat du processus, il ne pourrait être dit explicatif de ce processus.

Un modèle suffisamment descriptif peut potentiellement devenir *prédictif*. Il devient alors apte à prédire le comportement du système dans un cas donné, répondant à la question "Quel sera... ?". S'il inclut les variables décisionnelles, il peut devenir un outil d'aide à la décision. En diffusion d'innovations, les variables décisionnelles comprennent les paramètres de l'innovation elle-même, ainsi que les efforts de communication de l'institution. Un *modèle normatif* donne des indications sur la meilleure façon d'agir ("Comment faire pour que... ?"). Un modèle normatif n'est pas nécessairement prédictif ou descriptif ; il peut simplement reproduire certains aspects qualitatifs du phénomène réel [Mahajan *et al.*, 2000]. En diffusion d'innovations, un modèle normatif expliquera comment mieux faciliter la diffusion d'une innovation. Parmi les modèles normatifs qui se sont révélés utiles pour la collectivité, on compte les modèles épidémiologiques ou encore les modèles de trafic [Axtell, 2006].

Notons que l'observateur  $B$  qui utilise le modèle  $A^*$  n'est pas nécessairement le modélisateur. On peut définir une notion de "client" du modèle [Ferrand, 2006] [Haradji *et al.*, 2004]. Le modèle doit être adapté à ce "client final", notamment en terme de lisibilité et de manipulabilité. Utilisé pour la prédiction ou pour émettre des recommandations, le modèle s'adresse davantage à des décideurs. Quand l'objectif est de décrire ou expliquer le phénomène, le client est généralement le modélisateur lui-même, et au delà la communauté scientifique.

### 2.1.2 Le modèle, outil de communication et support du raisonnement

Un modèle, en tant qu'abstraction d'un phénomène réel, est décrit dans un formalisme (langage, ou symbolisme [Ostrom, 1988]) donné. Un modèle descriptif ou explicatif constitue au départ un outil du modélisateur pour satisfaire un but. S'il s'avère descriptif, explicatif ou prédictif, il devient un élément de connaissance, une conclusion justifiée sur le monde ; il fait donc partie intégrante des connaissances générées par la recherche, et se doit d'être transmissible au reste de l'humanité (ou de façon plus réaliste, aux chercheurs de diverses communautés de recherche). Cette communication est indispensable à la mise à l'épreuve du modèle par d'autres chercheurs, notamment par la réplication des expériences. Mais si le langage de formalisation permet de transmettre le modèle, il induit également des contraintes sur ce que l'on peut représenter. Plus un langage est contraint, plus il est facile à transmettre, mais plus il limite le pouvoir de représentation. On trouve à la fois des formalismes en langage naturel, mathématique, et plus récemment sous forme algorithmique (2.1.3).

Un *modèle discursif* est décrit en langue naturelle. Le champ des représentables est donc très vaste ; c'est pourquoi les modèles en sciences humaines (philosophie, psychologie, sociologie, etc) sont généralement décrits de cette façon. Le langage naturel permet d'exprimer des phénomènes trop mal connus ou trop complexes pour être décrits actuellement de façon plus formelle ; il permet de transmettre les observations qualitatives et les facteurs explicatifs du phénomène. Les observations d'Edwards Rogers sur la diffusion d'innovations, présentées en chapitre 3, constituent un modèle discursif de ce phénomène.

L'un des défauts du langage naturel est le champ laissé à l'interprétation [Eco, 1994] ; il nécessite un volume de texte important pour limiter ces interprétations. La traduction d'un modèle discursif dénature souvent son contenu. Les travaux en sciences humaines sont notamment cités et étudiés dans leur langue originale, seule capable de véhiculer pleinement les subtilités transmises par le modélisateur. Les modèles discursifs sont donc assez difficilement transmissibles, mais contraignent très peu le champ des représentables. Notons que même les domaines scientifiques qui utilisent traditionnellement des formalisations mathématiques, comme la physique, accompagnent ce symbolisme d'explications discursives (la théorie des cordes est un parfait exemple de modèle difficile à communiquer, qui joint les deux types de formalisation).

L'extrême opposé est bien sûr la modélisation mathématique. Ce symbolisme rigoureux permet d'échanger et de réfléchir sur un modèle indépendamment des langues locales, des domaines de recherche, et ne laisse que peu de place à l'interprétation. Par ailleurs, le langage mathématique dépasse le strict champ de la description et se pose en support du raisonnement. Il permet d'inférer de nouvelles connaissances en réutilisant les outils et connaissances déjà formalisés et prouvés. Il permet également de mettre à l'épreuve la véracité du modèle en testant sa compatibilité avec les connaissances pré-existantes. Par exemple, la théorie de la relativité générale d'Einstein devait être compatible avec la mécanique de Newton, qui faisait partie des observations validées

[Hoffmann, 1985]. Toutefois, l'intérêt récent pour les systèmes complexes a mis en relief d'autres limites des mathématiques (voir 2.1.3).

Un modèle étant un moyen développé pour atteindre une fin, il joue plus ou moins explicitement le rôle de *support du raisonnement*. Une fois les intuitions (qu'on les nomme hypothèses ou théories) du modélisateur traduites dans un formalisme quelconque, celles-ci peuvent être testées et mises à l'épreuve. Toutefois, si le modèle est à la base un outil qui aide le modélisateur, on doit souligner également le risque d'aliénation du modélisateur à son modèle. Geroski écrira : “Nous utilisons des modèles pour nous aider à éclairer des phénomènes que nous trouvons difficiles à comprendre, ou pour résoudre des problèmes qui sont trop difficiles à démêler. Ces bénéfices proviennent du fait que les modèles simplifient la réalité, et la rendent suffisamment accessible pour nos capacités limitées de compréhension. Ces bénéfices, toutefois, impliquent des coûts. Les modèles deviennent facilement des prisons. Ils peuvent limiter sérieusement la façon dont nous pensons les choses, limitant ainsi l'éventail des actions que nous pourrions choisir quand nous avons terminé notre analyse.” [Geroski, 2000]. Un modèle, une fois accepté par une communauté scientifique, devient un élément de référence autour duquel se polarisent les recherches. L'esprit, entraîné et orienté par ces théories, ne parvient plus à observer d'un oeil neuf l'objet d'étude. Un modèle, en tant que connaissance partagée, peut devenir ce que Bachelard appelait un obstacle épistémologique [Bachelard, 1938]. Comme nous le verrons plus loin (chapitre 4), cette inertie peut effectivement limiter les voies de recherche explorées pour décrire ou expliquer un phénomène.

### 2.1.3 Systèmes complexes et modèles computationnels

On définit comme *système complexe*, un ensemble d'entités en interaction (un système) qui comme un tout exhibe une ou plusieurs propriétés qui n'étaient pas attendues sachant les interactions locales. Un système complexe n'est pas nécessairement compliqué, au sens où les règles qui font apparaître un phénomène complexe peuvent être extrêmement simples. On qualifie d'*émergence* cette apparition de phénomènes collectifs complexes issus de règles simples [Gilbert, 1995].

Les *automates cellulaires* constituent une excellente illustration de l'émergence. Prenons une grille de taille arbitraire. Chaque cellule de cette grille peut prendre deux états (ou plus). La cellule change d'état en fonction de l'état de ses voisines. La dynamique émergeant de ces règles triviales peut faire apparaître des comportements extrêmement complexes, notamment des structures qui se déplacent dans l'espace de la grille et se maintiennent dans le temps, qui peuvent donc être assimilées à une vie artificielle [Langton, 1995, Rennard, 2002].

Comme le démontre Stephen Wolfram dans “*A new kind of Science*” [Wolfram, 2002], les mathématiques ne peuvent capturer ce type de dynamique complexe, pourtant issue de règles extrêmement simples; étant donné l'état du système à temps  $t_0$ , on ne peut pas calculer l'état du système à un temps  $t_x$ . Il n'existe pas d'heuristique, de formule simple pour étudier l'évolution du système dans

le temps. En d'autres termes, le système n'est plus *réductible* à la somme de ses parties. Pour connaître l'état du système à un temps  $t_x$ , il faut nécessairement calculer toutes les étapes intermédiaires  $t_1, t_2 \dots t_{x-1}$ . Les modèles météorologiques constituent un bon exemple de cette simulation incrémentale de l'évolution du système dans le temps. Les mathématiques restent néanmoins précieuses pour définir le calcul d'un temps  $t$  à  $t + 1$  (par exemple, par des équations différentielles) ou pour décrire le phénomène émergent - sans toutefois permettre de l'*expliquer*.

Lorsque l'on décrit un système complexe, et notamment des phénomènes sociaux, on est souvent amené à utiliser des variables aléatoires. On utilise le hasard pour reconnaître, dans le modèle, notre manque de connaissance sur le phénomène ou notre volonté de ne pas compliquer le modèle. Dans le cas de l'être humain, il est rare que l'on puisse affirmer qu'un individu donné réagisse d'une façon déterminée face à un stimulus. Au mieux, on peut définir une loi de probabilité qui exprime la vraisemblance plus ou moins importante des comportements de l'individu. Un modèle qui utilise des variables aléatoires est un *modèle stochastique*, qui s'oppose aux *modèles déterministes*. Les outils mathématiques sont également limités dans l'étude de modèles stochastiques, fournissant une information faible sur les dynamiques plus ou moins probables du système.

Des modèles comme les automates cellulaires ont été développés avant l'essor de l'informatique, c'est-à-dire avant le développement des outils matériels et conceptuels permettant d'effectuer des traitements d'information à grande vitesse. Les automates cellulaires de Von Neuman étaient de simples feuilles de papier étalées sur le sol, retournées manuellement pour simuler l'évolution des automates. Or les automates, comme de nombreux autres processus, peuvent être décrits sous forme d'ensemble d'instructions qui détaillent la manipulation de données (des algorithmes). Le modèle est alors exprimé sous forme de programme informatique - on parle de *modèle computationnel*. On peut alors simuler l'évolution du système, c'est-à-dire *faire évoluer l'abstraction du système dans le temps* [Sargent, 2005]. Les mathématiques proposent de connaître avec certitude la dynamique d'un modèle, mais s'avèrent incapables de décrire la dynamique de systèmes complexes. Le langage naturel permet de décrire la dynamique du système complexe, de proposer des facteurs explicatifs, mais ne propose pas de mise à l'épreuve rigoureuse de ses théories. Les modèles computationnels et la simulation proposent de reproduire et d'observer l'évolution de systèmes complexes dans le temps. Il s'agit de *modèles génératifs*, qui produisent des données que l'on peut comparer avec des données réelles. Là où les mathématiques proposent une preuve, la simulation propose des expériences sur une version simplifiée du système. En effectuant de nombreuses simulations, avec des combinaisons de paramètres différents, on étudie la dynamique du modèle et l'on peut la comparer au phénomène réel. De nombreuses erreurs peuvent s'introduire lors de la modélisation computationnelle, que ce soit dans la théorie proprement dite, dans la traduction du modèle en programme informatique (implémentation) ou lors de l'expérimentation. Afin que la simulation ait une quelconque valeur, de nombreuses règles ont été édictées pour contrôler la rigueur de ce processus de modélisation ; nous verrons quelques-unes de ces règles en 2.3.

Ces algorithmes constituent le “troisième symbolisme” [Ostrom, 1988] après le langage naturel et les mathématiques. Appliqué à la modélisation, ce langage s’avère souple, permettant de représenter une grande variété de phénomènes. Toutefois, la description d’un phénomène par des algorithmes est généralement volumineuse (les automates cellulaires comptent parmi les exemples les plus simples de modèle computationnels). Un modèle suffisamment compliqué ne peut donc être communiqué sous cette forme, ce qui constitue un problème important pour la transmission de ces modèles.

## 2.2 Modélisation basée agents

### 2.2.1 Simulation sociale

Les modèles computationnels offrent donc un intéressant compromis entre la flexibilité du langage naturel et la rigueur des mathématiques. Les sciences sociales ont perçu dans la simulation une voie intéressante pour étudier les phénomènes sociaux, qui pouvait avantageusement compléter les modèles discursifs traditionnels. La *simulation sociale* désigne cette approche qui utilise la simulation pour enrichir la compréhension des phénomènes sociaux.

Le modèle de ségrégation de Thomas Schelling [Schelling, 1971] constitue une application célèbre de la simulation à un phénomène social. Dans ce modèle, chaque cellule de la grille représente un logement. Chaque logement peut être libre ou occupé par un individu ou foyer d’une ethnie donnée. Chaque individu supporte une proportion donnée de voisins d’une ethnie différente. Si ce seuil n’est pas atteint, l’individu demeure dans son logement. Au delà de ce seuil, l’individu déménage vers une cellule vide choisie aléatoirement dans la grille. La grille est initialisée aléatoirement.

Pendant la simulation, on observe une stabilisation progressive de la répartition résidentielle. Des quartiers résidentiels blancs ou noirs apparaissent, qui peuvent qualitativement être comparés à la ségrégation résidentielle observée sur le terrain. Mais surtout, la simulation montre qu’une population tolérante, qui accepte même d’être en minorité ethnique jusqu’à un certain point, évolue également vers de telles structures ségrégatives. Ce seuil étonnamment bas permet de mieux comprendre comment une population non raciste génère des zones résidentielles uniformes.

La simulation sociale, comme toute innovation, connaît une diffusion progressive. Les premiers travaux par simulation du géographe Torsten Hägerstrand [Hägerstrand, 1952] demeurèrent discrètement cantonnés au domaine de la géographie [Daude, 2006]. Le modèle de ségrégation de Thomas Schelling [Schelling, 1971] a provoqué un intérêt important, démontrant l’apport indéniable de l’approche de simulation pour les sciences sociales. Le “décollage” de l’innovation que constitue la simulation sociale pourrait se situer au début des années 1990 [Axelrod, 1997], ce qui en fait un domaine de recherche adolescent [Axtell, 2006]. Les travaux d’Epstein et Axtell sur le marché artificiel SugarScape [Epstein et Axtell, 1996] ont vivement attiré l’attention des économistes. La

présentation de Huston [Huston *et al.*, 1988] est souvent considérée comme marquant un intérêt exponentiel en écologie [Grimm, 1999]. Pendant les années 1990, plusieurs ouvrages rapportent l'évolution de la simulation sociale, qu'elle soit appliquée à l'écologie [Coquillard et Hill, 1997] ou aux phénomènes sociaux en général [Conte *et al.*, 1997, Gilbert, 1994]. Par la suite, la rencontre de la simulation sociale avec le concept de système multi-agents a conduit aux simulations sociales basées agents.

### 2.2.2 Systèmes multi-agents

Avec l'évolution de l'intelligence artificielle, et notamment des travaux en intelligence distribuée et systèmes multi-experts, est apparue la notion de systèmes multi-agents. Les systèmes multi-agents (SMA) décrivent des entités autonomes - les agents - en interaction dans un environnement. [Ferber, 1995, Wooldridge, 2002]. Un agent est [Ferber, 1995, p. 13] une entité physique ou virtuelle (un programme) *autonome*, c'est-à-dire qu'il est capable d'agir sans l'intervention d'un autre agent. L'agent est capable d'*agir* dans un environnement, de *communiquer* avec d'autres agents, et de *percevoir* son environnement. Encore n'est-il capable de percevoir cet environnement que de façon limitée, à la fois par la portée de ses sens - vue, audition, toucher - mais aussi par ses capacités de traitement cognitives. Les *agents réactifs* sont fortement couplés à l'environnement, c'est-à-dire qu'ils réagissent principalement à des stimuli externes (insectes, par exemple). Les *agents cognitifs*, quant à eux, possèdent des *objectifs* qui leur sont propres (motivations, besoins, survie). Ils forment des *représentations du monde*, et mettent en oeuvre des processus internes complexes pour accomplir ces buts. Un rongeur cartographie son environnement ; l'être humain est un agent cognitif doté de facultés de symbolisation et de raisonnement très complexes. La notion d'agent permet d'aborder sous un même angle des entités réelles ou virtuelles très différentes, telles que des humains, des animaux, des éléments d'interface homme-machine, des robots, des téléphones ou des capteurs.

Sur la base d'interactions et de comportements individuels très simples, il arrive qu'une dynamique extrêmement complexe émerge. Les systèmes multi-agents sont, en ce sens, des systèmes complexes (2.1.3). L'organisation d'une fourmilière en est un bon exemple. D'un point de vue individuel, les fourmis sont des agents réactifs très simples, incapables de se représenter les buts de la fourmilière, ni de cartographier leur environnement. Lors de la recherche de nourriture, la fourmi évolue aléatoirement dans l'environnement. Si elle rencontre une marque de phéromones, elle suit cette piste jusqu'à la nourriture. Quand elle est alourdie par la nourriture, l'abdomen de la fourmi frotte contre le sol, marquant son passage. De ce comportement individuel purement réactif et local émerge une intelligence collective, qui permet à la fourmilière de découvrir et récupérer efficacement la nourriture présente dans son environnement. En utilisant le paradigme multi-agents, on peut décrire les fourmis comme des agents pilotés par les règles décrites ; en simulant l'évolution du système, on constate la reproduction du comportement de fourrage classique [Drogoul et Ferber, 1992], ce qui permet de supposer que la théorie des fourmis dirigées par ces règles est plausible.

### 2.2.3 Simulation basée agents

Les systèmes multi-agents décrivent donc des entités autonomes en interaction dans un environnement. Cette structure permet de modéliser élégamment 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 propres (hétérogénéité), et évoluera en fonction de son expérience propre. Cet 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 [Amblard et Phan, 2006],[Phan et Amblard, 2007] ou le moins connu [Perez et Batten, 2006]). La modélisation basée agents (MBA) se propose donc de modéliser des dynamiques sociales en utilisant cette métaphore sociale des systèmes multi-agents. La 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 devient la troisième voie pour progresser dans l'étude des phénomènes sociaux [Axelrod, 1997]. La MBA a été utilisée pour étudier des modèles biologiques, de comportement d'insectes ou de primates, ou l'apparition de villes [Treuil *et al.*, 2008].

Tandis qu'un système multi-agents est une organisation d'agents développée pour remplir un but [Wooldridge, 2002], 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. Les outils - langages, plateformes, méthodologies - développés pour les systèmes multi-agents ne sont donc pas toujours pertinents pour la modélisation basée agents.

L'avantage du concept d'agent est sa généralité. De même que l'éthologie analyse sous un même angle animaux et humains, le concept d'agent recouvre des entités aussi diverses que des robots, animaux, voitures, entreprises, agents d'interface ou programmes informatiques. La MBA offre une approche commune, des plateformes de simulation, des méthodologies, des langages de modélisation susceptibles d'être réutilisés pour n'importe quel phénomène basé sur des entités autonomes en interaction. Le concept est d'ailleurs suffisamment générique pour que le concept d'agent soit parfois dénaturé, conduisant à des modèles basés agents dans lesquels il est difficile de trouver un agent conforme à la définition rapportée plus haut [Drogoul, 2003].

Parmi leurs nombreux avantages [Axtell, 2000], nous retiendrons que les modèles basés agents permettent d'étudier le lien micro-macro, d'intégrer les facteurs explicatifs présents au niveau individuel, constituant finalement des mondes artificiels dans lesquels l'expérimentation devient aisée.

### Etudier le lien micro-macro

Lorsque l'on étudie un système, on peut le modéliser au niveau macro, comme un tout. Les mathématiques s'avèrent particulièrement puissantes pour décrire ce niveau agrégatif. On peut également décomposer le système en un ensemble d'éléments, le réduire aux parties qui le composent (*approche réductionniste*). Toutefois, si le système est complexe, il n'est plus réductible, car l'émergence fait que le tout devient plus (ou autre chose) que la somme de ses parties. L'*approche holiste* renonce alors à décomposer le système, à expliquer ou à observer l'émergence, et se focalise sur le niveau macroscopique.

La modélisation basée agents offre un niveau d'étude intermédiaire. Le système est effectivement décomposé en tant qu'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 et au niveau collectif. Il peut étudier un agent, un groupe d'agents et leurs interactions, pour mieux comprendre l'émergence. L'étude du lien micro-macro fut d'ailleurs au centre des travaux en modélisation multi-agents [Axtell, 2006].

### Intégrer les facteurs explicatifs

Dans de nombreux cas, notamment dans la diffusion d'innovations, les facteurs explicatifs du phénomène collectif résident au niveau individuel. Si l'on modélise ces phénomènes sociaux au niveau macroscopique - dans le cas de la diffusion d'innovation, en reproduisant la courbe d'adoption en "S" - il est impossible de représenter ces facteurs explicatifs (imitation, compréhension d'une information par exemple). Comme l'écrivait Wickens en 1982 [Wickens, 1982, p. 9], repris récemment par [Hedström et Swedberg, 1998] : "les modèles agrégatifs décrivent à quoi les données ressemblent, mais pas d'où elles viennent". Les modèles basés agents permettent de travailler sur les deux échelles, en décrivant les facteurs explicatifs au niveau local et en vérifiant la dynamique émergente des interactions.

Intégrer les facteurs explicatifs d'un phénomène dans un modèle permet tout d'abord de vérifier que ces facteurs explicatifs supposés correspondent bien à la réalité. De plus, ces facteurs explicatifs correspondent parfois à des variables décisionnelles. Par exemple, en diffusion d'innovations, un modèle qui ne représente pas l'impact de la publicité peut difficilement être utilisé comme outil d'aide à la décision.

### Des mondes artificiels

Un modèle basé agents constitue une forme de "monde artificiel". Dans ce laboratoire, il est possible d'effectuer à l'infini des expériences en variant les paramètres du modèle [Drogoul *et al.*, 1994]. On peut reproduire dans le modèle des actions que l'on n'aurait pas pu, ou que l'on ne souhaite pas exécuter dans un système réel. Les modèles épidémiologiques illustrent bien ce bénéfice. Les épidémies sont heureusement relativement rares et ne permettent pas de tester différentes stratégies sanitaires pour

limiter la pandémie. Il est d'ailleurs éthiquement peu souhaitable de tester ces solutions en milieu réel en risquant de nombreuses vies humaines. Par contre, un modèle suffisamment descriptif permet de tester différentes stratégies, et de n'appliquer que celles qui semblent les meilleures sur le terrain. A l'évidence, il est nécessaire de disposer de modèles suffisamment descriptifs pour effectuer de telles expériences *in silico*.

### De faibles contraintes

Les modèles multi-agents se reposant sur un symbolisme peu contraignant, ils offrent une grande flexibilité au modélisateur. Il est ainsi possible de représenter l'hétérogénéité des agents, non seulement dans leurs caractéristiques permanentes (préférences, motivations, caractéristiques sociales) mais également dans leurs différences d'expérience (connaissances, expériences personnelles). Il est possible de représenter des comportements individuels complexes ou des interactions structurées. Par ailleurs, les modèles multi-agents demeurent compatibles avec les outils mathématiques. Le comportement ou les états d'un agent peuvent être décrits mathématiquement. Il est parfois possible de ramener un modèle basé agents à un système dynamique [Treuil *et al.*, 2008].

#### 2.2.4 Structure générale d'un modèle multi-agents

Il existe une grande variété de modèles multi-agents dont la structure peut fortement varier. Nous décrivons ici la structure d'un modèle de population humaine, telle qu'elle existe dans les modèles de dynamique d'opinion, de culture ou de diffusion d'innovations. Cette structure découle naturellement de la définition d'un système multi-agents : un ensemble d'entités autonomes en interaction dans un environnement.

**L'agent** lui-même, en tant qu'entité autonome, est défini par un ensemble de règles ou algorithmes qui lient ses perceptions, son état interne, ses motivations et son comportement. Cette structure est plus ou moins complexe en fonction de la position de l'agent sur le continuum réactivité-cognitivism. Des structures cognitives issues de l'intelligence artificielle, qui visent à la généralité, peuvent être utilisées (voir notamment [Sun, 2005]). La plupart du temps, la structure interne de l'agent est construite en fonction du phénomène à modéliser.

On distingue souvent différents types d'agents, par exemple des agents fournisseurs et des agents clients, des agents entreprises et clients, etc.

**Les interactions** entre les agents sont généralement considérées comme des envois de messages. Cette approche conserve la notion d'autonomie, c'est-à-dire que l'on peut envoyer une information à un agent, mais qu'il est impossible d'accéder directement à son état interne ; c'est à l'agent de traiter ou non ce message, de répondre ou non à une demande.

**La structure des interactions** définit qui interagit avec qui dans la population. Les *automates cellulaires* [Toffoli et Margolus, 1987, Gutowitz, 1991] définissent les interactions par voisinage spatial - chaque agent interagissant avec ses voisins - ce qui en

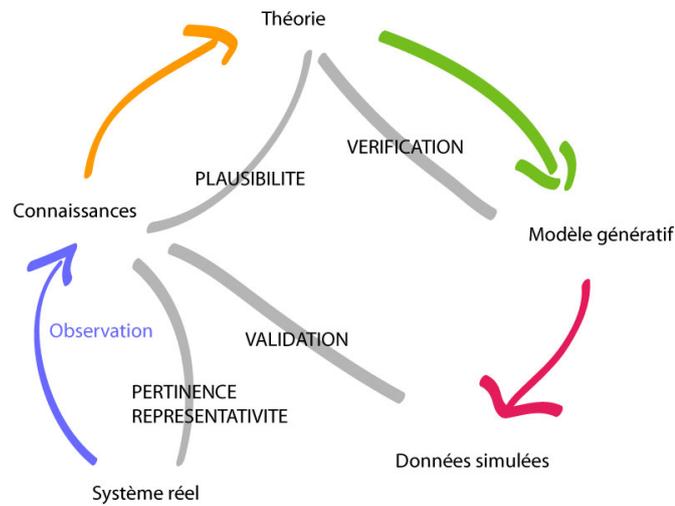


FIG. 2.1: Processus général de modélisation simulation sociale basée agent

fait une structure particulièrement pertinente pour l'étude des phénomènes spatialisés. Plus généralement, la structure des interactions est définie par un réseau d'interactions. Chaque agent constitue un sommet du graphe, et les arcs entre ces sommets constituent les interactions possibles pendant la simulation. Cette représentation en réseau est directement inspirée du concept de *réseau social*, proposé initialement par les sciences sociales [Wasserman et Faust, 1994a]. Plus récemment, des physiciens ont abordé cette problématique en utilisant des outils statistiques, et ont proposé des algorithmes qui génèrent des graphes correspondants à quelques propriétés statistiques observées sur certains graphes réels. Il est devenu courant d'utiliser ces générateurs pour définir la structure des interactions dans les modèles basés agents ([Phan, 2006] [Amblard, 2002]). Nous verrons plus tard que cette structure a généralement un impact important sur la dynamique modélisée (par ex. [Rouchier *et al.*, 2001]). La construction de réseaux d'interactions représentatifs des réseaux réels est un travail de modélisation à part entière, qui sera développé en chapitre 8.

**L'environnement** représente les objets réels du monde manipulables par les agents. Dans les modèles développés en écologie, cet environnement joue évidemment un rôle central. Les modèles basés sur des agents situés, comme des fourmis ou des robots, utilisent également cet environnement comme vecteur de communication indirecte (proto-environnement). Dans les simulations sociologiques, comme en diffusion d'innovations, l'environnement n'est pas directement impliqué, et est donc généralement ignoré dans le modèle. L'influence de la spatialisation des individus, comme la communication plus fréquente à faible distance, est alors intégrée dans le réseau d'interactions.

## 2.3 Processus de modélisation

De nombreux schémas de modélisation ont été proposés, assortis de règles de bonne conduite ; par exemple [Sargent, 1991, Sargent, 2005, Kleijnen, 1995]. Le processus de modélisation dépend notamment de l'objectif de la simulation elle-même (*cf.* 2.1.1) ; toutefois, le schéma général s'assimile à celui présenté en figure 2.1. Bien que le processus en général soit valable pour toute simulation sociale orientée agents, nous orienterons cette présentation vers la diffusion d'innovation.

### 2.3.1 Définition de l'objet et de l'objectif

#### But du modèle

Un modèle est développé dans un but précis. De ce but dépendront la frontière du modèle, les compromis effectués pendant la modélisation (2.4.5), ainsi que les critères d'évaluation du modèle. Le but dépend du type de modèle (2.1.1) :

- modèle descriptif : mieux décrire un phénomène donné, décrire une plus grande classe de phénomènes
- modèle explicatif : tester une théorie sur les facteurs explicatifs qui font apparaître un phénomène donné. La question posée au modèle est alors : “Ma théorie est-elle plausible?”
- modèle prédictif : développer un outil de prévision plus fiable
- modèle normatif : développer un modèle qui permette d'améliorer des décisions prises sur le système réel.

#### Instance ou classe de phénomènes

En simulation sociale orientée agents, et particulièrement en diffusion d'innovations, l'objet modélisé est un phénomène social se déroulant dans le temps. On peut s'attacher à modéliser une *instance d'une classe de phénomènes*. Par exemple, la diffusion des télévisions au Niger représente un cas particulier de diffusion d'innovations. On peut également chercher à modéliser une *classe de phénomènes*, par exemple la diffusion d'innovations technologiques, ou la diffusion d'innovations en général. De ce choix dépendra le compromis généralité/précision que nous évoquerons plus loin (2.4.5).

#### Client du modèle

Dans certains cas, il sera nécessaire de définir à quel client s'adresse le modèle (2.1.1). Si le but est de développer un outil d'aide à la décision, le modèle devra contenir les variables décisionnelles utilisées par les décideurs finaux. Les outils de simulation et d'observation devront être adaptés à ce client final. Le paramétrage du modèle doit notamment être réalisable par ce client final, et ce en fonction de la disponibilité des informations lors de l'utilisation du modèle.

### 2.3.2 Collecte et sélection d'informations

La simulation sociale orientée agents ne peut prétendre au titre d'outil pour les sciences sociales que si la modélisation ancre le modèle dans la réalité du terrain [Moss et Edmonds, 2005]. Même si, dans certains cas, les modèles peuvent être faiblement liés au terrain (2.4.2), ce travail est nécessaire si l'on souhaite modéliser une ou plusieurs instances de phénomènes sociaux.

#### Non-répliquabilité des phénomènes sociaux

La collecte d'informations vise à récupérer sur le phénomène social des données qui serviront à paramétrer et à valider le modèle. Cette collecte d'informations dépend de l'objectif du modélisateur. Si l'objectif est de modéliser un cas précis de diffusion, le modélisateur se heurte à un problème inhérent aux phénomènes sociaux : la *non répliquabilité du phénomène*. En physique, on peut répliquer à l'infini les expériences ; on peut tester la chute des corps, en variant les paramètres des expériences, en obtenant des résultats cohérents. Par contre, on ne peut assister qu'une seule fois à la diffusion des solutions contraceptives au Kenya ; cette diffusion va modifier les connaissances des habitants sur les moyens contraceptifs, leur attitude envers la contraception, et leur perception de cette innovation. Par la suite, il sera impossible de tester à nouveau le phénomène social dans les mêmes conditions initiales. C'est une expérience unique, intrinsèquement non reproductible. La collecte d'informations doit donc être réalisée de façon suffisante et précise pendant cette seule occurrence de la diffusion.

Par contre, si l'on modélise la diffusion des innovations en général, ou la diffusion d'une catégorie d'innovations, on dispose d'un ensemble de données déjà collectées lors d'autres diffusions. Ces diffusions diffèrent toutefois fortement, tant par la population dans laquelle l'innovation se diffuse, par les caractéristiques de l'innovation, et par la stratégie mise en oeuvre par l'institution.

#### Données primaires et secondaires

Il est donc nécessaire, pour modéliser un phénomène social, de se reposer pour tout ou partie sur des observations déjà disponibles sur le phénomène. C'est ce que Yin nomme données primaires et secondaires [Yin, 2003]. Les *données primaires* sont les données collectées pour un phénomène précis dans le processus de modélisation : entretiens, enquêtes et autres observations quantitatives ou qualitatives. Les *données secondaires* correspondent à la littérature disponible sur le phénomène. L'être humain étant étudié par les sciences humaines depuis l'antiquité, il existe une profusion de constats plus ou moins rigoureux issus de la sociologie, de la philosophie, de la psychologie, du marketing ou de la psychologie sociale.

La sélection des observations qui seront utilisées pour le modèle doit se faire en fonction de :

- leur fiabilité : l'observation a-t-elle été faite dans plusieurs cas de diffusion ? A-t-elle été rigoureusement mesurée ?

- leur pertinence par rapport à l’objectif du modélisateur : un paramètre peut être important dans le processus réel, mais être ignoré dans le modèle. Des études sociologiques sur un petit groupe de personnes dégageront des différences entre individus qui pourront peut-être être ignorées dans un modèle à plus grande échelle.
- leur représentativité : les observations doivent porter sur un ensemble représentatif de personnes ou d’instances de diffusion. Le biais pro-innovation décrit par Rogers (3.2.2) correspond à une mauvaise sélection des données, le modélisateur retenant les observations des innovations réussies mais non les échecs
- leur disponibilité, la possibilité de les collecter ou le coût de cette collecte.

Ces observations permettront d’*identifier des invariants* communs à une classe de phénomènes. En diffusion d’innovations, nous avons vu que des invariants existent, au niveau descriptif (courbe agrégative d’adoption en forme de “S”) ou sur les facteurs explicatifs. Ces invariants sont souvent exprimés, en sciences sociales, sous forme de *faits stylisés* : des constats qualitatifs qui sont vrais la plupart du temps, bien que l’on puisse trouver des contre-exemples. Par exemple, “En France, un docteur a un salaire inférieur à un ingénieur” est un fait stylisé : si l’observation se vérifie la plupart du temps, il existe des docteurs bien rémunérés. Nous effectuerons dans le chapitre 3 un panorama des observations disponibles sur la diffusion d’innovations.

Parmi ces observations, certaines seront utilisées pour confronter le modèle à la réalité. Pour certains auteurs, la définition des indicateurs fait partie intégrante du processus de modélisation [Rouchier, 2000, Deffuant *et al.*, 2003a], et doit être pensée dès la conception du modèle. Les indicateurs sélectionnés doivent être observables à la fois dans le système réel et le modèle.

### 2.3.3 Elaboration d’un modèle conceptuel

Sur la base de ses connaissances sur le système, le modélisateur développe un *modèle conceptuel*. Ce modèle conceptuel décrit les caractéristiques et comportements des agents, les interactions entre agents, les divers paramètres, ainsi que les indicateurs qui serviront à l’observation de la simulation. Ce modèle conceptuel doit bien sûr correspondre à une réalité quelconque du système réel. Cette étape est souvent assimilée à la proposition d’une théorie (par ex. [Sargent, 2005]).

Dans le cas de la simulation sociale, le modélisateur se trouve confronté à un objet d’étude - un système social - extrêmement complexe. Il est impossible pour un modélisateur de capturer par lui-même, à l’échelle d’une population et de plusieurs instances de diffusion, les détails du processus collectif. De même que pour les observations sur le système, le modélisateur peut alors se reporter aux différentes théories et modèles proposés dans les sciences humaines. Ces théories peuvent correspondre au phénomène général ou à une partie limitée du processus (perception d’information, mémorisation des informations). Le rôle du modélisateur est alors d’identifier parmi

cette vaste littérature quelles sont les théories plausibles adaptées à son problème particulier, et comment les agencer sous la forme d'un modèle cohérent. Cette approche avait été qualifiée dans la thèse de Lamjed Ben Said [Ben Said, 2003] de "recherche d'un cadre intégratif". La plupart des théories du domaine cible sont discursives, descriptives, et limitées à un phénomène précis. Le modélisateur doit formaliser ces théories en complétant les vides éventuels.

Ce modèle conceptuel peut être exprimé avec le symbolisme de son choix : langage naturel, formules mathématiques, logique, etc. Il doit idéalement être suffisamment complet pour permettre la reproduction du modèle par d'autres chercheurs [Edmonds et Hales, 2003]. Quel que soit le formalisme utilisé, il subsiste toujours une ambiguïté sur l'implémentation, qui faute d'être supprimée doit être minimisée [Amblard *et al.*, 2006].

### 2.3.4 Implémentation et vérification

Dans le cas des modèles computationnels, le modèle conceptuel est *implémenté*, c'est-à-dire traduit en programme informatique. L'utilisation de langages orientés objet (Java, C++) est particulièrement pertinente pour implémenter un modèle multi-agents. Les classes permettent de définir les catégories d'entités existant dans le monde artificiel. Chaque classe est ensuite instanciée sous la forme d'un objet. Il existe une forte parenté entre le concept d'objet en génie logiciel et le concept d'agent en systèmes multi-agents. En particulier, la visibilité privée ou publique des attributs et fonctions d'une classe permet de respecter la notion d'autonomie propre aux agents : on ne peut interagir que de façon limitée avec un objet, en fonction de ce qui a été rendu publique, et l'objet conserve la pleine responsabilité du traitement de ces demandes. D'autres avantages des langages objets s'avèrent précieux, notamment leur lisibilité, leur maintenabilité et leur réutilisabilité.

Le développement des outils d'observation du modèle (graphes, statistiques...) constitue une part importante de l'implémentation. Des plateformes de modélisation ont été proposées pour réduire ce coût de développement. Ces plateformes diffèrent par leurs apports, leurs contraintes et le public qu'elles visent.

Après implémentation, on procède à une *étape de vérification* qui vise à déterminer qu'un programme se comporte comme désiré [Law et Kelton, 1991, p. 299]. Le modèle conceptuel laissant toujours un certain champ à l'interprétation, l'implémentation nécessite de nombreux choix, souvent bénins en apparence, qui peuvent conduire à des dynamiques fort différentes. A titre d'exemple, l'ordre dans lequel les agents agissent impacte le résultat (ordonnancement). Plusieurs essais de ré-implémentation du code à partir des publications ont conduit à des résultats parfois totalement différents de ceux annoncés [Edmonds et Hales, 2003]. C'est pourquoi il est recommandé de multiplier les implémentations, par exemple en faisant ré-implémenter le modèle par un collègue, afin de vérifier que les choix faits pendant l'implémentation sont conformes au modèle conceptuel, et le cas échéant d'explicitier les choix d'implémentation possibles.

### 2.3.5 Expérimentation par la simulation

Quel que soit l'objectif de la modélisation, on étudie le comportement du modèle dans l'espace des paramètres [Ginot et Monod, 2006]. Faute de pouvoir démontrer les évolutions possibles et certaines du système, il est nécessaire de tester les différentes possibilités d'évolution en fonction des paramètres. La définition d'un *plan d'expériences* permet d'explorer soigneusement cet espace de paramètres afin d'appréhender la dynamique du modèle dans son ensemble. Dans le cas de modèles stochastiques, il est nécessaire d'effectuer plusieurs simulations pour un même jeu de paramètres, le nombre exact étant généralement défini de façon empirique. Dans ce cas, l'exploration de l'espace des paramètres conduit rapidement à des dizaines de milliers de simulations, ce qui rend l'exploration coûteuse en temps de calcul. D'autres études peuvent être conduites : étude de sensibilité aux paramètres, sensibilité aux conditions initiales, analyse d'incertitude, stabilité, etc.

De même que les expériences scientifiques dans leur ensemble, les expériences par simulation devraient idéalement être reproductibles [Amblard *et al.*, 2006]. Cela permet au modélisateur, lorsqu'il obtient un résultat de simulation surprenant, d'étudier en détail le comportement de chaque agent. La reproductibilité de l'expérience est garantie pour un modèle déterministe, auquel cas on peut simplement relancer la simulation avec les mêmes paramètres. Dans le cas de systèmes stochastiques, une simulation n'est théoriquement pas répliquable. Pourtant, l'utilisation de générateurs pseudo-aléatoires permet de relancer une simulation, en réutilisant simplement la valeur d'initialisation du générateur aléatoire (*seed*).

A terme, le but de l'expérimentation est de répondre à la question posée au modèle, de satisfaire le but initial du modélisateur. Cette validation du modèle, comme nous allons le voir, est loin de se limiter à une comparaison quantitative des données de simulation avec les données de terrain.

## 2.4 Qu'est-ce qu'un “bon” modèle ?

### 2.4.1 Utilité

Le modèle étant un outil construit pour atteindre une fin, un bon modèle est un modèle utile, c'est-à-dire qu'il permet de satisfaire l'objectif du modélisateur. En tant qu'outil de recherche, le modèle doit permettre de générer de la connaissance. Si le but était de valider une hypothèse, le modèle a dû valider ou invalider cette hypothèse. En ce sens, un bon modèle devient inutile au terme du travail de modélisation, ayant rempli son objectif [Grimm, 1999]. L'utilité d'un modèle dépend d'autres variables, comme son coût d'exploitation [Edmonds, 2005b], sa lisibilité ou sa manipulabilité.

### 2.4.2 L'exception des modèles analogiques

Dans le cadre de simulations sociales, on cherche à décrire et expliquer un phénomène social. On opère bien un travail de comparaison entre ce que l'on observe dans le modèle et ce que l'on observe sur le terrain. La question posée au modèle est donc classique en modélisation : "ma théorie sur le phénomène est-elle plausible?". Notons que ce retour au terrain peut être qualitatif, tel que l'existence d'un équilibre ou d'un effet de seuil. Le modèle de Thomas Schelling ne vise pas à décrire la dynamique de ségrégation dans une ville réelle pendant une période déterminée ; mais il permet bien un retour à la réalité, en fournissant une explication plausible d'un phénomène - la création de ghettos - observé dans les populations réelles.

Pourtant, parmi les nombreux modèles multi-agents explorés et publiés, certains violent la quasi-totalité des bonnes règles de modélisation qui nous avons listées plus haut. Le modèle ne repose pas sur des données de terrain. Il utilise des règles d'interaction stylisées, associées à de nombreuses hypothèses non vérifiées et souvent invérifiables. L'objet modélisé lui-même manque de clarté, ce qui est inévitable dans le sens où l'on ne définit pas de mesure d'un phénomène réel. Le modèle n'est finalement pas rapporté au terrain, ni quantitativement, ni qualitativement.

De tels modèles correspondent à la définition d'un *modèle analogique* énoncée par Bruce Edmonds [Edmonds, 2005b]. Il n'existe pas d'autre test pour un modèle analogique que son utilité pour *réfléchir sur le système réel*. Il est donc nécessaire qu'il existe une *certaine* correspondance avec le système réel, même si ce lien peut être complexe et faiblement défini. En quelque sorte, un modèle analogique est une forme d'*expérience de pensée*. Einstein, supposant l'existence d'un train infiniment long roulant à la vitesse de la lumière, ne prétendait pas décrire un phénomène réel ni une expérience réalisable. Toutefois, cette expérience de pensée permet d'inférer des conclusions, des principes de fonctionnement qui constituent un pas vers le développement d'un modèle descriptif ou explicatif.

De nombreux modèles basés agents se situent à mi-chemin du continuum entre modèle fortement couplé au terrain et modèle purement analogique. Dans la simplification inhérente au processus de modélisation, le contact avec le terrain, et l'introduction de facteurs non vérifiables dans le modèle, sont quasiment inévitable [Edmonds, 2005b]. Certains modèles s'inspirent de théories d'interaction plausibles pour examiner les dynamiques possibles du système. Dans ce cas, le lien avec le terrain existe d'une façon très qualitative ; la valeur du modèle provient du réalisme des interactions représentées dans le modèle. Nous serons notamment amenés à critiquer la vision purement épidémique de la propagation d'informations dans une population.

Il est important de souligner que l'on ne peut pas tirer de conclusion certaine à l'aide d'un modèle analogique. Le modèle analogique est, et doit rester, un outil qui a permis au modélisateur de réfléchir, sans ambition de réalisme. Une discussion récente sur un modèle analogique illustre ce danger. Dans le cadre du projet IMAGE, un modèle

de dynamique d'opinions a été développé [Deffuant, 2001]. Ce modèle a été couplé fortement au terrain, impliquant un travail de collecte de données et de validation conséquent. Toutefois, afin d'analyser la dynamique générale de ce modèle, une version simplifiée en a été présentée [Deffuant *et al.*, 2002]. Des observateurs extérieurs se sont intéressés à cette publication, et ont critiqué sa simplicité excessive [von Randow, 2003]. Mais, comme l'a répondu l'auteur [Deffuant *et al.*, 2003b]), ce modèle stylisé n'avait pas prétention à donner des informations sur la dynamique réelle. Il s'agissait à proprement parler d'un modèle analogique. Cette discussion souligne le risque inhérent à l'ambiguïté des modèles analogiques, qui doivent être présentés en tant que tels (ce qui était le cas ici), et ne doivent pas être sur-estimés par le lecteur. Nous verrons, notamment dans le cas des réseaux sociaux (chapitre 8) que des modèles analogiques ont été réutilisés à tort comme modèles descriptifs.

### 2.4.3 Validation du modèle sur les données collectives

L'étape de validation vise à comparer les résultats de simulation avec les données de terrain. Notons que ce processus repose sur les données sélectionnées lors de l'étape de collecte et de sélection des données (2.3.2) ; la qualité de la validation dépend donc d'une sélection judicieuse de ces données. La validation d'un modèle multi-agents est souvent comprise comme la validation de la dynamique collective émergeant des interactions locales (par exemple, la courbe d'adoption d'innovations en "S"). Cette validation peut être quantitative, auquel cas on pourra quantifier rigoureusement l'écart entre la courbe générée par le modèle et la courbe mesurée sur le terrain. Toutefois, cette validation purement quantitative atteint rapidement ses limites. D'une part, parce qu'un modèle se voulant une simplification du phénomène réel, on ne doit pas en attendre une précision importante. Des paramètres influençant un cas particulier de diffusion ne seront naturellement pas pris en compte. Par exemple, la diffusion des télévisions présentée en figure 3.2 (page 42) connaît un plateau pendant la Seconde Guerre Mondiale, facteur qui ne sera pas pris en compte dans les modèles. D'autre part, parce que n'importe quel modèle contenant un nombre suffisant de paramètres est potentiellement susceptible de reproduire n'importe quelle courbe. C'est pourquoi les moyens de validation sont étendus à d'autres critères plus ou moins objectifs.

On vérifie notamment la plausibilité d'un modèle par la plausibilité de sa dynamique dans son espace de paramètres. Un modèle peut reproduire parfaitement un cas donné de diffusion, mais présenter une dynamique incohérente qui prouve son manque de réalisme. La dynamique collective est elle-même comparée de façon qualitative avec la réalité, à l'instar du modèle de Schelling qui semble plausible par l'apparition qualitative d'un phénomène de propagation.

### 2.4.4 Plausibilité des processus locaux

Le principe de la modélisation basée agents étant de reproduire une dynamique collective en définissant des interactions locales, la question se pose inévitablement de la plausibilité de ces mécanismes générateurs. Supposons l'existence de deux modèles A

et B, exhibant tous deux les comportements collectifs attendus. Si le modèle A est ancré dans des observations de terrain et des théories éprouvées, tandis que le modèle B est un ensemble d'hypothèses non vérifiées et non équivalentes à A, lequel considèrerons-nous comme le meilleur ? Plus généralement, si nous avons construit un modèle B dont le comportement nous satisfait, comment savoir s'il n'existe pas une infinité de modèles plus réalistes que le nôtre ?

Dans le cas de la diffusion d'innovations, la courbe d'adoption en "S" constitue le critère qualitatif de validation énoncé dans tous les modèles de diffusion d'innovation. Toutefois, une grande classe de modèles, et notamment n'importe quel mécanisme épidémique, sont susceptibles de générer une telle courbe. L'évaluation du modèle doit alors porter sur la plausibilité des mécanismes générateurs, ainsi que sur l'utilité du modèle. Si le modèle ne contient pas les variables décisionnelles, ni les variables explicatives identifiées dans la littérature, son utilité et sa portée sont sévèrement réduits.

#### 2.4.5 Les compromis

Le processus de modélisation est un compromis subjectif entre plusieurs critères contradictoires. Parmi d'autres, on peut relever les compromis simplicité/descriptivité et généralité/spécificité [Edmonds, 2005b].

##### Le compromis simplicité/descriptivité

Un modèle est par définition une simplification du monde ; il doit être plus simple que le système réel (principe de non-identité [Legay, 1973]). Cela a été codifié comme le principe KISS : "Keep It Simple, Stupid!". Plus un modèle est complexe, moins il est *manipulable*. Ensuite, parce qu'il faut par principe éviter de complexifier un modèle qui ne correspond pas à la réalité en ajoutant un paramètre pour le rendre valide, mais plutôt réévaluer le modèle de base (tant, bien sûr, que ce modèle de base peut correspondre à la réalité) [Deffuant *et al.*, 2003b]. Par ailleurs, l'ajout d'un paramètre nécessite une collecte d'information et un temps de simulation supplémentaire. Ce principe rejoint les conseils sur le processus de modélisation en écologie : n'ajouter de paramètre que si ce paramètre permet d'améliorer les résultats (en terme de pouvoir descriptif, en précision, etc.).

Ce principe de simplicité n'est pas totalement rationnel ni objectif. Lorsqu'Einstein développait la théorie de la relativité générale, il explorait les équations dans une recherche de beauté [Hoffmann, 1985]. Dans un article présentant une théorie unificatrice des forces physiques de l'univers, Lisi écrivait récemment : "Bien qu'il puisse être intéressant de considérer que l'univers puisse être une instanciation de toutes les mathématiques, il existe un principe classique pour restreindre les possibilités : les mathématiques de l'univers doivent être simples" [Lisi, 2007]. Dans ce cas, la recherche de simplicité est motivée par la conviction que le système réel est gouverné par des règles simples. La simplicité est, d'un point de vue épistémologique, au coeur de l'approche multi-agents. C'est précisément l'une des forces de l'approche agents de pouvoir décrire

des comportements complexes à l'aide de règles simples. Toutefois, cette recherche de simplicité ne doit pas être érigée en dogme aux dépens de la descriptivité du modèle.

C'est particulièrement vrai dans les phénomènes sociaux, dans lesquels l'hétérogénéité des individus, la diversité des canaux de communication, le nombre de facteurs entrant en jeu est élevé. Quand l'objectif n'est pas d'étudier de façon abstraite l'émergence de ces phénomènes complexes sur des règles simples (sociétés artificielles), mais que l'on désire lier fortement le modèle au terrain, la complexité devient parfois nécessaire. C'est l'essence du principe KIDS, "Keep it Descriptive, Stupid!", qui complète KISS [Edmonds et Moss, 2005]. La modélisation de phénomènes météorologiques en est un bon exemple. Ces modèles peuvent difficilement être dits simples; ils font intervenir de très nombreux paramètres, qui nécessitent une collecte de données coûteuse (stations météo réparties sur tous les continents pour les données au sol, ballons-sondes pour la basse altitude, satellites d'observation) et les supercalculateurs les plus puissants. Cependant, cette complexité est nécessaire, car elle reflète la complexité réelle du processus. On peut résumer cette discussion par un mot d'Albert Einstein : *"Make your theory as simple as possible, but no simpler"*.

### **Le compromis généralité/spécificité**

Un modèle générique décrit, explique et prédit l'évolution d'un phénomène dans un grand nombre de cas. En diffusion d'innovations, un modèle générique décrit la diffusion d'une innovation en général (sous-entendu, de n'importe quelle innovation). Un modèle spécifique décrit une instance de diffusion d'innovations - par exemple, la diffusion de la télévision au Niger. Malheureusement, les phénomènes sociaux sont trop riches pour être capturés par un petit nombre de variables et règles. Dans un modèle générique, on ne retiendra que les variables qui interviennent dans tous les cas de diffusion. Inévitablement, lors de l'application à un cas de diffusion précis, certaines variables propres au cas de terrain manqueront, limitant la descriptivité du modèle. Par exemple, dans la diffusion de la télévision au Niger, l'électrification des villages isolés par générateurs ou panneaux solaires est un facteur essentiel de la diffusion [Bourgault, 1995]. Au contraire, un modèle très spécifique aura délimité une frontière propre à son cas applicatif, et ne pourra pas capturer une autre diffusion d'innovation. Les modèles basés agents les plus simples et les plus généraux sont les modèles analogiques, qui ne peuvent par contre pas être appliqués au terrain sans être complexifiés.

La question sous-jacente au choix du modélisateur dans ce continuum généralité/spécificité est l'utilité du modèle, liée à la question posée au modèle. Si le but est de comprendre un cas particulier, un modèle spécifique sera pertinent. Si la question est de mieux comprendre la diffusion d'innovations, un modèle spécifique ne résumera pas suffisamment les cas de diffusion. Notons que la politique de validation du modèle dépendra du choix fait à ce niveau. Générique, il devra être capable de s'appliquer à différents cas de diffusion. On le validera davantage sur sa portée que sur la précision de chaque cas. Spécifique, il devra reproduire la dynamique précise du

phénomène de diffusion étudié. Chacune des approches apportera des informations utiles. Le modèle générique pourra être utilisé comme base pour décrire un cas particulier, tandis qu'un modèle spécifique pourra être généralisé à plusieurs cas.

## 2.5 Notre approche de modélisation

Dans le contexte de cette thèse, nous nous intéressons à la diffusion d'innovations en général. Ce modèle vise donc à être générique. Nous nous reposerons essentiellement sur des observations secondaires pour construire le modèle. D'autres observations indirectes nous permettront d'évaluer la plausibilité de notre modèle. Nous avons confirmé la qualité de ces observations indirectes en ne retenant que des phénomènes ou processus observés dans des études de terrain indépendantes. Afin de vérifier certains de nos choix, nous avons été amenés à mener une campagne d'entretiens avec des consommateurs ; certaines de ces observations seront croisées avec l'état de l'art pour élaborer le modèle.

Toutefois, comme présenté en introduction, notre objectif à long terme est de décrire et prédire la diffusion d'innovations. Nous développerons donc un modèle visant à être rapporté au terrain, dont les paramètres pourront être mesurés et les résultats comparés à la réalité.



## Chapitre 3

# Observations sur la diffusion d'innovations

### Avant-propos

Ce chapitre vise à recenser les principales observations secondaires sur lesquelles nous baserons notre modèle. Nous identifierons les variables décisionnelles de l'institution et les besoins en recherche identifiés dans le domaine. Nous retiendrons les faits stylisés essentiels observés au niveau collectif, les processus identifiés au niveau individuel et les mécanismes d'interaction interpersonnels.

La diffusion d'innovation, comme le marketing, sont des domaines de recherche pluridisciplinaires. L'adoptant potentiel de la diffusion d'innovation est également le consommateur étudié par le marketing et la cible des messages élaborés par marketing mix. Au sens de la psychologie sociale, il est aussi un être situé dans un environnement social. L'identification des éléments pertinents et utiles dans cette vaste littérature constitue en elle-même une partie du processus de modélisation. Ces informations seront complétées dans la formalisation du modèle en fonction des besoins.

En traitant uniquement d'observations générales, nous perdrons rapidement le contact avec la réalité du phénomène social de terrain. Nous introduisons donc l'exemple de diffusion de la pilule contraceptive au Kenya, qui sera utilisé à fins d'illustration jusqu'à la fin de ce mémoire.

#### **Culture, peurs et planification des naissances au Kenya rural**

En 1980, le Kenya demeurait un exemple de pays dans lequel des barrières culturelles s'opposent à la planification des naissances [Watkins, 2000]. La polygamie est autorisée, et les hommes détiennent un pouvoir décisionnel non contestable par les femmes. Les surfaces agricoles sont gérées au niveau communal et ne désavantagent pas les grandes familles. Au contraire, de l'avis général, "les grandes familles sont riches". Un fils travaille et rapporte

de la nourriture. Une fille mariée, c'est 15 ou 20 vaches au moins ; et les vaches permettent d'acheter des femmes et de marier les fils. C'est aussi un prestige social : "avoir de nombreux enfants fait de vous quelqu'un dans le village". Pourtant, le Kenya a subitement connu une chute des naissances à partir de 1989 ; le recensement national prouve une augmentation rapide de l'usage de moyens de contraception à partir de ce moment.

Suzan Watkins étudie les causes de cette transition inattendue dans la région de Nyanza [Watkins, 2000], en se basant sur des questionnaires, groupes de discussions et entretiens. Comment le modèle de reproduction *wazungu* (terme Luo, la langue locale, qui désigne les étrangers blancs) a-t-il pu s'implanter dans un tel contexte culturel ? Son analyse démontre que les moyens de contraception n'ont pu être adoptés que grâce à des mutations culturelles profondes. La colonisation du Kenya par les Anglais a fait apparaître la notion d'argent et d'impôt, imposant aux Kenyans de collaborer avec les *wazungu* pour obtenir de l'argent. Des postes étaient maintenant proposés : enseignants, ministres, secrétaires, interprètes, chauffeurs et soldats. Mais pour briguer ces emplois au salaire élevé et stable, il fallait faire des études. L'éducation elle-même était une innovation qui se diffusa rapidement au vu des avantages qu'elle procurait immédiatement. Toutefois, l'école était chère : frais de scolarité, vêtements, transport, livres, argent de poche et objets de prestige (belles chaussures, maquillage). Peu à peu apparut la possibilité d'un choix entre de nombreux enfants travaillant aux champs, et un petit nombre d'enfants qui allaient à l'école et gagnaient un salaire. L'école faisait également découvrir, par des journaux, publicités, un mode de vie occidental qui séduisait les étudiants.

Au contact des *wazungu*, il était évident qu'ils étaient riches. Il était tout aussi évident que les *wazungu* avaient peu d'enfants. En public, les Luo défendaient les grandes familles. En privé, les mentalités évoluaient lentement. Les familles qui avaient peu d'enfants pouvaient payer les frais d'éducation et se nourrir. Par contre, il était plus difficile pour les mères des grandes familles de combiner éducation, nourriture et vêtements. Elle travaillaient davantage, étaient plus fatiguées. Finalement, chaque femme eut dans ses connaissances des exemples de petite et grande famille. Peu à peu, l'idée d'utiliser un moyen de contraception devint moins honteuse. Quand les hôpitaux commencèrent à promouvoir le contrôle des naissances, avec le soutien d'un gouvernement progressiste et des fonds de la banque mondiale, de fortes oppositions culturelles avaient déjà été vaincues. Des Kenyans demandèrent aux médecins de la ville : "nous savons que les européens font juste le nombre d'enfants qu'ils veulent. Comment pouvons-nous faire ainsi ?".

Toutefois, il y a un grand pas entre connaître l'existence de la contraception, s'autoriser à l'envisager, et l'adopter. Comme le démontrent les études de terrain menées par Naomi Rutenberg et Suzan Watkins [Rutenberg et Watkins, 1997] dans les années 1994-1995, il faut également comprendre le fonctionnement de l'innovation, obtenir l'accord du cercle familial, et vaincre les peurs naturelles renforcées par des rumeurs persistantes.

Lorsque les auteurs arrivèrent sur le terrain, et qu'ils décrivent leur volonté de mener une étude sur les discussions interpersonnelles à propos de la pilule contraceptive, leur contact local s'exclama : "Ah, les mythes et les rumeurs!". Il apparut que de nombreuses craintes se propageaient et s'auto-renforçaient parmi les femmes. Comme le disaient les travailleurs sociaux : "le problème, c'est qu'on les informe, mais qu'aussitôt après elles discutent entre elles, et prêtent plus attention à leurs mythes". Par nature, les informations

transmises par des travailleurs sociaux locaux proviennent de blanches ; or la médecine valable pour les blanches, ou les femmes d'une autre région, est souvent considérée comme inadaptée pour ces femmes. Les auteurs décrivent une femme qui, à peine sortie d'un entretien, s'est précipitée sur un balayeur pour se faire expliquer et confirmer les informations reçues [Rutenberg et Watkins, 1997].

La rumeur court que la pilule fait mettre au monde des enfants malformés. Ils auront des yeux en plus ou en moins, plusieurs têtes, pas de peau, ou des cornes. Certaines femmes affirment avoir vu de tels enfants. "La natalité est perçue comme une force puissante", expliquent les auteurs. "Pour s'y opposer, il faut donc une force encore plus grande, qui est capable de produire des enfants avec des cornes ou quatre yeux". L'oubli de la pilule, sur lequel insistent les formateurs, est parfois supposé mener à de tels problèmes. Certaines femmes estiment que la pilule réduit le désir - "c'est exactement pour cela qu'on la prend !" répond une femme avec bon sens. L'ensemble de ces perceptions subjectives des risques de la pilule contribue à en freiner l'adoption. Faute d'une compréhension plus précise du fonctionnement de la pilule contraceptive, ces raisonnements ne manquent pas de logique. Afin de contrer ces rumeurs, des groupes de discussions furent organisés, et les travailleurs sociaux furent formés à répondre avec tact à ces affirmations. Par ailleurs, les auteurs remarquent que le test sanguin rassure les femmes, qui le considèrent comme une vérification que la pilule "rythme" avec leur corps. Une simple prise de tension peut rassurer suffisamment les jeunes femmes en supprimant l'impression que le produit n'est pas adapté à leur corps de Luo.

L'influence normative d'une mère convaincue de ces risques est importante sur sa fille ou belle-fille. "Seule une belle-mère intelligente tolérerait le planning familial ; mais il n'y a pas de belle-mère intelligente !" plaisante une jeune femme pendant un entretien. Des sociologues étudièrent cette influence sociale (par exemple [Behrman *et al.*, 2002, Kohler *et al.*, 2001]), afin de comprendre avec qui les femmes parlaient de la contraception, et lesquelles de ces conversations avaient un impact important. Il apparut que, de façon générale, les femmes discutent beaucoup entre elles mais peu avec les hommes (93% des conversations tenues sur la contraception par les femmes ont eu une femme pour interlocuteur). La contraception est d'ailleurs un sujet de conversation délicat dans un couple - environ 20% des femmes qui prenaient la pilule le faisaient sans en informer leur mari. Lorsque des femmes de la même génération discutent, la pression sociale joue également en faveur de la contraception. "Voilà pourquoi quelqu'un peut vous convaincre d'utiliser un moyen de contraception. Elle vous dit : 'moi, j'ai pris ça, et c'est bien. Peut-être que pourriez y aller et l'essayer'". De façon générale, plus une femme connaît de femmes utilisant la pilule, plus grande est la probabilité de l'adoption [Behrman *et al.*, 2002].

## 3.1 Point de vue de l'institution

### 3.1.1 Acteurs de la diffusion d'innovations

#### L'institution

L'institution est une entité qui cherche à faire adopter une innovation. L'institution peut être une entreprise, un organe gouvernemental, une association ou toute autre

structure. Dans bien des cas, l'institution est en réalité un conglomerat plus ou moins soudé d'entités orientées vers un même but, que l'on analyse par simplification comme une entité unique. Le but principal de l'institution est de maximiser la proportion d'adoptants potentiels qui adopteront l'innovation. De façon secondaire, elle cherche aussi à réduire le coût de diffusion de son innovation, en particulier en réduisant le budget de communication (média de masse, agents de changement). Il est souvent utile de prévoir la durée de cette diffusion, afin de dimensionner la chaîne logistique sollicitée pendant la diffusion (stocks de produits, formation de personnel ou infrastructures), et éventuellement de prévoir le renouvellement d'une génération de produits.

### L'innovation

L'innovation est définie par Rogers comme *une idée, une pratique ou un objet perçu comme nouveau par un individu ou une unité d'adoption* [Rogers, 2003, p. 12]. On étudie en diffusion d'innovations les cas dans lesquels les adoptants ont la liberté d'adopter ou non l'innovation : le médecin est souverain dans ses prescriptions, tout comme le paysan conserve son libre arbitre pour sa gestion de l'eau. Notons que l'institution peut, dans certains cas, modifier les caractéristiques de l'innovation elle-même pour faciliter son adoption.

Le concept général d'innovation, tout comme le concept d'agent (2.2), permet d'étudier des phénomènes variés sous un même point de vue ; il s'avère parfois utile de raffiner ce concept [Garcia et Calantone, 2002]. Une **innovation incrémentale** est une amélioration d'un produit ou concept existant : nouvelle génération d'un produit, évolution d'une technologie, modification d'une pratique. Par exemple, la pilule contraceptive micro-dosée est une évolution de la pilule traditionnelle, qui introduit des éléments de nouveauté propres, mais repose en grande partie sur l'acceptation du principe de planification familiale et sur les croyances déjà acceptées pour la pilule classique. En réalité, les innovations de rupture sont rares ; la plupart des innovations étudiées sont donc innovations incrémentales [Gerwin, 1988]. Une **innovation préventive** est une innovation dont les effets ne sont pas immédiatement visibles [Rogers, 2003, p. 176]. Le port du préservatif, arrêter de fumer, se vacciner, réduire la vitesse sur les routes, faire bouillir l'eau sont des innovations préventives. Une **innovation tabou**, au sens de Rogers [Rogers, 2003, p. 85], est une innovation considérée comme extrêmement privée et personnelle. Cette perception est principalement définie par les normes sociales de la population visée. Par exemple, le planning familial a longtemps été une innovation tabou au Kenya.

### Population

Les adoptants peuvent être des individus, des foyers ou des structures (entreprises, associations). D'autres entités sont parfois étudiées comme les unités de production agricoles, les hôpitaux, les couples, en fonction de l'innovation étudiée. Par adoptants, nous entendons les *adoptants potentiels* ciblés par l'innovation. La population d'adoptants est *hétérogène*. Les individus se distinguent notamment par leurs croyances, leurs aptitudes,

leur budget (financier et temps), leurs motivations et d'autres caractéristiques socio-démographiques. Afin de pouvoir étudier une population, sa diversité est généralement simplifiée sous forme de *segments* qui regroupent des adoptants ou consommateurs partageant de mêmes caractéristiques. La segmentation dépend de l'objectif de son investigateur ; on peut segmenter sur le cycle de vie, le style de vie [Cathelat, 1990], les types de loisirs, la catégorie socio-professionnelle et d'autres critères. Rogers a proposé une segmentation basée sur la propension plus ou moins innovatrice des individus (cf 7.3 p. 159).

On sait aussi que les adoptants potentiels diffèrent par leur comportement de communication - certains discutent plus naturellement des nouveautés que d'autres - ainsi que leur force de persuasion. Les *leaders d'opinion* sont les adoptants potentiels qui disposent d'une influence plus importante sur leurs accointances par leur charisme, leur expertise reconnue et/ou leur statut social.

### 3.1.2 Outils et variables décisionnelles

Variables décisionnelles	
[VD 1] Communication institutionnelle	L'institution décide du contenu du message institutionnel, choisit un média de masse en fonction de l'audience ciblée et détermine l'exposition au message (3.1.2).
[VD 2] Agents de changement	L'institution peut choisir des agents de changement qui transmettront un message donné (3.1.2).
[VD 3] Créer une image subjective	L'institution peut influencer l'image subjective de son innovation par la communication de masse, le branding et le marketing événementiel (3.1.2).
[VD 4] Provoquer du bouche à oreille	L'institution peut faciliter le bouche à oreille sur son produit en en faisant un sujet dont les gens désirent parler, ou en créant un événement associé au produit permettant d'en faire parler (3.1.2).
[VD 5] Changer l'innovation	Dans certains cas, l'institution peut modifier les caractéristiques de l'innovation pour faciliter sa diffusion.

TAB. 3.1: Variables décisionnelles de l'institution

### Communication institutionnelle de masse

Afin de promouvoir son innovation, l'institution envoie de la publicité par canaux de masse ; elle choisit le canal de masse qui transmettra l'information, le contenu du message transmis, ainsi que la fréquence d'émission du message. Les médias de masse sont *les canaux qui permettent à un émetteur d'envoyer un message à une large audience* [Rogers, 2003, p. 205]. Ils diffèrent par les caractéristiques et la taille de leur audience, mais aussi par l'attention des récepteurs aux messages et leur coût [Armstrong et Kotler, 2007]. Les gens tendent généralement à *s'exposer sélectivement* aux médias qui sont d'accord avec leurs opinions, ou qui transmettent des informations correspondant à leurs centres d'intérêt [Rogers, 2003, p. 171]. L'exposition d'un individu à un canal de masse en fonction de ses caractéristiques idiosyncratiques, ou inversement la caractérisation de l'audience d'un canal de masse, sont relativement bien

connues. En effet, les organes qui gèrent ces canaux ont intérêt à établir des statistiques précises et régulièrement actualisées de leur audience, afin d'améliorer la satisfaction de leurs clients et/ou pour monnayer des temps d'audience.

La communication institutionnelle s'apparente généralement à de la publicité, définie comme *une communication qui prend le parti d'une organisation (entreprise, administration ou autre), d'une personne, d'une idée, d'une marque ou d'un produit* [Lendrevie *et al.*, 2006, p. 517]. La publicité est une communication intrusive, non désirée par le récepteur, qui doit donc attirer l'attention sur son message. Ce message est court, pour des raisons de coût mais aussi de limites d'attention; le volume d'information transmis est donc réduit à l'essentiel (une seule idée) [Lendrevie *et al.*, 2006, p. 316-20].

La publicité ne vise pas à persuader ou à conduire immédiatement à l'adoption d'une innovation ni d'un produit. Comme exposé dans le *Mercator* [Lendrevie *et al.*, 2006, p. 517] : *“le but de la publicité n'est pas l'information pour elle-même, mais la création ou la stimulation du désir en donnant de l'intérêt à des produits et à des marques qui parfois n'en ont guère. La publicité crée rapidement de la notoriété; elle construit - plus lentement - des images. Dans certains cas, elle peut, à elle seule provoquer l'achat, mais le plus souvent, elle n'est qu'un des moyens d'un dispositif commercial plus vaste.”*. Un constat similaire est dressé en diffusion d'innovations : la publicité permet essentiellement de faire connaître l'innovation, et non de persuader de ses bénéfices [Rogers, 2003, p. 205].

En pratique, le flux de communication se fait en deux temps : la publicité attise la curiosité de quelques récepteurs, qui vérifient et propagent ensuite cette information par communication interpersonnelle (*two-steps flow model* [Lazarsfeld *et al.*, 1944, p. 151]). Les recherches sur l'*agenda-setting* concluent que la communication de masse n'est pas capable de changer des croyances préexistantes, mais qu'elle est par contre très efficace pour faire penser à des sujets précis [Cohen, 1963].

### **Agents de changement**

L'institution peut utiliser des agents de changement, c'est-à-dire des individus extérieurs à la population qui exercent une influence en faveur (ou défaveur) de l'innovation. Dans la diffusion de la pilule contraceptive, les agents de changement sont les dispensaires, les hôpitaux et le personnel médical. Dans d'autres cas, il peut s'agir d'enseignants, de consultants ou encore de vendeurs. Ils nouent des contacts interpersonnels avec les adoptants potentiels, ce qui leur permet de mieux comprendre leurs besoins, de raisonner leurs inquiétudes, de discuter leurs arguments ou de leur expliquer le fonctionnement de l'innovation. En résumé, le rôle des agents de changement est de donner les clés pour que les autres comprennent l'avantage de l'innovation [Rogers et Shoemaker, 1971].

### Créer une image subjective de l'innovation

Le marketing a subi des évolutions importantes pendant les quatre dernières décennies, qui reflètent des changements profonds dans le fonctionnement de la société. Pendant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, les grandes entreprises étaient essentiellement des industries qui commercialisaient des biens répondant à des besoins primaires, ou des inventions récentes : téléphone, électricité, automobile ou réfrigérateur. Adopter l'une de ces innovations exigeait un changement de mode de vie et de mode de pensée. La publicité s'en tenait alors à son strict sens de réclame : faire connaître l'existence des nouvelles technologies, et démontrer l'apport de ces innovations pour les populations ciblées.

Toutefois, dans la seconde partie du 20<sup>ème</sup> siècle, qui produisit à profusion après les rigueurs de la seconde guerre mondiale, on commença à réaliser l'immense pouvoir de la marque. La production de masse, la concurrence grandissante sont sans doute des paramètres déterminants de l'avènement du *branding* (création d'une identité de marque). Les logos commerciaux (Quaker Oats, Heinz) permettaient d'identifier un produit parmi les multiples choix ; mais ils permettaient aussi de rendre familiers ces produits inconnus, et de restaurer artificiellement une image rurale à ces produits d'usine [Lupton, 1996]. En 1988, lorsque l'entreprise "Kraft" se revendit au double de sa valeur, il était devenu évident que l'image d'une marque était devenue suffisamment importante pour être considérée comme une part du capital d'une entreprise [Klein, 1999]. Ces industries ont rapidement exploité les nouveaux médias de masse - radio, télévision - qui, ne reposant pas sur l'écrit, permettaient de toucher une plus grande partie de la population. Entre 1979 et 1998, les dépenses publicitaires aux Etats-Unis passèrent de 50 à 200 milliards de dollars américains. La publicité cherche désormais à *construire une image pour les produits ou les marques*, généralement en ciblant des besoins psychosociaux tels que l'estime personnelle, la séduction ou la liberté. La marque Nike fut positionnée comme un symbole d'émancipation des normes sociales : "Just do it!". Marlboro a imposé ses cigarettes aux hommes par une image du cowboy solitaire, puis aux femmes comme un symbole d'émancipation. Cette image de marque est souvent créée en associant un élément existant perçu favorablement (événement, sportif célèbre, star de cinéma) et le produit ou la marque.

La création d'images subjectives n'est pas propre à la vente de produit. Par exemple, les professionnels de santé possèdent des représentations subjectives de chaque solution contraceptive, qui influencent vraisemblablement leurs recommandations [Bianchi-Demicheli *et al.*, 2006]. Si une institution désire favoriser la pilule contraceptive masculine en Europe, elle devra affronter l'inquiétude de la perte de masculinité [Kalampalakis et Buschini, 2007]. Tout comme la cigarette a été vendue aux femmes comme symbole de libération, il sera alors nécessaire de présenter la contraception masculine sous un angle positif et masculin (image de responsabilité, par exemple). De même, les utilisateurs de véhicules polluants sont progressivement stigmatisés dans la population, ce qui devrait favoriser l'adoption de moyens de

déplacement moins polluants. *L'institution peut influencer l'image subjective de l'innovation afin de faciliter son adoption.*

### Faire parler du produit (marketing viral)

L'intérêt pour le marketing viral est né de quelques cas de diffusion rapide de produits sans communication de masse. La messagerie électronique Hotmail, en moins de 18 mois, avait atteint 12 millions d'utilisateurs pour un budget publicitaire inférieur à 500 000 dollars US. Ce service s'est fait connaître par une petite ligne publicitaire ajoutée à la fin de chaque courriel envoyé par un utilisateur de cette messagerie. De nouveaux services récents, notamment ceux proposés par la firme Google, se sont développés de façon similaire. Les vidéos qui intéressent les internautes sont rapidement transmises à des amis, conduisant à des nombres de consultations qui approchent l'impact des chaînes de télévision pour les segments jeunes de la population.

Ces exemples ont démontré l'avantage du marketing viral, dont la promesse est : "laissez vos clients faire votre publicité" [Bulkeley, 2002]. Exprimé de façon plus rigoureuse, il s'agit de donner envie aux consommateurs d'utiliser leur réseau social préexistant pour parler du produit [Wilson, 2000b]. Le marketing viral permet, à condition que les gens aient envie de propager leur message, de faire connaître leur produit pour un coût dérisoire. L'essor des nouvelles technologies de l'information (Web et courriel notamment) facilite d'ailleurs les communications interpersonnelles. Les entreprises étant devenues plus sensibles à leur image, ce bouche à oreille apparaît également comme un risque potentiel qu'il convient de comprendre et de maîtriser.

Depuis quelques années, les entreprises testent des campagnes de marketing viral à des échelles plus ou moins importantes. Des mesures de viralité des produits sont proposées. Le but est de parvenir à investir les conversations quotidiennes pour faire parler de leur produit. Le marketing événementiel constitue d'ailleurs un outil du marketing viral, en créant un événement qui attire l'attention afin de faire parler indirectement du produit lui-même. Toutefois, ce phénomène demeure imprévisible [Kalyanam *et al.*, 2007] et difficile à provoquer volontairement [Wilson, 2000b]. Les entreprises cherchent donc à mieux comprendre ce phénomène de bouche à oreille.

Plus généralement, le contenu, la fréquence et la structure des interactions communicationnelles s'avèrent cruciales en diffusion d'innovations. L'exemple de la contraception au Kenya a démontré que les rumeurs suffisent à créer une mauvaise image de l'innovation et à ralentir sa diffusion. Il est donc devenu courant d'étudier ces facteurs dans les études de terrain (par ex., contraception en Corée [Kohler, 1997] ou au Kenya [Bühler et Kohler, 2003, Watkins *et al.*, 1995a]).

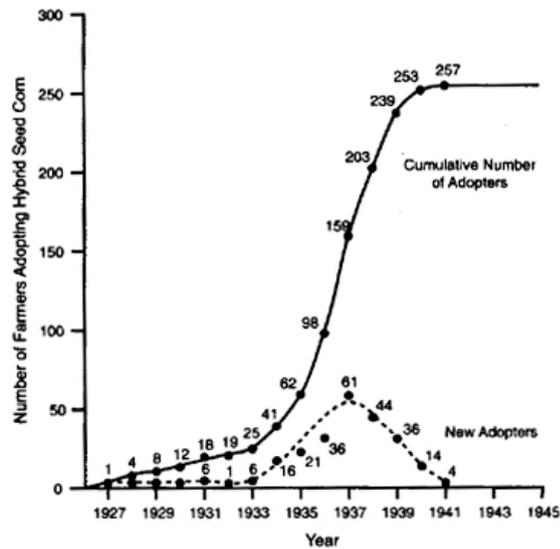


FIG. 3.1: Adoption cumulée et instantanée pour les semences de maïs hybrides [Ryan et Gross, 1943]

## 3.2 Diffusion d'innovations : analyse macroscopique

### 3.2.1 La courbe en "S"

Si l'on dessine la courbe des adoptions cumulées d'une diffusion d'innovation dans le temps, elle dessine une courbe en "S" (figure 3.1). Cette courbe est expliquée par le processus interpersonnel qui conduit à l'adoption, notamment en différenciant des typologies d'adoptants.

**Lancement** Au départ, seul un nombre limité de personnes adoptent l'innovation. Ces primo-adoptants, parfois appelés innovateurs, s'estiment capables d'évaluer seuls les qualités de l'innovation ou peuvent prendre le risque lié à son adoption. Par exemple, ils peuvent avoir un budget plus élevé qui leur permet d'investir sans grand risque dans une nouvelle technologie. Leur expertise peut leur permettre de comprendre avant les autres les bénéfices de l'innovation.

**"Décollage"** (takeoff) Si un nombre suffisant de primo-adoptants est atteint, ceux-ci sont susceptibles de fournir explications et recommandations à leur réseau social. Les autres catégories d'adoptants sont moins convaincues des bénéfices de l'innovation, ne peuvent pas prendre le risque de l'adopter ou n'ont simplement pas le moyen de l'adopter ; ils attendent donc ces conseils des primo-adoptants pour réduire l'incertitude sur l'innovation. On appelle masse critique le nombre d'adoptants requis pour que le processus d'adoption devienne auto-suffisant.

**Croissance exponentielle** Chaque nouvel adoptant constitue un exemple supplémentaire à ses proches et amis. La pénétration de l'innovation dans la population se fait donc de plus en plus rapide.

**Ralentissement** Enfin ne restent dans la population que très peu de personnes à ne

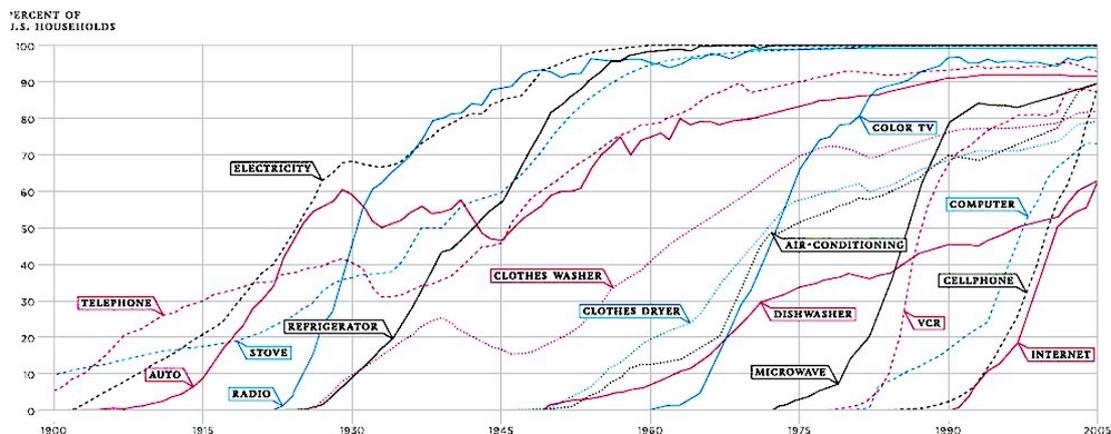


FIG. 3.2: Evolution du pourcentage des foyers états-uniens possédant des innovations technologiques entre 1900 à 2005.

pas avoir adopté. Il peut s'agir de personnes qui n'ont pas les moyens d'investir dans l'innovation, n'en ont pas l'intérêt, ou manifestent une opposition quelconque à l'innovation. Les adoptions se font plus rares, et la pénétration maximum de l'innovation sera lentement atteinte.

Cette courbe est, bien sûr, stylisée. Toutefois, comme on peut le constater sur la figure 3.2, de nombreuses innovations respectent approximativement ce schéma. La courbe en "S" est devenue emblématique de la diffusion d'innovations ; il est aujourd'hui inconcevable de proposer un modèle qui ne la reproduise pas.

### 3.2.2 Biais pro-innovation

La diffusion d'innovations est maintenant systématiquement associée à la courbe en "S". Pourtant, comme le souligne Rogers, cette courbe représente la diffusion *réussie* d'une innovation. Rogers note que la plupart des recherches ont porté sur les cas de diffusions réussies [Rogers, 2003, p. 106]. Ce biais, qu'il nomme *biais pro-innovation*, est selon lui dû à plusieurs causes. Tout d'abord, l'institution surévalue naturellement les qualités de son innovation, et s'avère incapable de se mettre dans la position des adoptants potentiels. Les services sanitaires qui voulaient faire bouillir l'eau à Los Molinas n'ont pas un instant envisagé un refus de la population, tant la solution était apparemment adéquate. Par ailleurs, il existe davantage de données sur des cas d'innovations réussies (chiffres de ventes) que sur les échecs d'innovations. Le protocole même de collecte des données est généralement centré sur une collecte après diffusion. Enfin, il semble naturellement plus édifiant d'étudier les recettes de succès que celles des échecs.

Limiter l'étude de la diffusion d'innovations aux diffusions réussies revient en quelque sorte à étudier le corps humain sur des sujets sains : on peut comprendre ce qui se passe

quand tout fonctionne de façon optimale, mais cela éclaire peu sur les causes de maladie. Or, comme le souligne Gabriel Tarde, de nombreuses innovations - la plupart, sans doute - échouent. L'objectif principal d'une institution est précisément d'éviter l'échec de son innovation. *Il faut donc étudier l'échec autant que le succès pour le comprendre, l'anticiper et l'éviter.*

### 3.2.3 Causes de succès ou d'échec

Pour Rogers, la réussite, ou l'échec de diffusion d'une innovation s'expliquent par cinq facteurs principaux [Rogers, 2003, pp 240-259].

**Avantage relatif** L'avantage relatif est le degré auquel une innovation est *perçue* comme étant meilleure pour l'individu que l'idée qu'elle précède. L'innovation peut être meilleure par une augmentation des bénéfices apportés : gain financier, prestige, plus grande simplicité. Elle peut également être meilleure car elle implique moins de sacrifices : coût inférieur, temps de formation moindre, pas d'indisponibilité, risque moins élevé, etc.

**La complexité** est le degré auquel une innovation est perçue comme difficile à comprendre et à utiliser [Rogers, 2003, p. 257]. Le fonctionnement de la pilule contraceptive est incompris de la plupart de femmes Luo, ce qui laisse libre court à leurs inquiétudes. De nombreuses personnes ont peur d'approcher une innovation technologique (ordinateur, électronique) car elles se sentent incapables de l'utiliser.

**La testabilité** est la possibilité d'essayer l'innovation sur une base limitée [Rogers, 2003, p. 258]. Un agriculteur peut tester un nouvel engrais sur une portion limitée de ses terres avant de décider de l'étendre à toutes ses cultures. Avant d'acheter un téléphone portable, on peut l'essayer chez un ami ou en boutique. Par contre, tester la pilule contraceptive induit un risque perçu sur sa propre santé.

**L'observabilité** est le degré auquel les résultats d'une innovation sont visibles pour les autres [Rogers, 2003, p. 258]. Un champ florissant grâce à un engrais indique immédiatement les avantages de cet engrais pour le volume de production immédiat. Par ailleurs, une innovation visible provoque la discussion et permet à un plus grand nombre de personnes de découvrir l'innovation.

**Compatibilité** La compatibilité est le degré auquel une innovation est perçue comme consistante avec les connaissances, valeurs et besoins des adoptants potentiels. La compatibilité réduit l'incertitude provoquée par l'innovation [Rogers, 2003, p. 240].

- **Connaissances permettant la compréhension** : les paysans de Los Molinas ne connaissaient pas la théorie des germes, et ne pouvaient donc pas comprendre l'avantage de faire bouillir de l'eau (1.1). L'incompréhension ou la mauvaise compréhension de l'innovation constituent pour Rogers la cause de nombreux échecs. La compréhension est conditionnée par la possession de connaissances (souvent dites "expertes") permettant de comprendre et d'interpréter les informations, ce qui permet de percevoir les avantages de l'innovation. Dans une

étude menée aux Etats-Unis, il est apparu que la plupart des adultes ne comprenaient que 60 à 70% des spots publicitaires [Jacoby *et al.*, 1987].

- **Croyances incompatibles avec l'innovation** : dans certains cas, les croyances sont incompatibles avec le message institutionnel. Par exemple, la croyance des Kenyanes que la pilule contraceptive a rendu des femmes infertiles, ou qu'elle fait naître des enfants malformés, est incompatible avec les messages rassurants provenant de l'institution. On retrouve des croyances équivalentes dans de nombreux cas. Par exemple, un opérateur de téléphonie connu pour avoir un mauvais SAV ne parviendra pas facilement à convaincre les consommateurs qu'il s'est amélioré. Selon la théorie de la dissonance cognitive [Festinger, 1957], les croyances incompatibles entre elles provoquent des tensions internes (état de dissonance cognitive) que l'être humain cherche à réduire. Plutôt que réviser d'anciennes croyances, il est souvent plus facile pour le récepteur de rejeter ces nouvelles informations, ou de les interpréter de façon à éviter cette contradiction. Les croyances incompatibles peuvent donc empêcher l'adoption, et nécessitent un processus de persuasion pour être révisées.
- **Valeurs** : avoir de nombreux enfants était un prestige social en Afrique subsaharienne. Cette valeur sociale s'oppose à la notion même de planning familial.
- **Motivations** : ce même planning familial devient toutefois positif quand il répond à un besoin des femmes Kenyanes : offrir une éducation aux enfants, faire autre chose qu'élever des enfants, vivre confortablement.

Pour Rogers, ces cinq caractéristiques d'une innovation (qui dépendent en réalité des caractéristiques des adoptants) constituent les facteurs explicatifs du succès ou de l'échec de la diffusion d'une innovation. Faire bouillir l'eau à Los Molinas n'était pas compatible avec les valeurs ni avec les croyances de la population, malgré un avantage relatif indéniable. La planification des naissances était à l'origine incompatible avec les valeurs culturelles en Nyanza ; fait rare, c'est ici la culture elle-même qui a évolué et est devenue compatible avec l'innovation. Par la suite, l'adoption est freinée par sa complexité et son manque de testabilité, mais se répand notamment par l'observabilité de ses avantages sociaux pour les femmes du village.

L'adoption d'innovations incrémentales est généralement plus rapide que pour les innovations en rupture [Dewar et Dutton, 1986]. En effet, les résistances induites par le manque de compréhension, ou les croyances incompatibles, ont déjà été supprimées lors de la diffusion des précédentes innovations. Ainsi, la première diffusion de pilule contraceptive a dû affronter la valeur "les grandes familles sont riches", les peurs envers la notion de contraception et la pression normative. Un autre moyen de contraception comme le stérilet rencontre ensuite un terrain plus favorable ; les normes sociales ne s'opposent plus à sa diffusion.

### 3.3 Comportement individuel

#### 3.3.1 De l'information à l'adoption

##### Hiérarchie des effets

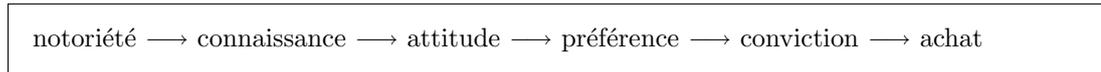


FIG. 3.3: Modèle descriptif de hiérarchie des effets proposé par McGuire [McGuire, 1989]

Le psychologue social McGuire a décrit l'impact de la publicité par le modèle de hiérarchie des effets [McGuire, 1989]<sup>1</sup>. Ce modèle décrit différentes étapes nécessaires pour que la publicité conduise finalement à l'adoption (figure 3.3). Pour McGuire, si une seule des étapes n'est pas satisfaite, il n'y aura pas adoption. Ce modèle a été largement repris dans l'étude de la communication persuasive [Eagly et Chaiken, 1993], ou du comportement du consommateur [Engel *et al.*, 1995a]. De nombreux modèles décrivent des étapes similaires, comme le modèle AIDA (Attention, Intérêt, Désir, Action), le modèle du *Consumer Decision Process* [Engel *et al.*, 1995b] ou le modèle de Prochaska [Prochaska *et al.*, 1992].

##### Processus d'adoption de Rogers

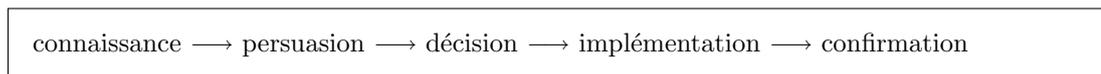


FIG. 3.4: Modèle d'innovation-décision proposé par Rogers [Rogers, 2003, p. 170]

Rogers décompose le processus d'innovation-décision en cinq étapes [Rogers, 2003, pp 168-218] (figure 3.4). L'étape de connaissance (*knowledge*) intervient quand un individu découvre l'existence d'une innovation. Si cette innovation attire son attention, il recherchera éventuellement de l'information pour mieux la comprendre. Pendant l'étape de *persuasion*, l'individu forme une attitude favorable ou défavorable envers l'innovation. Afin de comprendre les bénéfices et inconvénients de l'innovation pour lui, il recherche activement de l'information. Lors de la *décision*, l'individu s'engage dans des activités qui mènent à l'adoption ou au rejet de l'innovation. Rogers nomme *implémentation* le moment ou la période pendant laquelle l'innovation est mise en pratique. Si l'innovation peut être testée sur une base limitée, cette mise en oeuvre sera

<sup>1</sup>En réalité, McGuire a proposé plusieurs versions de la hiérarchie des effets qui varient légèrement [McGuire, 1968, McGuire, 1976]

plus probable. La *confirmation* correspond à la perception de l'innovation après cette mise en pratique, qui mène éventuellement à son abandon. On notera que ce modèle est compatible avec ceux qui ont été décrits précédemment.

La *recherche d'information* a lieu pendant les étapes de connaissance et de persuasion. Elle permet à l'adoptant potentiel de *réduire l'incertitude sur les avantages et inconvénients de l'innovation*. Il peut à la fois découvrir les caractéristiques de l'innovation et vérifier les informations qu'il possède, mais dont la crédibilité ne semble pas suffisante [Weigts *et al.*, 1993] (par exemple, une information reçue par la publicité est rarement considérée comme suffisante pour adopter). La recherche d'information par des canaux interpersonnels permet de récupérer de l'information que l'on ne peut pas ou ne veut pas vérifier soi-même [Deutsch et Gerard, 1955], permettant une forme d'apprentissage par procuration [Bandura, 2001].

L'émission d'information peut avoir lieu pendant toutes les étapes du processus, y compris avant adoption ; par exemple, peu de gens achètent le dernier modèle de Ferrari, mais beaucoup en parlent avec enthousiasme. Ces émissions d'information peuvent survenir dans une discussion informelle (“Tiens, tu as entendu parler de [...]”) ou une recommandation (“Si tu dois choisir [...], je te conseille [...]”). Une recommandation est la transmission d'un avis favorable ou défavorable à propos d'une innovation. La recommandation engage la réputation de l'émetteur d'information ; si la recommandation est mauvaise, l'émetteur perdra en crédibilité auprès de son interlocuteur. Plusieurs sujets nous ont expliqué ne pas recommander les produits qu'ils n'ont pas testé par eux-mêmes. Cela signifie notamment qu'un individu ne va pas systématiquement relayer une information si il ne l'a pas suffisamment vérifiée. En pratique, il est très rare d'observer une recommandation qui ne soit pas argumentée ; une recommandation est donc constituée par un avis et les connaissances qui justifient cet avis.

### 3.3.2 Description des étapes intermédiaires

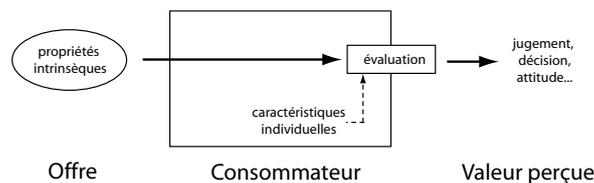


FIG. 3.5: Schéma classique de la perception d'une innovation

#### Valeur perçue

Le domaine marketing de la valeur perçue propose des observations qualitatives sur chacune des étapes d'adoption [Holbrook, 1999, Woodall, 2003]. La valeur désigne la capacité perçue d'un produit à satisfaire un ensemble de besoins

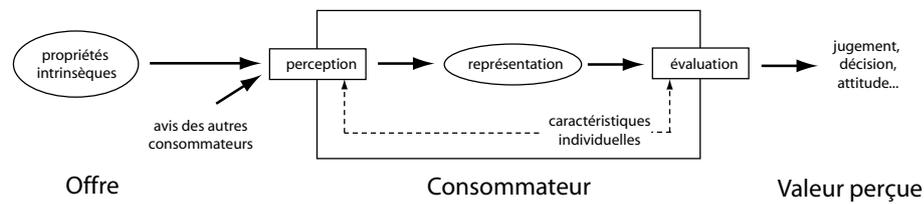


FIG. 3.6: Schéma subjectif de la perception d'une innovation

[Kotler et Dubois, 1999]. La valeur perçue évolue dynamiquement avec l'évolution de la perception subjective de l'information. Cette valeur perçue dépend naturellement des caractéristiques de l'innovation, ainsi que des motivations et besoins de l'individu. Avant l'adoption, l'adoptant potentiel forme des attentes sur l'innovation ; la valeur perçue après adoption dépendra de la satisfaction ou dissatisfaction de ces attentes [Anderson, 1973]. La valeur perçue est subjective, non seulement par les motivations idiosyncratiques de l'individu (paradigme classique présenté en figure 3.5), mais aussi parce que l'évaluation dépend de l'image subjective de l'innovation (figure 3.6). Quand elle est quantifiée, la valeur est considérée comme un ratio ou une différence entre les bénéfices perçus et les sacrifices perçus, avec quelques variantes mineures ([Kotler et Dubois, 1999, Sawyer et Dickson, 1984, Buzzel et Gale, 1987, Monroe et Krishnan, 1985]).

### Attitudes

Plusieurs modèles, dont ceux de Rogers et de McGuire, utilisent la notion d'attitude comme étape de persuasion préalable à la décision. Une partie de la recherche en diffusion d'innovations utilisait le paradigme KAP (*Knowledge, Attitudes, Practice*). Par exemple, les travaux sur la contraception mesurent l'attitude favorable ou défavorable envers le planning familial. Ce concept semble donc incontournable dans le domaine. Une attitude est définie en diffusion d'innovation comme une *organisation relativement endurante des croyances d'un individu pour un objet qui le prédispose à l'action* [Rogers, 2003, p. 174]. Une attitude est aussi définie comme une prédisposition apprise à répondre de façon favorable ou défavorable envers un objet donné [Fishbein et Ajzen, 1975, page 6]. Pour Breckler, les attitudes sont des représentations mentales et neuronales, organisées par l'expérience, qui dirigent ou influencent dynamiquement le comportement [Breckler et Wiggins, 1992, p. 409]. On considère souvent que l'attitude est composée des facteurs affectif, cognitif et le conatif (voir par ex [Breckler, 1984, Ostrom, 1968]). Par exemple, j'apprécie la cigarette (affectif), mais fumer nuit à la santé (cognitif) ; je prévois donc d'arrêter de fumer (conatif). Les définitions du concept d'attitude sont nombreuses. Ce concept est suffisamment peu clair pour que Serge Moscovici lui-même le définisse ironiquement : "les attitudes sont ce sur quoi portent les recherches expérimentales sur les changements d'attitudes" [Moscovici, 1998, p 90].

Les attitudes nous permettent d'exprimer la persuasion, une forme de jugement et une prédisposition à l'action. Néanmoins, ce concept d'attitude ne pourra être utilisé rigoureusement en modélisation que si l'attitude est réellement corrélée à la prise de décision. Or, il subsiste des interrogations sur le lien attitude/comportement (problème connu dans la littérature comme le *attitude-behavior problem* [Rogers, 2003, p. 176]). L'exemple le plus marquant est sans doute celui de la télévision : interrogés, la plupart des gens ont une attitude défavorable envers la télévision, mais la regardent néanmoins tous les jours. Dans une review sur le sujet, Wicker [Wicker, 1969] démontrait que ce lien est au mieux inconnu, sinon inexistant. En réaction à cet article, les psychologues sociaux se sont efforcés de justifier ce lien. Plusieurs modèles ont été élaborés - notamment par Fishbein et Ajzen [Fishbein et Ajzen, 1974, Ajzen et Fishbein, 1980] ou Fazio et Zanna [Fazio, 1986, Fazio et Zanna, 1981, Zanna et Fazio, 1982]. Néanmoins, ces modèles restreignent souvent drastiquement la notion d'attitude. Ainsi, les attitudes peuvent prévoir le comportement ([Myers, 1987]) si : (a) les influences des autres sont minimisées, (b) l'attitude est spécifique à cette action et (c) si l'attitude remonte à un niveau conscient lors de l'action (parce qu'elle est très forte ou que quelque chose la ramène en mémoire, comme le fait d'avoir défendu cette opinion récemment). Si ces conditions ne sont pas vérifiées, la corrélation entre attitude et action est faible.

Ajzen a ensuite proposé la Théorie du comportement planifié (*Theory of Planned Behavior*) [Ajzen, 1988, Ajzen, 1991], qui relâche les points (a) et (b). Il propose de prendre en compte dans son modèle la notion de norme sociale, et celle de capacité perçue à agir. Ce modèle a été appliqué à différents problèmes [Ajzen, 1991, Eagly et Chaiken, 1993, Albarracin *et al.*, 2001], avec des résultats prometteurs. Toutefois, dans une évaluation indépendante, Armitage et Conner [Armitage et Conner, 2001] mettent en relief une capacité prédictive nettement plus discutable : les intentions déclarées par les sujets sur l'utilisation future du produit s'avèrent plus fiables que les prédictions de cette théorie.

En résumé, les attitudes constituent un concept intéressant pour quantifier la perception plus ou moins positive des individus envers une innovation. Leur utilisation dans un modèle de population nous semble toutefois prématurée au regard des faibles capacités descriptives des modèles de décision actuels. Le concept d'attitude va plus loin que la simple notion d'évaluation intermédiaire, ce qui rend sa description malaisée. Pour décrire une évaluation intermédiaire correspondant à un compris entre qualités et défauts, la notion de valeur perçue semble plus pertinente que celle d'attitude.

### 3.3.3 Croyances de l'individu

#### Croyances ou connaissances ?

Dans de nombreux cas, on constate que les croyances sur l'innovation sont manifestement fausses. Par exemple, de nombreuses Kenyanes pensent que la pilule va faire couler le sang du nez et de la bouche, et risque de provoquer la naissance d'enfants à deux têtes ou sans peau [Rutenberg et Watkins, 1997, p. 297]. Au Kenya, après une dizaine

d'années d'information sur le VIH, 5% des hommes pensent encore que les préservatifs transmettent le VIH [KDHS, 2003a, p. 204]. Notons qu'une croyance peut être issue de l'expérience et fautive ; de nombreux sujets interrogés sur l'iPhone pensent qu'il est doté d'un appareil photo de très bonne qualité. Or objectivement, l'iPhone ne dispose que d'un appareil médiocre au regard de la concurrence, et la moindre comparaison révèle ce fait objectif. Cette connaissance est pourtant justifiée : les sujets ont vu des photos de l'iPhone sur le grand écran de cet appareil, et cette plus grande taille leur donne l'impression que la qualité de la photographie est meilleure.

Si l'on reprend la distinction faite par Platon (*Theaetetus*), la connaissance est la partie des croyances vraies justifiées. Encore faut-il croire en l'existence d'une vérité ultime et unique (objectivisme). Si l'on peut quantifier objectivement certaines caractéristiques d'un produit (poids, taille, prix), d'autres sont hautement subjectives, et ne connaissent pas de réalité universelle. Un téléphone portable sera trop gros pour l'un, trop petit pour l'autre ; un prix donné quantitativement sera évalué comme trop cher ou raisonnable en fonction du budget. Un téléphone sera beau pour certains et laid pour d'autres. On peut donc rarement se référer à une réalité absolue et unique ; la plupart du temps, cette réalité dépend de la perception subjective des individus (subjectivisme). C'est pourquoi nous parlerons de *croyances* des adoptants potentiels plutôt que de connaissances.

### Degrés de croyance

Les différentes étapes d'adoption, ainsi que la recherche d'information, ne peuvent exister que si l'on suppose l'existence de différents *degrés de connaissance* : il faut d'abord savoir *quelque chose* sur une innovation pour rechercher davantage d'information. Il faut aussi pouvoir estimer "qu'on en sait suffisamment" pour arrêter de rechercher de l'information. Un individu qui n'a jamais entendu parler de l'innovation est dit *unaware* ("non informé"). S'il connaît l'existence de l'innovation, il est dit *aware*<sup>2</sup>. L'*awareness* est souvent quantifiée dans la population, en particulier par les entreprises qui la mesurent par des sondages téléphoniques, afin de vérifier l'impact de leurs campagnes publicitaires. Enfin, de nombreux autres degrés de croyances peuvent exister en terme de contenu et de crédibilité.

### Crédibilité ou support des informations

La crédibilité intervient à plusieurs reprises dans le comportement individuel. La publicité ne permet pas de convaincre la population, car cette information est perçue comme intéressée. Les interactions interpersonnelles ont un impact important car elles apportent une information *plus crédible*. Un adoptant potentiel cherche à réduire l'incertitude sur l'innovation en obtenant des informations *fiabiles*. La révision des croyances

---

<sup>2</sup>Le terme *aware* n'a malheureusement pas d'équivalent simple dans la langue française. Il est ici compris comme "être au courant de l'existence de", ce qui est vrai de tout individu plus ou moins informé.

dépend d'ailleurs logiquement de la fiabilité qu'on leur accorde : une information publicitaire sera plus facilement révisée qu'une expérience personnelle ou que l'avis d'un proche. La crédibilité des informations possédées conditionne d'ailleurs la prise en compte de l'information et le changement de comportement. Ainsi, même si la plupart des gens sont conscients des risques induits par le VIH, ceux qui connaissent directement un proche touché par la maladie se protègent beaucoup plus sûrement [Macintyre *et al.*, 2001].

On doit donc supposer, comme cela est d'ailleurs fait dans de nombreux modèles de représentation des connaissances (*cf.* 5.1.2), que les sujets mémorisent la raison pour laquelle ils croient qu'une information est vraie. On parle de *support* ou de *justification* des croyances. On constate d'ailleurs, tant en entretien que dans les discussions informelles ou les avis disponibles sur les forums Web, que les individus transmettent spontanément la raison pour laquelle ils croient une information. Par exemple, les consommateurs affirment "je possède ce produit depuis trois mois, je peux donc dire que...". Les femmes interrogées dans les études sur la contraception insistent sur la réalité des rumeurs, plusieurs affirmant avoir vu elles-mêmes des enfants nés sans peau ou avec des cornes ; sans cet argument, elles ne seraient pas crues.

Les sources d'information elles-mêmes sont perçues comme plus ou moins crédibles par le récepteur de l'information. Les Kenyanes ne croient pas les informations rassurantes transmises sur la contraception, car elles proviennent de médecins blancs ; or, il leur semble que ce qui est vrai pour les blanches ne l'est pas nécessairement pour elles. D'ailleurs, elles ne prennent pas en compte les expériences des femmes d'autres villages qui sont perçues comme trop différentes pour qu'une comparaison soit possible [Rutenberg et Watkins, 1997]. Les médias de masse ont également des crédibilités perçues différentes : dans une étude portant sur le marché américain, 30% des sondés trouvent la presse écrite crédible, les sites web d'actualité se voient attribuer 9 points de moins et les nouvelles radios seulement 13% [Abdulla *et al.*, 2002]. L'information qui dispose de la plus importante crédibilité est l'expérience personnelle, qui sera très difficile à remettre en cause [Chenghan et Shaffer, 1987]. La crédibilité perçue de l'émetteur est d'ailleurs connue pour être un élément explicatif de la persuasion ou de l'échec de persuasion [Moscovici, 2005].

### **D'où provient l'information ?**

L'information provient de quatre sources principales : les médias de masse, les interactions interpersonnelles, l'expérience personnelle et le raisonnement. L'impact du raisonnement est souvent oublié, bien qu'il intervienne dans de nombreux exemples. Les paysans de Los Molinas ne croient pas en la dangerosité de microbes, car leur raisonnement leur indique qu'un animal suffisamment petit pour être invisible ne peut être nocif. Dans le cas de la pilule contraceptive, de nombreuses femmes croient que la pilule entraîne une perte de désir. Elle ont interprété cette perte de désir comme le but même de la pilule, qui en diminuant le désir diminue logiquement le nombre d'enfants [Rutenberg et Watkins, 1997, p. 300]. Watkins explique l'existence des rumeurs sur les

enfants malformés naissant après la prise de pilule par un raisonnement cohérent : “La reproduction est perçue comme une force puissante ; par conséquent, une chose qui peut la ralentir ou la stopper doit être encore plus puissante, capable de produire un enfant avec quatre yeux ou des cornes” [Rutenberg et Watkins, 1997, p. 298].

### 3.3.4 Adoption

L’adoption d’une innovation, dans le domaine de diffusion d’innovation, est considérée comme un choix entre le *statu quo* et la nouveauté. Dans certains cas, le choix fait intervenir les autres produits ou innovations ; il est alors *comparatif*. Selon le risque pris en adoptant l’innovation, la prise de décision est rapide ou détaillée. Tout comme la valeur, la décision se base sur une image subjective de l’innovation et non sur ses hypothétiques qualités objectives. L’incompréhension de l’innovation peut donc empêcher de percevoir ses qualités.

L’adoption, ou le rejet, dépendent bien sûr des motivations individuelles. Ces motivations peuvent souvent être rapportées aux besoins de Maslow (besoins physiologiques, sécurité, etc.) [Maslow, 1943, Maslow, 1954]. On y trouve notamment le besoin d’intégration sociale, qui est directement lié aux effets de mode et au conformisme aux normes sociales (afin de ne pas être rejeté). On sait que les êtres humains se comportent de façon globalement cohérente avec ces motivations, dans la limite de leurs capacités cognitives [Simon, 1982]. On sait également que l’évaluation de l’innovation, et donc son adoption, est sensible aux biais cognitifs identifiés chez l’humain. Par exemple, on observe souvent un optimisme idéaliste dans la perception des innovations préventives [Weinstein, 1982], chacun pensant être moins exposé que les autres aux risques et se sentant plus réceptif aux messages de prévention. La psychologie de la décision constitue un champ de recherche à part entière [Klein *et al.*, 1993, Zsombok et Klein, 1996], que nous n’approfondirons pas ici.

## 3.4 Interactions

### 3.4.1 Définitions

Nous considérons comme communication interpersonnelles les actes de communication entre deux individus qui mènent à un transfert d’information entre ces deux personnes. Les communications interpersonnelles portent plusieurs noms qui recouvrent des notions différentes. Ces définitions sont souvent imprécises, tant en marketing [Godes *et al.*, 2005] que dans les modèles qui utilisent indifféremment les termes de “rumeur” ou “bouche à oreille”.

**Le bouche à oreille** (word-of-mouth) désigne “*la communication informelle entre parties privées de l’évaluation ou des caractéristiques de biens et services donnés et/ou leurs vendeurs*” [Westbrook, 1987]. Au départ, le bouche à oreille fait uniquement référence aux communications en face à face ; le terme est maintenant élargi aux communications à distance (notamment par courriel et messagerie instantanée) [WOMMA’s Research and Metrics Council, 2005].

**La rumeur** a été étudiée notamment par Prasad [Prasad, 1935], puis par Louis William Stern (1902) en psychologie judiciaire; son protocole d'étude portait essentiellement sur la déformation des informations lors des échanges interpersonnels rapides. La rumeur est définie comme *une discussion publique qui comporte des hypothèses privées* [Rosnow, 1991]. Elle permet notamment de gérer nos anxiétés et incertitudes [Allport et Postman, 1947, Rosnow, 1988, Rosnow, 2001].

**Les bavardages ou ragots** (*gossips*) sont par contre limités à un cercle restreint, parce que le sujet discuté n'intéresse qu'un nombre limité de personnes [Gluckman, 1963].

**Le buzz** (littéralement : “bourdonnement”) est un concept marketing opérationnel qui désigne la création de bouche à oreille à propos d'un produit. On parle de *teasing* pour les opérations qui permettent d'attirer l'attention *avant* la commercialisation du produit. Par extension, le buzz désigne une forte activité de bouche à oreille dans la population à propos d'un produit ou d'une marque. [Engel *et al.*, 1995b, Lendrevie *et al.*, 2006].

La différence entre rumeur et bouche à oreille est finalement assez faible; ils sont d'ailleurs fréquemment associés ou intervertis dans les modèles (chap. 4). La différence essentielle semble résider dans la transformation des informations qui intervient dans la rumeur (l'ajout d'hypothèses privées). Mais ces interprétations ou enrichissements apparaissent dans n'importe quel processus de communication interpersonnelle, qu'il s'agisse de bouche à oreille, ou même de communication scientifique [Bangerter et Heath, 2004]. Par exemple, pendant un entretien, un sujet nous a expliqué que l'iPhone fonctionne sous Windows, ce qui est gage de stabilité. Cette erreur manifeste (Apple, créateur de l'iPhone, est un concurrent de l'entreprise Microsoft qui commercialise Windows) sera nécessairement présente lorsque ce sujet discutera du produit. Néanmoins, cette transformation du message original sera limitée par l'intervention dans la chaîne d'individus qui ont accès à la véritable information. La différence essentielle entre rumeur et bouche à oreille est donc la possibilité de vérifier l'information. Par exemple, des rumeurs ont récemment porté sur l'attentat du 11 septembre contre les Etats-Unis [Galam, 2003], rumeurs qui ne peuvent être vérifiées par personne dans la population. Par contre, une vidéo qui semblait prouver que les téléphones portables émettent suffisamment d'ondes pour transformer du maïs en pop-corn a été démentie en quelques jours, puisque chacun pouvait reproduire l'expérience.

Par simplicité, nous utiliserons indifféremment les termes “communication interpersonnelle” et “bouche à oreille”.

### 3.4.2 Interactions informationnelles informelles

L'être humain consacre beaucoup de temps à discuter de façon informelle, en buvant un café, pendant les repas ou les trajets. Ces discussions peuvent être en face

à face (repas, trajets, café, réunions...) ou à distance (téléphone, messagerie instantanée par Internet, courrier papier ou électronique). En France, les enquêtes sur les temps sociaux quantifient un temps moyen de sociabilité d'une heure par jour environ<sup>3</sup> [Pronovost, 2005, p. 79]. De même que les singes passent plus de temps à s'épouiller mutuellement que nécessaire, le langage ne sert pas uniquement à transmettre de l'information; il joue un rôle social et permet de maintenir une cohérence de groupe [Dunbar, 1996]. Les gens abordent des sujets variés qui peuvent par exemple toucher à l'actualité, à leurs récentes expériences ou à leurs projets. La plupart du temps, il semble que ces discussions informelles visent davantage à parler pour l'acte social lui-même plutôt que pour transmettre une information ou satisfaire une autre motivation. N'importe quel sujet récent présent à l'esprit du sujet est pertinent pour remplir ce but.

Pendant ces discussions variées, on parle parfois de produits ou d'innovations. Une étude menée par Carl quantifie qu'environ un tiers des dialogues portent sur un produit [Carl, 2006b]; cette proportion varie selon le canal (face à face, téléphone, internet) utilisé pour la communication [Carl, 2006b, Baym *et al.*, 2004] : on parle plus facilement d'un produit en face à face ou par téléphone que par messagerie instantanée ou courrier. La fréquence des discussions portant sur des innovations dépend également de la relation qui lie les interlocuteurs [Carl, 2006b] : on discute plus souvent de produits avec des camarades qu'avec des amis proches. Les discussions informelles portent souvent sur les innovations quand celles-ci constituent un problème de société; c'est par exemple le cas dans les études de terrain sur le VIH au Malawi [Kaler, 2004], ou sur la contraception au Kenya [Rutenberg et Watkins, 1997]. Enfin, même si ces discussions sont informelles et portent sur de nombreux sujets, les thèmes abordés doivent être corrélés aux intérêts des interlocuteurs. Par exemple, pendant une série d'entretiens portant sur des fournisseurs d'accès internet français, il est apparu que le grand public parle rarement de ces sujets sauf s'il rencontre un problème (émission proactive) ou recherche un fournisseur internet (recherche d'information).

Notons qu'une innovation observable devient plus naturellement un sujet de conversation. Lorsqu'une personne utilise un téléphone récent pendant un repas, il est probable qu'un des membres de l'assistance lui parle de ce modèle récent. L'un des objectifs d'une institution est de parvenir à investir ce temps de discussion en faisant de son innovation un sujet de discussion. C'est d'ailleurs un objectif du marketing événementiel [Lendrevie *et al.*, 2006] : créer un événement rattaché à un produit, pour motiver les gens à parler de l'évènement, et potentiellement du produit.

Pendant une recherche active d'information, il est possible qu'un adoptant potentiel contacte un interlocuteur hors de ses contacts habituels pour obtenir de l'information. C'est le cas quand une femme Kenyane se rend dans un dispensaire pour recevoir de l'information. Une forte curiosité suffit à contacter des personnes inconnues; un sujet

---

<sup>3</sup>Ce temps de sociabilité inclut les conversations (une vingtaine de minutes en moyenne) et de visites et réceptions (environ une demi-heure)

nous a expliqué avoir été questionné sur sa nouvelle voiture à motorisation hybride par plusieurs inconnus rencontrés sur des parkings de supermarché.

### 3.4.3 Emission d'information proactive

#### Observations secondaires sur les motivations à parler d'un objet

En marketing, on considère généralement qu'un consommateur parle spontanément d'un produit s'il est fortement satisfait ou dissatisfait [Anderson, 1998]. Cela suppose que le consommateur forme d'abord une attente pour le produit, reçoit de l'information par l'expérience, compare son évaluation actuelle avec l'information précédente, et parle du produit s'il en est très satisfait (attentes totalement satisfaites ou dépassées) ou s'il est déçu (les caractéristiques attendues ne sont pas remplies). Au delà de cette satisfaction, plusieurs catégorisations des causes de bouche à oreille négatif ont été proposées, discriminées en fonction de l'intention du sujet [Huefner et Hunt, 2000] ou des fonctions de cette communication [Sundaram *et al.*, 1998]. Le bouche à oreille négatif peut être vu comme une forme de vengeance indirecte (faire baisser les revenus du vendeur), ou une forme d'altruisme ; dans ce dernier cas, le but de la communication est de prévenir l'interlocuteur des défauts d'un produit, afin de lui éviter de souffrir des mêmes inconvénients que le sujet [Dichter, 1966]. Notons que ces constats portent sur l'émission d'information quand le sujet a adopté un produit, à l'exclusion de l'émission d'information avant adoption.

Par ailleurs, on sait qu'un produit qui crée de la surprise provoque du bouche à oreille positif [Derbaix et Vanhamme, 2003]. On sait aussi que l'on parle d'un objet pour augmenter son prestige social, ce qui est particulièrement le cas si l'innovation est à la mode ou peut révéler un signe de prestige social. On peut également inciter un consommateur à parler spontanément d'un produit, ce qui a pour effet d'augmenter de façon notable sa propension à en discuter [Carl, 2006a].

La probabilité de parler d'un produit varie selon le canal (face à face, téléphone, internet) utilisé pour la communication [Carl, 2006b, Baym *et al.*, 2004] : on parle plus facilement d'un produit en face à face ou par téléphone que par messagerie instantanée ou courrier. La fréquence des discussions portant sur des innovations dépend également de la relation qui lie les interlocuteurs [Carl, 2006b] : on discute plus souvent de produits avec des camarades qu'avec des amis proches. La probabilité de parler d'un produit varie également en fonction des jours de la semaine [Steve Duck *et al.*, 1991]. Il est également évident qu'on ne discute pas des mêmes sujets dans tous les contextes ; les innovations tabous seront rarement discutées sur le lieu de travail, mais le seront avec des proches. Enfin, il semble que certains sujets aient une propension plus importante à transmettre des informations sur des innovations que d'autres ; Rogers postule que les innovateurs et *early adopters* parlent plus facilement des innovations que d'autres.

### Observations primaires sur les motivations à parler d'un objet

Les informations disponibles dans la littérature sur les motivations qui poussent à parler d'un objet en général (et non à émettre une recommandation après adoption) sont encore peu nombreuses [Cheng *et al.*, 2006, p. 96]. Nous avons donc associé à des séances d'entretien avec des consommateurs (5.6) un questionnaire, dans lequel nous demandions aux sujets pourquoi ils avaient parlé spontanément du produit sur lequel portait l'entretien. 30 sujets ont été interrogés sur 4 produits chacun. Ce groupe est trop réduit pour avoir une représentativité quantitative, mais permet de donner quelques pistes sur les motivations qui provoquent l'émission spontanée d'information. Nous retenons ici les motivations qui ont été énoncées au moins trois fois :

- l'objet intéresse l'individu en général, parce qu'il correspond à sa passion, à un intérêt, à un besoin
- pour transmettre ce qui l'a marqué dans le vécu récent. Ce type de communication s'assimile à un acte social dans lequel un individu cherche à se faire connaître, répondant à la question explicite ou implicite "Comment vas-tu ?" ou "Quoi de neuf?". Ainsi, une mère avait discuté avec des amies d'une console de jeu grâce à laquelle elle avait partagé un bon moment avec ses enfants. Un cadeau étant généralement source de contentement, plusieurs sujets nous ont expliqué avoir parlé d'un objet qu'on leur avait offert.
- parce que le produit fera l'objet d'un achat en commun (cadeau en commun), d'une prise de risque partagée, ou sera utilisé par plusieurs personnes.
- pour se le faire offrir. Plusieurs sujets nous ont dit avoir parlé d'un produit qui les intéresse dans l'espoir de le recevoir plus tard en cadeau par l'un des interlocuteurs.
- l'objet est susceptible d'intéresser l'interlocuteur. On parle de musique à un ami musicien, d'un nouveau produit technologique à un ami qui s'intéresse à ce type de produit, etc.
- parce que l'innovation est observable. Lorsque le regard se pose sur l'objet, le sujet pense plus naturellement à en parler. Un jeune cadre a expliqué qu'il vantait les qualités de son téléphone portable à chaque fois qu'il l'utilisait.

Nous avons également noté les raisons pour lesquelles certains sujets n'ont pas parlé d'un produit. Il apparaît que leur certitude dans l'information qu'ils possèdent sur un objet influence leur tendance à parler ou non de cet objet. Par exemple, un jeune cadre nous a expliqué ne pas avoir recommandé son fournisseur d'accès Internet à ses collègues, car il a peu de recul avec cette offre, et ne souhaite pas dégrader son image dans son cercle professionnel par une recommandation hasardeuse. Certains sujets sont d'un naturel expansif, et sont enthousiastes sur les objets de nouvelles technologies. D'autres sont au contraire réticents à transmettre une information qu'ils n'ont pas vérifiée eux-mêmes. Sur le terrain, par exemple, dans le cas de la diffusion des produits contraceptifs au Kenya, cela correspondrait à la démarche des femmes qui transmettent toute rumeur sur les dangers de la pilule contraceptive, tandis que d'autres se révèlent plus tempérées et évitent de propager une rumeur. Les sujets ont parfois des difficultés à exprimer pourquoi ils ont évoqué un sujet. Ils donnent alors des réponses telles que

“parce que tout le monde en parle”, ou “juste pour discuter”. Cela replace la discussion interpersonnelle sur des innovations dans le cadre général de la sociabilisation.

### 3.4.4 Recherche active d'information

#### Observations secondaires sur les motivations à rechercher de l'information

Comme l'a écrit Rogers, un agent recherche de l'information sur une innovation pour réduire l'incertitude sur cette innovation. Une information reçue par l'institution n'est pas considérée comme crédible, puisqu'elle provient d'une source intéressée. De même, une information reçue par ouï-dire nécessite une confirmation plus crédible pour être prise en compte. Rogers différencie le besoin d'information en fonction des segments d'adoptants : un innovateur est apte à évaluer soi-même l'innovation et la vraisemblance de ses caractéristiques, tandis que les segments qui adoptent le plus tard attendent le retour d'expérience d'autres adoptants pour réduire le risque lié à l'adoption.

La recherche d'information par des canaux interpersonnels permet de récupérer de l'information que l'on ne peut pas ou ne veut pas vérifier soi-même [Deutsch et Gerard, 1955]. La recherche d'information permet en quelque sorte un “apprentissage par procuration” [Bandura, 2001]. Les raisons pour ne pas collecter l'information soi-même sont nombreuses, dont :

- Rechercher l'information par soi-même serait trop coûteux, que ce soit en terme de temps, de risque ou d'argent, par rapport à l'incertitude ou au risque sur le produit. On prend un risque moindre en achetant des yaourts en supermarchés, il est donc rare que ce type de produit conduise à une recherche d'information. Par contre, les femmes préfèrent se reposer sur l'avis d'amies ayant déjà pris la pilule plutôt que de prendre le risque d'altérer leur santé en la prenant elles-mêmes. De même, avant de s'engager pour plusieurs années avec un opérateur de téléphonie mobile, les consommateurs cherchent à connaître les avantages et inconvénients de chaque opérateur.
- On ne peut pas faire cette recherche d'information soi-même : dans le cas des nouvelles technologies, de nombreuses personnes estiment n'avoir pas les connaissances nécessaires pour rechercher cette information.
- On ne peut pas récupérer l'information sans expérience prolongée : résistance d'un produit, qualité d'un service après-vente, possibilité d'avoir à nouveau des enfants en arrêtant la pilule. Ces informations nécessitent une expérience longue avec le produit ; seules les personnes qui ont adopté une innovation sont susceptibles de la connaître et de la transmettre.
- Si l'information ne peut pas être confirmée, notamment parce qu'il s'agit d'une évaluation ou d'un jugement subjectif [Festinger, 1950]. Par exemple, il est difficile pour les Luo de savoir si une petite famille est préférable à une grande, ce qui mènent à de nombreuses discussions passionnées.
- Si l'information attendue a une caractéristique aléatoire, un adoptant potentiel cherche intuitivement à échantillonner la population pour évaluer sa probabilité. Par exemple, un tiers des sujets interrogés sur le choix d'un fournisseur d'accès

à Internet révèlent ce comportement : “ils ont tous des problèmes, mais certains en ont plus que d’autres, il faut juste éviter ceux-là”

### Observations primaires sur les motivations à rechercher de l’information

Pendant les entretiens, nous avons également demandé aux sujets pourquoi ils avaient recherché de l’information. Les résultats principaux sont :

- par simple curiosité : un amateur de musique peut rechercher de l’information sur le matériel récent, simplement parce qu’il aime connaître et comprendre les nouveautés. De même, les technophiles (grand public amateur de technologie) se renseignent sur les nombreuses nouveautés, sans pour autant envisager de les acheter. La recherche d’information peut donc se faire par curiosité pure, sans intention d’achat ou d’adoption.
- afin de vérifier si les attributs qui lui apportent de la valeur sont vraiment présents dans l’innovation. En réalité, le sujet prête peu d’attention aux attributs qui sont secondaires pour lui ; ainsi, un sujet qui envisageait l’achat d’un iPhone désirait simplement vérifier la qualité de la sortie vidéo, car il envisageait son achat pour projeter ses cours par vidéo-projecteur. Il ne prévoyait pas d’utiliser cet appareil pour aller sur Internet, et ne s’était donc pas renseigné sur cet attribut.

#### 3.4.5 Influence normative

##### Le conformisme ou la volonté de se conformer à la norme groupale

Le conformisme se manifeste par le fait qu’un individu modifie ses comportements, attitudes, opinions, pour les mettre en harmonie avec ce qu’il perçoit être les comportements, les attitudes ou opinions du groupe dans lequel il est inséré ou il souhaite être accepté (Jean-Paul Codol<sup>4</sup>). On peut voir le conformisme comme la recherche d’être le prototype, chacun des membres d’un groupe désirant incarner au mieux la norme groupale [Codol, 1975]. Le conformisme permet également d’éviter les sanctions qui apparaissent contre les déviants de la norme groupale [Becker, 1974]. On parle de conformisme quand un individu modifie son comportement ou son attitude afin de le mettre mieux en harmonie avec le comportement ou l’attitude d’un groupe [Moscovici, 1998, p. 26]. On distingue le conformisme du *suivisme*, qui est la volonté de *paraître* conforme à la norme, ce qui ne constitue qu’une modification apparente et superficielle des comportements sans réel changement de conviction interne [Moscovici, 1984a].

Pendant un entretien, nous avons demandé à un jeune cadre quel type d’information il avait recherché avant d’acheter un véhicule hybride. Fait rare en déclaratif, il nous a exprimé sa volonté de ne pas être rejeté par le groupe : “*Vous savez, je voulais savoir si je passerais pour un idiot qui aurait acheté quelque chose qui ne fonctionne pas. Je voulais aussi savoir si je serais vu comme une sorte de bobo idéaliste. En discutant avec les collègues, j’ai vu que l’image était plutôt positive, plutôt une image citoyenne.*”

---

<sup>4</sup>définition attribuée dans plusieurs articles à Jean-Paul Codol, 2001, sans qu’il soit possible d’identifier précisément une publication.

*Sans ça, je ne l'aurais pas achetée. Vous savez, c'est peut-être idiot, mais on n'aime pas passer pour un imbécile.*”. L'influence normative peut être vue comme la volonté d'un sujet de s'intégrer à (ou de ne pas être rejeté par) un groupe social.

### **L'influence normative interpersonnelle**

La définition de l'influence normative comme aspiration de l'individu à se conformer à la norme groupale correspond sans nul doute au courant dominant en psychologie sociale [Moscovici, 1998]. Toutefois, ce point de vue ne représente qu'une facette de l'influence normative, dans laquelle l'*alter* est un groupe social partageant une norme groupale. Ce groupe peut d'ailleurs varier en taille et proximité à l'individu, depuis le réseau social proche jusqu'à la population entière. Deutsch et Gerard définissent de façon plus générale l'influence sociale comme *le désir de l'individu d'être apprécié et aimé* [Deutsch et Gerard, 1955]. Dans cette acceptation plus générale de l'influence sociale, l'*alter* peut être un individu donné duquel l'*ego* cherche à être apprécié (ou ne pas être rejeté).

C'est notamment le cas lorsqu'une femme Luo renonce à prendre la pilule parce que son mari, sa mère ou sa belle-mère n'acceptent pas cette idée. Cette femme n'est pas gênée par la norme du reste de la population, mais ne désire pas être rejetée par son mari, sa mère ou sa belle-mère. De même, les adolescents fument moins si leurs parents désapprouvent la cigarette [Sargent et Dalton, 2001]. Notons que la relation qui lie le sujet à la référence définit la force de cette influence ; un adolescent fume moins parce que ses parents, qui constituent ses référents, désapprouvent ce comportement. La femme Luo ne veut pas déplaire à son mari, à sa mère ou sa belle-mère, mais est moins sensible à l'acceptation d'une amie. L'influence normative dépend donc du type de relation sociale qui lie les individus.

### **L'influence normative en tant que croyances et motivations**

Reprenons cette définition de Deutch et Gerard [Deutsch et Gerard, 1955] : L'influence normative naît du *désir* de l'individu d'être apprécié et aimé. Il s'agit d'une volonté (désir, besoin, motivation) de sociabilisation, que l'on retrouve dans les besoins de Maslow ou les valeurs sociales de Rokeach. Selon la définition Jean-Paul Codol, “il y a conformisme quand un individu modifie ses comportements [...] pour les mettre en harmonie avec *ce qu'il perçoit être* les comportements [...] du groupe [...] ”. Pour se conformer à quelque chose, il faut connaître ce quelque chose. On ne peut pas se vêtir “à la mode” sans savoir ce qu'est la mode. Les connaissances sur les normes sociales proviennent elles-mêmes de la communication interpersonnelle (par ex [Bandura, 2001]) et des médias de masse. L'influence normative ne peut donc exister que par suite d'une croyance sur ce qu'est la norme groupale, associée à la motivation d'être intégré à ce groupe. De même, l'influence normative interpersonnelle ne s'exercera que si l'on connaît ce qui plaît ou déplaît à l'autre, et que l'on souhaite être apprécié de cette personne.

### 3.4.6 Structure des interactions

On sait que la structure des interactions dans une population est relativement stable, c'est-à-dire que chaque individu interagit avec un nombre limité d'individus [Wasserman et Faust, 1994a]. Rogers observe l'existence de groupes sociaux fortement interconnectés (*clusters*) interagissant rarement avec les autres groupes, ce qui provoque la polarisation de différents villages sur des moyens contraceptifs différents [Rogers, 2003, p. 333]. De façon générale, on sait que plus une personne connaît d'adoptants dans son entourage, plus la probabilité qu'elle adopte est élevée [Rogers, 2003, p. 326]. La probabilité qu'une femme utilise un moyen de contraception est nettement plus importante si elle fréquente des femmes ayant adopté une solution contraceptive [Montgomery et Casterline, 1998], notamment au Kenya [Behrman *et al.*, 2002, Kohler *et al.*, 2001]. Le cercle social influence également la perception des risques de VIH [Bühler et Kohler, 2003, Kohler *et al.*, 2007, Helleringer et Kohler, 2005] et l'attitude envers la prévention du VIH [Gerland, 2004].

Etant donné l'impact de cette structure, il est maintenant classique, lors des études de terrain, de poser des questions sociométriques comme "De qui avez-vous obtenu l'information qui vous a conduit à adopter l'innovation?" [Rogers, 2003, p. 125]. La structure des réseaux sociaux est reconnue comme problématique importante pour la diffusion d'innovations ([Rogers, 2003, p. 126] ou [Hauser *et al.*, 2005]) et pour le marketing ([John *et al.*, 2006]). L'analyse des réseaux sociaux est une problématique vaste que nous aborderons plus précisément en chapitre 8.

### 3.4.7 Impact des interactions interpersonnelles

#### Persuader, comprendre

Tout comme les médias de masse, les interactions interpersonnelles permettent d'informer de l'existence d'une innovation. Mais surtout, elles permettent la transmission d'une information considérée comme plus crédible [Westbrook, 1987, Lendrevie *et al.*, 2006]. Tandis que la publicité permet principalement de faire connaître l'innovation, la communication interpersonnelle permet de vérifier les informations, de les compléter, et de persuader [Rogers, 2003, p. 05]. Des études de Carl ont d'ailleurs démontré que des agents payés par une entreprise pour promouvoir une offre étaient néanmoins considérés comme crédibles, précisément parce que le récepteur pensait qu'un ami ne lui mentirait pas sur un produit pour de l'argent [Carl, 2006a].

Par ailleurs, ce canal est *bidirectionnel* [Rogers, 2003, p. 205]; on peut demander à son interlocuteur des compléments d'information, préciser ses besoins, éclaircir les termes obscurs. On s'attend d'ailleurs à ce qu'un ami vous prodigue des conseils adaptés à votre cas. C'est ainsi que les sujets considérés comme "experts" en nouvelles technologies recommandent à leurs proches un autre fournisseur d'accès à Internet que le leur, qui conviendrait davantage aux attentes et aptitudes de leur interlocuteur.

### Construction sociale de la réalité

Par ces nombreuses discussions, les individus construisent peu à peu une perception subjective de la réalité [Berger et Luckmann, 1966]. La plupart des innovations réellement en rupture avec l'existant ne sont pas perçues en tant que ce qu'elles sont, mais leur image se construit pour écarter l'inacceptable ou l'incompréhensible, et le rattacher au connu par des interprétations. La machine à moulin le grain implantée dans un village du Mali devient "la belle-soeur qui se tait" [Rogers, 2003, p. 247]. Au Kenya, le HIV est perçu comme une punition divine qui s'inscrit dans l'ordre religieux (*Charia*). Toutes ces perceptions sont construites sur la base d'interprétation individuelles, de discussions interpersonnelles et des médias de masse [Adoni et Mane, 1984]. Nous avons déjà noté qu'il n'existe pas nécessairement de réalité objective; le constructivisme social suppose que cette réalité est socialement construite [Berger et Luckmann, 1966, Deaux et Philogène, 2001]

Pour étudier comment les connaissances expertes (scientifiques, technologiques) se transforment en *sens commun*, la notion de représentation sociale a été proposée. "Les représentations sont des formes de savoir naïf, destinées à organiser les conduites et orienter les communications" [Moscovici, 1961]. Les représentations sociales apparaissent précisément à cause de l'effort de "faire avec" ces idées ou pratiques peu familières [Wagner *et al.*, 2002]. Si les représentations sociales ont d'abord porté sur la compréhension du savoir scientifique dans la population [Moscovici, 1961], le concept a rapidement été élargi comme "une forme de connaissance socialement élaborée et partagée, ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité commune à un ensemble social" [Jodelet, 1984, p. 36].

Les représentations sociales ont fait l'objet d'analyses plus précises pour explorer le processus psychologique ou de communication qui leur donne forme [Jodelet, 1989]; on notera les principes d'objectivation et d'ancrage, qui constituent les principaux processus des représentations sociales [Moscovici, 1961]. L'objectivation transforme la connaissance experte abstraite en une image plus concrète, facilitant l'appropriation de ces notions et leur échange [Jodelet, 1991]. L'ancrage consiste à classer et rattacher l'inconnu au réseau de croyances existant pour le rendre significatif. Nous ne nous étendrons pas sur ces approfondissements, dont l'utilisation serait délicate à l'échelle d'une population, et revenons de préférence à la définition restreinte de la représentation susceptible de nous aider à modéliser la diffusion d'innovations.

Dans notre cas, la notion de représentation sociale est intéressante en ce qu'elle pose la notion de représentation partagée par plusieurs personnes (concept de représentations collectives qui a inspiré la conceptualisation des représentations sociales [Durkheim, 1898]). Elle se rattache au constructivisme social, et fournit des outils quantitatifs permettant de mesurer ces représentations qui peuvent s'avérer utiles pour collecter des informations depuis le terrain [Clemence *et al.*, 1993, Doise *et al.*, 1995a].

<b>Faits stylisés macro</b>	
[FS M1] Hétérogénéité de la population	La population des agents est hétérogène dans ses croyances, son évaluation d'une innovation (motivations, besoins, moyens) et son comportement communicationnel (intérêt, crédibilité d'information recherchée, crédibilité requise pour émettre une recommandation, force de persuasion, propension à parler) 3.1.1
[FS M2] Média de masse	L'audience d'un canal de masse dépend des caractéristiques socio-démographiques et des centres d'intérêt des individus (3.1.2).
[FS M3] Courbe en "S"	La courbe d'adoption cumulée est en forme de "S" dans le cas de succès de diffusion (3.2.1).
[FS M4] Masse critique	Il existe une masse critique à partir de laquelle la diffusion interpersonnelle suffit à soutenir la propagation de l'innovation (3.2.1).
[FS M5] Publicité : awareness et recherche	La publicité fait connaître l'existence de l'innovation ( <i>awareness</i> ) et provoque la recherche d'information (3.1.2).
[FS M6] Avantage relatif	L'adoption de l'innovation est plus probable si elle est perçue comme meilleure que la solution précédente (3.2.3).
[FS M7] Complexité	L'adoption est moins probable si l'innovation est perçue comme complexe (3.2.3).
[FS M8] Adoption testabilité	L'adoption est plus probable si l'innovation peut être testée sur une base limitée (3.2.3).
[FS M9] Observabilité	L'adoption est plus probable si l'innovation est observable (3.2.3).
[FS M10] Compréhension	La compréhension détermine le succès ou l'échec d'une innovation (3.2.3)
[FS M11] Compatibilité	L'adoption est plus probable si elle est compatible avec les croyances, les valeurs et les motivations (3.2.3).
[FS M12] Innovations incrémentales	Les innovations incrémentales se diffusent plus rapidement que des innovations de rupture, car elles sont rendues plus compatibles par l'innovation qui les précède 3.2.3.

TAB. 3.2: Faits stylisés au niveau macroscopique

### 3.5 Résumé

Cet état de l'art, volontairement synthétique, expose les principaux faits stylisés qui seront utilisés pour construire et évaluer notre modèle. Les tableaux 3.2 et 3.3 résument respectivement les observations au niveau macroscopique et au niveau individuel.

<b>Faits stylisés au niveau individuel</b>	
[FS I1] Etapes adoption	Les adoptants passent par différentes étapes d'adoption (3.3.1).
[FS I2] Recherche active	Les adoptants potentiels recherchent activement de l'information en fonction des informations qu'ils possèdent sur l'innovation, de leurs motivations, de leurs croyances et de leurs caractéristiques communicationnelles (3.4.4).
[FS I3] Emission proactive	Les adoptants potentiels émettent proactivement de l'information en fonction de leurs motivations, de leurs croyances et de leurs caractéristiques communicationnelles (3.4.3).
[FS I4] Argumentation	Lors des échanges interpersonnels, les individus échangent des informations sur l'innovation (3.3.1).
<b>Faits stylisés sur les interactions</b>	
[FS I5] Influence interpersonnelle normative	L'influence normative entre deux individus dépend du type de relation sociale liant ces individus (3.4.5).
[FS I6] Influence normative groupale	L'influence normative du groupe vers un individu dépend de la motivation de conformisme de l'individu et de la connaissance de la norme groupale 3.4.5.
[FS I7] Discussions interpersonnelles	Les discussions interpersonnelles informelles ont lieu lors de rencontres interpersonnelles habituelles; la probabilité de discuter de produits en général dépend du type de relation associant les individus, des caractéristiques de ces individus, et de l'intérêt porté à cette innovation (3.4.2). Les discussions interpersonnelles peuvent être créées pour rechercher ou émettre de l'information.
[FS I8] Contenu interactions	Lors de la communication interpersonnelle, les croyances rattachées à une innovation sont transmises, ainsi que la source d'information supportant ces croyances (3.3.3).

TAB. 3.3: Faits stylisés aux niveaux individuels et interactions.

## Chapitre 4

# Modèles existants

We use models to help illuminate phenomena that we find difficult to understand, or to solve problems which are too difficult to think through. These benefits come because models simplify reality, and make it tractable enough for our limited powers of understanding to grasp. These benefits, however, also bring costs. Models can easily become prisons. They can severely limit the way in which we think about things, and so limit the range of actions which we might choose to take when we have completed our analysis.

---

Paul A. Geroski [Geroski, 2000]

### Introduction

Le phénomène de diffusion d'innovation dans une population a été modélisé plus ou moins explicitement dans différents courants de recherche. Nous ne détaillerons pas formellement le contenu de chaque modèle, mais examinerons plutôt leur principe général. Le modèle de Bass est le premier modèle descriptif de la courbe de diffusion en "S". Il demeure une référence historique, et fait toujours l'objet de recherches afin d'améliorer son pouvoir descriptif et son utilité (partie 4.1). Les limites de l'approche agrégative sont rapidement apparues ; plusieurs modèles analogiques d'adoption ont alors été développés (partie 4.2) afin de mieux décrire la diffusion, en particulier pour prendre en compte l'effet du réseau social ou l'hétérogénéité de la population. Ces modèles comprennent les modèles d'apprentissage social développés en économie (4.2.1), les modèles à seuil provenant de la sociologie (4.2.2), ou les modèles de dynamique d'opinion (4.2.3). Par ailleurs, on considère généralement la diffusion d'information (notamment à propos d'innovations) comme un processus épidémique (4.3), malgré les limites de cette approche que nous soulignerons. L'ensemble de ces modèles sont analogiques, visant à comprendre l'émergence de dynamiques collectives, sans prétendre être rapportés au terrain.

Plusieurs modèles orientés agents ont été développés pour décrire des phénomènes réels. Nous décrirons plus précisément les deux modèles qui ont marqué ce domaine : le projet IMAGES (4.4.1), modèle de diffusion de nouvelles pratiques agro-environnementales fortement couplé au terrain, et l’approche consumat (4.4.2), qui a développé un modèle d’agents cognitifs permettant entre autres d’étudier la diffusion de produits.

Ces modèles diffèrent fortement dans leur buts, ainsi que dans leur approche. Pourtant, nous verrons qu’ils convergent vers des constats similaires (4.5.1). Ce panorama des modèles existants nous permettra d’esquisser quelques limites à dépasser dans les approches existantes (4.5.3).

## 4.1 Modèle de Bass

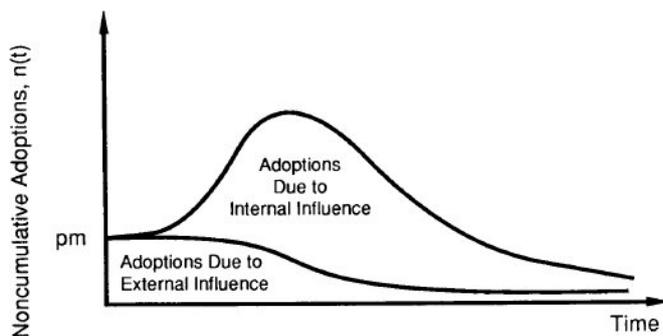


FIG. 4.1: (gauche) Adoption instantanée due aux influences extrinsèques et intrinsèques et cumulée décrite par le modèle de Bass (depuis [Rogers, 2003])

### 4.1.1 Description du modèle

Le modèle de Bass est le plus connu des modèles de diffusion d’innovation. Il fut proposé par Franck M. Bass en 1969 [Bass, 1969] comme un modèle prédictif de la pénétration de biens de consommation durables. Ce modèle mathématique agrégatif s’appuie sur les observations générales rapportées par Rogers dans la première édition de son livre [Rogers, 1962]. Ce modèle reproduit les courbes de diffusion en “S” ; dans son premier article, Bass démontrait son pouvoir descriptif en paramétrant le modèle par régression sur les courbes agrégées de vente de réfrigérateurs, télévision noir et blanc et lave-linge. Ce modèle a été appliqué notamment par des grandes firmes américaines comme Kodak, ICM ou AT&T [Rogers, 2003, p. 209].

Bass distingue deux forces principales qui poussent à l’adoption : l’*innovation* et l’*imitation*. Ces facteurs explicatifs traduisent le fait qu’un part des individus adoptent par pression sociale des individus qui ont déjà adopté, tandis que certains adoptent

spontanément, sans pression endogène à la population. La pression d'imitation est proportionnelle à la proportion d'adoptants : plus le nombre d'adoptants est élevé, plus le nombre de personnes susceptibles d'adopter par imitation est importante. La part d'adoption sans pression endogène pendant le lancement de l'innovation est importante au départ, et diminue avec le temps (fig 4.1). Bass note  $Y(t)$  le nombre de personnes ayant adopté dans la population,  $m$  la taille totale du marché potentiel et  $P(t)$  la probabilité qu'une adoption soit faite au temps  $t$ . Cette probabilité dépend de la pression sociale  $(q/m)Y(t)$ , avec  $q$  le *coefficient d'imitation*, et  $p$  le *coefficient d'innovation*. Cette probabilité s'écrit  $P(t) = p + (q/m)Y(t)$ . On obtient donc le chiffre des ventes au temps  $t$  :  $S(t) = pm + (q - p)Y(t) - (q/m)Y(t)^2$ . Notons qu'au temps  $t_0 = 0$ ,  $Y(t_0) = pm$ , c'est-à-dire que l'adoption est uniquement portée par l'innovation.

Le modèle de Bass est donc descriptif de la courbe agrégée des adoptions réussies, ce qui constituait à l'époque un avantage sur les modèles qui décrivaient une diffusion exponentielle immédiate des produits [Parker, 1994]. Il repose sur des facteurs explicatifs incontestables au regard de la diffusion d'innovation (innovation et imitation proportionnelle au nombre d'adoptants). Bass propose un modèle qui séduit par sa simplicité et son évidente capacité à reproduire la courbe agrégée d'adoptions. Le modèle a été étendu hors du cadre des biens durables, par exemple sur la diffusion d'idées sur l'éducation [Lawton et Lawton, 1979]. Le modèle de Bass, assorti à ses évolutions, demeure très présent dans la littérature, étant souvent l'unique approche de modélisation citée dans des reviews de modèle de diffusion d'innovation (par exemple [Parker, 1994], [Meade et Islam, 2006] ou [Chandrasekaran et Tellis, 2005]).

Le modèle a souvent été interprété dans des termes différents de Bass. Bass évoque la notion de pression sociale en général, alors que les paramètres  $p$  et  $q$  sont souvent assimilés à de la communication pure, y compris par Rogers lui-même [Rogers, 2003, p. 209]. Au sens de Bass, les adoptions sont provoquée par des forces externes ou internes, sans distinguer clairement des innovateurs et imitateurs qui seraient figés dans cette motivation d'achat (la différence de dynamique a été prouvée analytiquement [Van den Bulte, 2002]).

#### 4.1.2 Utilisation du modèle

Le modèle de Bass fut proposé comme un modèle prédictif de l'adoption future de produits. Pour l'appliquer, il faut d'abord définir la taille du marché  $m$ . Ensuite, deux solutions principales sont possibles [Mahajan *et al.*, 1990]. La première est de déterminer le moment auquel le pic d'adoption intantanées arrivera, et le niveau d'adoption à ce moment [Mahajan *et al.*, 1984b]. Bass lui-même indique que cela a peu d'intérêt, le but du modèle étant précisément de prévoir ce pic ; s'il est connu, il est inutile d'utiliser un modèle prédictif [Bass, 1986]. La seconde approche est d'estimer le nombre d'adoptions dans la première période, et le coefficient somme externe et interne  $p + q$  [Lawrence et Lawton, 1981]. On peut alors déterminer l'évolution future des ventes du produit. Mais comment estimer ce dernier paramètre ? Les coefficients d'innovation  $p$  et d'imitation  $q$  sont des constructions pures. Certes, cette abstraction permet

d'étudier l'importance relative de l'innovation et de l'imitation pendant une diffusion (par exemple [Libertore et Bream, 1997]). Mais en pratique, ils sont inférés de cas de diffusion précédents [Mahajan *et al.*, 1990]. L'impossibilité d'évaluer ces paramètres autrement que par rapport à des innovations réussies pose l'hypothèse que l'innovation va se propager comme d'autres innovations diffusées avec succès. Il s'agit donc d'une excellente illustration du biais pro-innovation dénoncé par Rogers (cf 3.2.2). Il est impossible de reproduire l'échec de la diffusion d'innovation, sauf en plaçant artificiellement le marché potentiel à 0, alors qu'un marché potentiel peut exister mais ne pas être atteint pendant la diffusion.

Par ailleurs, de nombreux facteurs explicatifs de la diffusion sont ignorés, ce qui revient à poser de nombreuses hypothèses implicites [Mahajan *et al.*, 1990]. L'innovation est indépendante de toute innovation préalable. Sa diffusion n'est pas influencée par la stratégie marketing. La concurrence, l'offre et la demande ne sont pas pris en compte. Les phénomènes de compréhension ou incompréhension sont d'ailleurs ignorés. Le marché potentiel  $m$  reste stable pendant la diffusion, sans influence de la concurrence. L'approche agrégative elle-même ne permet pas de tenir compte des effets de réseau, des frontières géographiques, ni de l'hétérogénéité des acheteurs. Les différentes étapes d'adoption détaillées par Rogers (voir 7.3.1) sont ignorées. Ces nombreuses hypothèses, rarement explicitées, limitent fortement la descriptivité du modèle de Bass. Le petit nombre de facteurs explicatifs présents dans le modèle limite également le pouvoir descriptif du modèle : pour plusieurs produits, ce modèle fut démontré incapable de reproduire le pic des ventes ou la pénétration de marché [Bernhardt et Mackenzie, 1972, Tigert et Farivar, 1981].

Le modèle de Bass avait un double but. D'une part, expliquer l'apparition de la courbe en "S" en se reposant sur des facteurs explicatifs plausibles ; cet objectif est globalement atteint, même si le modèle n'est pas descriptif de tous les cas de diffusion. D'autre part, ce modèle se voulait prédictif, permettant au "client final" (2.1.1) qu'est l'entreprise d'anticiper sur l'acceptation de son produit. Or, les variables décisionnelles de l'institution, qui portent sur la communication (campagnes marketing, agents de changement) ne sont pas présentes dans le modèle, le rendant peu utile pour ce client final.

### 4.1.3 Evolutions

Pour réduire ces limitations, différents auteurs ont introduit des variables supplémentaires dans le modèle. L'effort principal s'est porté sur l'introduction de variables mix marketing [Mahajan *et al.*, 2000], comme le prix [Robinson et Lakhani, 1975], la publicité [Dodson et Muller, 1978, Kalish, 1985], un marché potentiel non statique [Sharif et Ramanathan, 1981], un échange d'informations explicite [Mahajan *et al.*, 1984a] ou la diffusion dans un marché international [Gatignon *et al.*, 1989]. Les évolutions du modèle de Bass étant trop nombreuses pour être recensées ici, nous renvoyons le lecteur intéressé aux diverses

reviews disponibles [Mahajan *et al.*, 1990, Parker, 1994] ou plus récemment [Chandrasekaran et Tellis, 2005] [Mahajan *et al.*, 2000] [Meade et Islam, 2006].

La plupart du temps, on manque malheureusement de données sur les étapes intermédiaires, données qui ne sont pas disponible naturellement (contrairement aux volumes de ventes, par exemple) et sont extrêmement coûteuses, voire impossible à collecter ; cette limite a parfois été évoquée comme une bonne raison de ne pas détailler davantage les modèles qui deviendraient impossibles à valider [Van den Bulte et Lilien, 2002].

Rogers porte un regard très critique sur ce modèle : *“essentiellement, Bass a formulé nos connaissances sur la diffusion dans une forme plus utilisable par la communauté des entreprises et les chercheurs en marketing.”* [Rogers, 2003, p. 209]. Récemment, Nigel Meade et Towhidul Islam notaient [Meade et Islam, 2006] : *“En dépit (ou peut-être à cause) des efforts de nombreux auteurs, peu de questions de recherche ont finalement été résolues. Par exemple, bien qu’il y ait quelques convergences sur la façon la plus appropriée d’inclure des variables liées au mix-marketing dans le modèle de Bass, il existe peu d’alternative de modèles viables”*. Parker souligne également le manque de descriptivité de ces modèles, qui ne tiennent pas compte des différences entre pays et innovations, ainsi que la difficulté à rapporter des paramètres abstraits souvent approximativement définis à des observations réelles [Parker, 1994].

Afin de prendre en compte l’hétérogénéité de la population et l’effet de réseau, les modèles s’orientent vers des approches dites de *micro-modelling*, qui s’assimilent en pratique à des modèles multi-agents. Le travail de Chatterjee et Eliashberg [Chatterjee et Eliashberg, 1990] a constitué une étape marquante dans ce courant agrégatif, en prouvant l’intérêt de modèles individu-centrés dans une culture de modélisation agrégative.

## 4.2 Modèles individu-centrés analogiques

### 4.2.1 Modèles d’apprentissage social

#### Principes

Supposons que sur le marché, deux alternatives A et B soient disponibles (technologies, produits, ou statu quo vs innovation [Banerjee, 1993]). Personne ne peut dire de façon exacte si l’une de ces alternatives est meilleure qu’une autre ; dans cette approche économique, on considère ce manque d’information comme une incertitude conduisant à un risque. Bien sûr, chacun peut décider de tester l’une des alternatives A pour découvrir ce qu’elle apporte en réalité, et propager cette information. Dans ce cas, chaque individu fait face au choix suivant : soit se reposer sur l’avis indirect qui réduit l’incertitude sur A, soit tester B en prenant lui-même un risque. Mais si A semble déjà correcte, pourquoi prendre le risque de tester B qui pourrait certes être meilleure, mais aussi pire ? Il est alors potentiellement intéressant pour le consommateur de faire son choix en se reposant uniquement sur les avis indirects. Dans ce cas, il

semble possible qu'une population qui se repose beaucoup sur les avis indirects adopte systématiquement la première innovation testée.

Les questions posées à ces modèles sont [Banerjee et Fudenberg, 2004] : Quelle est la dynamique résultant d'un tel processus ? L'ensemble de la population finit-il par obtenir la meilleure solution possible ? Converge-t-il vers la plus mauvaise solution, simplement parce que les premiers tests ont été faits sur l'une des alternatives au départ ? Y a-t-il finalement hétérogénéité ou homogénéité des points de vue ? Ou encore, quelles sont les conditions d'apparition d'une convergence vers l'une des alternatives ?

Ces modèles d'inspiration économique, souvent nommés *modèles d'apprentissage social*, partagent les mêmes processus principaux. Chaque agent reçoit un signal privé, ainsi que des signaux de  $N$  autres agents (tirés aléatoirement, ordonnés ou sur un réseau). En fonction de ces signaux, l'agent choisit l'alternative A ou B. Le modèle de décision est généralement rationnel, mais est parfois étendu à une rationalité limitée ([Ellison, 1993, Ellison et Fudenberg, 1995]). Selon les modèles, ce choix est rendu public [Bikhchandani *et al.*, 1992] (ce qui permet aux autres agents d'inférer qu'il a sans doute de bonnes raisons d'agir ainsi) ou le gain que lui apporte la décision est communiqué (*payoff* [Ellison et Fudenberg, 1995, Bala et Goyal, 1998, Ellison et Fudenberg, 1995]). Ces modèles représentent donc sous forme stylisée la communication de masse (signaux privés), les interactions interpersonnelles informationnelles (signaux des autres agents) et l'expérience (gain après décision).

Ce phénomène d'*apprentissage social* [Gale, 1996] au niveau individuel fait émerger des effets de suivismes, dont la désignation varie [Geroski, 2000] : cascades informationnelles [Bikhchandani *et al.*, 1992], "moutonnage" (herding) [Banerjee, 1992] ou *bandwagon effect* [Abrahamson et Rosenkopf, 1993]. Une cascade informationnelle apparaît quand l'action d'un individu ne repose pas sur son information privée. Selon les modèles, il peut exister un coût d'adoption, du bruit dans la perception des gains ou des différences dans l'importance relative des informations publiques et privées. En dehors des modèles analytiques ([Ellison et Fudenberg, 1995] et modèles précédemment cités), certains modèles ont approché le problème par simulation, ce qui permet d'étudier les effets liés au réseau d'interactions (par exemple [Abrahamson et Rosenkopf, 1997, Bala et Goyal, 1998, Banerjee et Fudenberg, 2004]).

## Discussion

Selon les modèles et leur paramétrage, la population converge vers la meilleure solution ([Ellison et Fudenberg, 1995]) ou la moins bonne (par ex. [Banerjee, 1992] [Bikhchandani *et al.*, 1992]). Par exemple, Banerjee et Fudenberg [Banerjee et Fudenberg, 2004] concluent que le meilleur choix possible est révélé si chaque consommateur récupère de l'information d'au moins deux personnes et que son échantillonnage de la population est diversifié. L'approche par simulation a prouvé que la structure des interactions ("réseau social") impacte à la fois la vitesse de

diffusion et la proportion finale d'adoptants. Cette étude des réseaux sociaux mérite donc approfondissement [Gale, 1996]. Plusieurs de ces modèles révèlent une grande sensibilité aux conditions de départ ; cela est conforme aux observations de Rogers sur la convergence de différents villages vers chacun une solution donnée (voir 3.4.6).

Ces modèles représentent dans la littérature une approche distincte et faiblement liée aux travaux basés sur le modèle de Bass. Ils diffèrent de ces modèles par l'approche et l'objectif de la modélisation. Les modèles dérivés de Bass sont des modèles agrégatifs, tandis que ceux-ci sont individus-centrés (bien qu'étant généralement étudiés analytiquement). L'objectif des modèles agrégatifs est d'expliquer la forme de la courbe d'adoption cumulée, tandis que ceux-ci sont développés pour comprendre l'influence de l'apprentissage social sur l'adoption d'innovations. Ces modèles atteignent un niveau de descriptivité intéressant. Certains représentent en particulier la recherche d'information (par ex. [Ellison et Fudenberg, 1995, Banerjee, 1993]), l'hétérogénéité des agents (voir [Smith et Sorensen, 2000]) et les effets de réseau (notamment [Abrahamson et Rosenkopf, 1997]). Ils ont permis de détecter la sensibilité de la dynamique à plusieurs paramètres (conditions initiales, structure d'interactions). Toutefois, ces modèles analogiques ne visent pas à être, et n'ont pas été, comparés réellement au terrain.

Notons que les modèles développés en simulation dans ce courant économique reposent souvent sur des modèles à seuil (par exemple [Abrahamson et Rosenkopf, 1997, Bala et Goyal, 1998]).

#### 4.2.2 Modèles à seuil et automates cellulaires

##### Principe

Quand un individu est environné par suffisamment d'adoptants, il finit lui-même par adopter. Toutefois, certains individus sont plus réticents que d'autres pour adopter. Telle est, en résumé, l'intuition qui sous-tend la notion de pression sociale en diffusion d'innovations. Comme nous l'avons vu précédemment, de tels phénomènes ont effectivement été observés pour la prescription de nouveaux médicaments par les médecins. En 1978, Granovetter a proposé un modèle très simple d'influence sociale basée sur cette notion : le modèle à seuil [Granovetter, 1978]. Le principe est le suivant : un individu change d'état si une proportion de ses voisins suffisamment importante est dans cet état. Cette proportion d'agents constitue le seuil de l'individu ; ce seuil, fixé arbitrairement à l'initialisation, varie en fonction des individus. La diversité de ces seuils, ainsi éventuellement que la position de l'individu sur le réseau social, créent une hétérogénéité dans la population. Les liens peuvent être pondérés afin de représenter les différences d'influence entre les liens sociaux [FS I7].

On peut voir ce processus individuel comme un compromis entre valeur sociale et bénéfice individuel ; cette valeur sociale peut représenter un intérêt économique (cas

des produits à “effet réseau” qui demandent à être partagés pour avoir de la valeur), une norme sociale (imitation) ou un apprentissage social (si suffisamment de voisins ont adopté, c’est que l’innovation est bonne). L’influence transmise par le réseau représente implicitement les interactions informationnelles et normatives [Valente, 2005]. En terme d’imitation ou d’innovation, les individus avec les seuils les plus bas correspondent aux innovateurs, tandis que les imitateurs attendent une proportion plus importante d’avis positifs.

Il existe une analogie directe entre ces modèles sociologiques et les réseaux d’automates utilisés en simulation orientée agents [Weisbuch, 1991]. Les modèles à seuil sont donc particulièrement utilisés pour modéliser des dynamiques sociales [Doran, 1998, Gilbert et Troitzsch, 1999]. Notons que les automates cellulaires constituent un cas particulier de réseau d’automates dans lequel le réseau d’interaction est défini par voisinage sur une grille [Wolfram, 1984, Toffoli et Margolus, 1987].

## Discussion

Les modèles à seuil, ou d’autres automates cellulaires qui reposent sur la notion de seuil, ont été utilisés pour modéliser l’adoption d’innovations ([Blume, 1993], [Ellison, 1993, Valente, 1995b], et [Young, 1999, Young, 2002, Young, 2005]). L’utilisation d’automates cellulaires permet également d’étudier une diffusion spatiale (par ex. [Bhargava *et al.*, 1993]). Ces modèles ont parfois été utilisés pour modifier la persuasion ([Goldenberg *et al.*, 2001]). Ces modèles analogiques ont conduit à de nombreuses observations intéressantes (voir notamment [Weisbuch et Boudjema, 1999]). Suite à de tels travaux, Valente a ainsi pu proposer un meilleur ciblage des individus par leur position dans le réseau social (identification des leaders) [Valente, 1995b]. En cas d’application au terrain, le modèle de comportement individuel est généralement davantage détaillé. Par exemple, lorsque Berger modélise la diffusion d’innovations en agriculture, il utilise un seuil qui conduit à l’adoption, mais développe également un modèle de décision individuel élaboré [Berger, 2001].

Le modèle à seuil, dans sa forme pure, constitue un modèle simple (donc manipulable) et élégant d’influence sociale. Les expériences ont notamment révélé la nécessité d’une *masse critique* qui permettra une large diffusion dans la population ; cette masse critique dépend à la fois de la distribution des seuils et du réseau qui supporte les interactions. Les extensions de modèles à seuil, en ajoutant des influences externes ou en complexifiant le comportement individuel, ont également permis de gagner en compréhension sur la diffusion d’innovation.

Leur simplicité limite toutefois leur pouvoir descriptif. Plusieurs auteurs soulignent notamment que le processus de décision est extrêmement stylisée au regard de notre connaissance de ce processus individuel ([Weisbuch et Boudjema, 1999], [Deffuant, 2001, p. 12]). En particulier, les processus de communication et l’incertitude sur l’information (ou crédibilité), centraux dans la description de

Rogers, sont absents de ces modèles [Deffuant, 2001, p. 12]. La notion de seuil est également difficile à traduire dans la réalité. Si le seuil représente un gain attendu, cela suppose que les individus sont déjà conscients de l'apport de l'innovation [Deffuant *et al.*, 2005], tandis que nous avons vu que l'absence d'information, des croyances subjectives, ou une non compréhension de l'information sont des facteurs explicatifs de l'adoption ou du rejet d'une innovation. Par ailleurs, le manque de connaissances sur la structure des réseaux sociaux réels limite l'apport de ces modèles [Weisbuch et Boudjema, 1999], les simulations sur réseaux réels révélant des différences sensibles par rapport aux simulations sur graphes artificiels (voir par exemple [Valente, 2005]).

Comme le note Valente, peu de données de terrain incluent à la fois le réseau d'interactions et l'adoption de l'individu dans le temps [Valente, 1993, Valente, 1995a]. Une telle collecte de données implique un coût important, et un requière un protocole d'enquête prévu d'emblée pour valider une modélisation individu-centrée. Aussi, les modèles reposant sur des modèles à seuil sont-ils généralement validés sur des extrapolations de données [Valente, 1995a, Berger, 2001].

### 4.2.3 Modèles de dynamique d'opinion

#### Principes

Le courant des modèles de dynamique d'opinion [Weisbuch *et al.*, 2005, Lorenz, 2007] est né d'expériences de psychologie sociale sur la recherche de consensus en groupe [Moscovici et Doise, 1992]. Dans un groupe, la discussion mène souvent à une radicalisation des opinions du groupe, là où l'on s'attendrait au contraire à une convergence vers un compromis entre les opinions individuelles. Afin de mieux comprendre ces phénomènes, des modèles individu-centrés inspirés de la physique statistique furent développés par Galam et Moscovici [Galam et Moscovici, 1991b, Galam et Moscovici, 1991a]. Dans ces modèles et leurs évolutions [Young, 1998], les opinions étaient considérées comme binaires. Or, il est rare qu'une opinion soit manichéenne; en réalité, on peut adopter une opinion *plus ou moins* extrême, ou être *plus ou moins* convaincu de quelque chose. Ce constat a conduit au développement de modèles dans lesquels les opinions sont continues. Lorsque deux agents se rencontrent, leurs opinions s'influencent mutuellement, chacun faisant converger son opinion vers celle de l'interlocuteur. Un tel modèle conduit à une uniformisation des opinions, contrairement à la radicalisation observée sur le terrain.

C'est pourquoi la notion de *seuil d'interaction* a été ajoutée à ces modèles, afin de représenter la notion intuitive que deux individus ne s'influencent que si leurs opinions ne sont pas trop éloignées. L'intégration de cette notion de seuil dans des systèmes multi-agents a été réalisée indépendamment par Deffuant et Weisbuch dans le modèle dit de *bounded confidence* [Deffuant *et al.*, 2000, Weisbuch *et al.*, 2002], et par Hegselmann et Krause [Hegselmann et Krause, 2002]; ces modèles diffèrent principalement par leur mode d'interaction, le premier étudiant les interactions des agents par paires

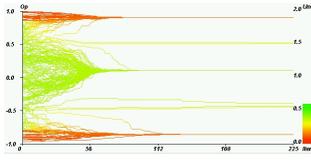


FIG. 4.2: convergence centrale

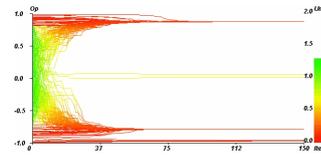


FIG. 4.3: bipolarisation

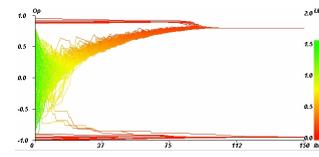


FIG. 4.4: polarisation

FIG. 4.5: Exemples des trois types de convergence qui apparaissent dans le modèle de dynamique d'opinions de *relative agreement* [Deffuant *et al.*, 2002]

tandis que les seconds analysent des interactions de groupe [Urbig et Lorenz, 2004]. Ces modèles ont attiré l'attention de plusieurs domaines intéressés par les dynamiques sociale ou les recherches de consensus [Lorenz, 2007] ; ils ont également été appliqués à la diffusion d'innovations [Deffuant, 2001, Deffuant *et al.*, 2005].

### Modèle de *bounded confidence*

Le modèle de Deffuant et Weisbuch a connu plusieurs évolutions. Dans le modèle original de *bounded confidence* [Deffuant *et al.*, 2000, Weisbuch *et al.*, 2002], une opinion est décrite par une valeur continue positive ou négative. Lorsque deux agents se rencontrent, leurs interactions provoquent une altération des opinions de chaque agent vers celle de l'interlocuteur, sauf si les opinions sont trop éloignées l'une de l'autre. Ce mécanisme peut être assimilé à diverses observations de sciences humaines, comme le rejet d'informations trop dissonantes avec les croyances préalables [Festinger, 1974], ou l'échec de persuasion observé en psychologie sociale quand l'information reçue semble trop radicale [Moscovici, 2005]. Bien que le terme générique d'"opinion" soit retenu, le principe de cette valeur continue est originaire de la notion d'attitude en psychologie sociale, ou peut représenter les profits attendus pour un produit [Deffuant, 2001].

Les simulations de ces interactions simples font émerger une dynamique intéressante caractérisée par trois types de convergences : convergence centrale (la majorité des agents atteint un consensus - Fig. 4.2), bipolarisation (la population se scinde en deux groupes polarisés à chaque extrême - Fig. 4.3) et polarisation unique (toute la population converge vers un seul extrême - Fig. 4.4). Le type de convergence dépend des opinions initiales attribuées à la population, de la fréquence des interactions ; la topologie du réseau influence également la convergence [Amblard et Deffuant, 2004, Weisbuch, 2004, Deffuant, 2006]. Diverses évolutions de ce modèle ont été explorées, par exemple en ajoutant des médias de masse au modèle [Mckeown et Sheehy, 2006].

### Modèle de *Relative Agreement* et évolutions

Ce modèle a ensuite évolué en modèle dit de *Relative Agreement* [Deffuant *et al.*, 2002]. Dans ce modèle, une variable supplémentaire d'incertitude est associée à l'opinion. Deux nouveaux phénomènes sont basés sur cette variable. D'une

part, un individu plus convaincu (moins incertain) est également plus influent. D'autre part, un agent ayant une faible incertitude se laissera moins facilement convaincre, et modifiera donc moins son opinion lors d'une interaction. Ce modèle évite l'influence sociale binaire du modèle de *bounded confidence*, dans lequel l'influence cessait brutalement à partir d'une distance donnée entre les opinions. Le modèle de *Smooth Bounded Confidence* subsume et affine le processus d'interaction du modèle de *Relative Agreement*. Une analyse détaillée des phénomènes apparaissant dans le modèle, rapporté à diverses théories de sciences humaines, prouve une descriptivité certaine d'un modèle qui demeure néanmoins simple [Deffuant *et al.*, 2004].

La dynamique de ces modèles rappellent fortement des observations qualitatives de terrain. Ainsi, une population modérée mais sans forte incertitude ne sera pas influencée par la présence d'extrémistes. Par contre, une population modérée sans certitude peut être attirée par un extrême.

Le modèle de *Relative Agreement* constitue le mécanisme d'apprentissage social d'un modèle descriptif de diffusion d'innovations (projet IMAGES [Deffuant, 2001]), et fut plus récemment proposé comme une brique fondamentale d'un modèle générique de diffusion d'innovations [Deffuant *et al.*, 2005].

### Apports

Les modèles de dynamique d'opinion étaient à la base développés pour étudier les phénomènes de radicalisation observés en psychologie sociale. Ils ont ensuite été dérivés comme une composante générique d'influence sociale susceptible d'être utilisée dans un modèle de diffusion d'innovations. L'influence sociale représentée dans ces modèles, tout comme dans les modèles à seuil, peut être perçue comme à la fois informationnelle et normative. L'information est stylisée comme une valeur continue, qui pourrait être vue comme une attitude envers l'innovation ou comme une évaluation sociale de cette innovation (c'est d'ailleurs à ce titre que l'opinion est utilisée dans les modèles de diffusion d'innovation). La prise en compte de l'incertitude sur l'information correspond à un élément important identifié en diffusion d'innovations.

## 4.3 Modèle épidémique de la transmission d'information

### 4.3.1 L'information comme une épidémie

L'approche épidémique est généralement utilisée pour décrire la transmission d'information à propos d'innovations [Geroski, 2000], et plus généralement la transmission d'information en général (qu'il s'agisse explicitement de bouche à oreille [Goldenberg *et al.*, 2001], de rumeurs [Nekovee *et al.*, 2007] ou plus généralement de croyances [Lynch, 1996]). Ce parallèle est intuitif : il suffit d'une exposition à une information pour devenir informé, et potentiellement transmettre l'information à quelqu'un d'autre. Les premières traces académiques de cette approche se retrouvent dans *Nature* en 1964, avec l'article "*Epidemics and Rumours*" de Daley

et Kendall [Daley et Kendall, 1964], complété par “*Generalization of epidemic theory : an application to the transmission of ideas*” de Goffman et Newill [Goffman et Newill, 1964]. Les questions posées en modélisation des épidémies concernent les conditions de pandémie (“A partir de quel seuil de contagion une maladie va-t-elle devenir une pandémie?”) et les moyens pour contenir l’épidémie (“Combien de personnes vacciner pour limiter l’épidémie, et lesquelles?”). Appliquée à la transmission d’information, l’approche est inverse : on cherche plutôt à maximiser la population touchée par une information.

En considérant la transmission d’information comme un processus épidémique, on bénéficie des analyses existantes, qu’elles soient analytiques ([Bailey, 1957][Bailey, 1975] ou par simulation [Hethcote, 2000] [Boccaletti *et al.*, 2006]). Le modèle d’épidémie le plus simple, nommé SIR, fut proposé dans les années 1920 par Lowell Reed and Wade Hampton (non publié). Le modèle SIR suppose que chaque individu peut être dans l’un des états *Susceptible* ( $S$ ), *Infected and Infectious* (contaminé et contagieux) ( $I$ ) ou *Removed* ( $R$ ) (ou Recovered, ou encore refractory). L’état Removed, dans le cas d’une épidémie, signifie que l’individu est soit guéri et immunisé, soit décédé ; dans les deux cas, il devient inactif dans le système, étant incapable de contaminer à nouveau ou d’être contaminé. Les seules transitions possibles entre états sont  $S \rightarrow I$  et  $I \rightarrow R$ . Assimilés à l’information,  $S$  correspond à l’état unaware,  $I$  à un individu aware et transmettant de l’information, et  $R$  un individu qui possède toujours l’information, mais ne la transmet plus. A chaque pas de temps, les individus infectieux ont en moyenne  $\beta$  contacts choisis aléatoirement dans toute la population. Les individus contagieux ( $I$ ) se rétablissent et acquièrent l’immunité (ou périssent) à un taux  $\gamma$  par pas de temps. On peut décomposer la population en trois “compartiments” (catégories) :  $S(t)$  représente le nombre d’individus en état  $S$  au temps  $t$ ,  $I(t)$  le nombre d’individus contagieux et  $R(t)$  le nombre d’individus en état  $R$ . L’ensemble de la population de taille  $N$  est couvert par ces compartiments :  $S(t) + I(t) + R(t) = N$ . Si un individu susceptible rencontre aléatoirement un individu contagieux, il devient lui-même contaminé. Le nombre de rencontres d’un individu susceptible avec un individu infectieux par pas de temps est  $\beta I(t)/N$ . Par conséquent, le nombre d’individus susceptibles qui seront contaminés à chaque pas de temps est  $\beta S(t)I(t)/N$ .

On peut dériver de ces formules un seuil épidémique en dessous duquel la propagation reste contenue, et au dessus duquel l’épidémie se change en pandémie. Vu par la physique en terme de transitions de phase, ce seuil correspond à un point critique ou masse critique [Boccaletti *et al.*, 2006]. Concrètement, dans un modèle simple comme SIR, le taux de reproduction est de 1 : si chaque personne transmet le message en moyenne à une autre personne, l’épidémie se propagera à toute la population. Cette notion de masse critique est particulièrement intéressante pour le *mix marketing* ([Goldenberg *et al.*, 2000]), puisqu’elle laisse entendre qu’en touchant un nombre suffisant de personnes, on obtient à coup sûr une excellente connaissance de l’innovation dans la population. On peut également calculer le temps de propagation de l’épidémie (voir [Boccaletti *et al.*, 2006] pour une très bonne description de l’analyse formelle)..

Il apparaît clairement de cette formalisation qu'à mesure que le nombre d'individus contaminés augmente, les possibilités de contagion augmentent également, conduisant à une croissance exponentielle des individus contaminés. Toutefois, après un certain temps (lorsque la moitié de la population est contaminée), le nombre d'individus en état susceptible se réduit, et les rencontres aléatoires ont moins de chance de mener à la contagion d'un nouvel individu. Ce mécanisme, à lui seul, génère donc une courbe cumulée d'individus contaminés en forme de "S". Cette courbe de connaissance ne peut pas être assimilée directement à l'adoption [Geroski, 2000], puisque le temps entre la connaissance et l'adoption est connu pour être conséquent, et varie entre les individus. Ce modèle est donc généralement utilisé comme une "brique" de transmission d'information, à laquelle est ajouté un mécanisme d'adoption.

### 4.3.2 Epidémies sur réseau

Si le modèle précédent supposait que les rencontres peuvent apparaître aléatoirement dans la population, on sait que les rencontres se produisent généralement entre les mêmes individus, selon des structures données [Wasserman et Faust, 1994a]. Différents modèles ont été construits pour analyser ces effets de réseau, d'abord en distinguant plusieurs groupes d'individus (par ex. [Ball *et al.*, 1997]), puis en utilisant des générateurs reproduisant des propriétés statistiques observées sur des réseaux sociaux. Dans ce cas, les individus ne se rencontrent que s'il existe un lien entre eux. La plupart du temps, l'interaction sur un lien est supposée systématique : à chaque pas de temps, les agents liés se rencontrent.

Différentes études par simulation ont donc été menées sur des réseaux small-world [Moore et Newman, 2000] [Newman, 2002] et scale-free [Pastor-Satorras et Vespignani, 2001] [Zanette, 2002]. Sans surprise, les simulations révèlent des dynamiques sensiblement différentes sur des réseaux. La première différence est *le temps de diffusion* d'une épidémie dans la population, qui est influencé par la distance moyenne qui sépare les individus sur le réseau. Par ailleurs, quand on positionne les individus sur un réseau, il apparaît une forme d'*hétérogénéité des agents par leur position sur ce réseau*. Dans le cas d'un réseau small-world, un individu peut être relié uniquement à sa clique, ou jouer le rôle de connecteur entre deux cliques. Ce dernier a un impact plus important, puisqu'il pourra transmettre de l'information en dehors de sa clique. De même, dans un réseau scale-free, un individu fortement connecté peut contaminer un plus grand nombre de personnes. Ces individus à la connectivité plus élevée ou plus variée doivent être les premiers à être vaccinés dans le cas d'épidémies, ou les premiers informés pour maximiser la transmission d'information. Un *ciblage des individus* dont la connectivité est la plus diverse est donc plus efficace en marketing.

D'un point de vue analytique, la recherche du seuil épidémique devient un problème de percolation [Goldenberg *et al.*, 2000], c'est-à-dire de l'existence d'un chemin menant à la contagion dans le graphe social. Les études par simulation, ou analytiques [Ganesh *et al.*, 2005] [Newman, 2002], montrent que le seuil épidémique dépend

non seulement des paramètres de contagion eux-même, mais aussi des propriétés statistiques du réseau utilisé.

### 4.3.3 Pertinence de l'approche épidémique pour le bouche à oreille

Le modèle épidémique correspond à une perception intuitive de la propagation d'information, tout en se rattachant à une classe de phénomènes épidémiques bien étudiés. Ces modèles ont permis de démontrer des phénomènes qualitatifs intéressants pour améliorer les campagnes de communication. Toutefois, on peut s'interroger sur la vraisemblance de la métaphore épidémique pour la transmission d'information à propos d'innovations. Il s'agit à l'évidence de modèles analogiques, qui visent à obtenir une connaissance qualitative sur la dynamique sans être mis en correspondance avec la réalité. Afin que cette connaissance ait un sens, il semble indispensable de s'interroger sur la plausibilité des processus décrits par rapport au phénomène réel. Or, la vraisemblance de l'approche épidémique pour la représentation du bouche à oreille semble discutable sur plusieurs points.

#### interaction systématique vs. motivée

Dans les modèles actuels, un lien représente une interaction systématique des individus à chaque pas de temps. Or, comme nous l'avons vu, les liens entre individus d'une même clique semblent être plus fréquents que les liens entre cliques [Wasserman et Faust, 1994a]. On peut alors utiliser les liens du graphe social pour décrire une probabilité plus ou moins importante d'interaction entre les individus [Ball *et al.*, 1997] [Ganesh *et al.*, 2005].

Toutefois, même aléatoire, cette interaction n'est pas motivée. Or, on sait que les individus communiquent sur un produit en fonction de leur intérêt pour ce produit - curiosité, satisfaction ou dissatisfaction. De façon plus générale, il est difficile d'imaginer que les individus d'un réseau soient tous intéressés par une information. Lors de simulations tenant compte des centres d'intérêts différents des individus, [Wu *et al.*, 2004] a prouvé que l'épidémie a une taille finie et très limitée. De plus, lorsque deux individus se rencontrent, ils discutent d'un nombre limité de sujets. L'étude de terrain de Carl [Carl, 2006b] indique approximativement que seul un tiers des conversations portent sur des produits. Parmi tous ces produits, seule une innovation est étudiée dans la simulation. Supposer qu'une innovation devient un sujet de conversation intéressant pour tous les sujets, qui sera transmis par chacun deux, est donc irréaliste.

#### crédibilité de l'information

D'autres paramètres peuvent jouer un rôle pendant la communication. Si l'on vous recommande un produit, le recommanderez-vous systématiquement ? En interrogeant des sujets sur les raisons pour lesquelles ils ont parlé ou non d'un produit, plusieurs nous ont expliqué qu'ils ne transmettraient pas une information qu'ils n'ont pas vérifiée. En effet, il faut bien distinguer la propagation d'une rumeur, ou de l'existence d'un produit, d'une recommandation. En transmettant une recommandation, un sujet met en jeu sa

propre crédibilité, et souhaite orienter au mieux le choix de son interlocuteur. Il est donc peu probable qu'il transmette systématiquement une information reçue de façon indirecte. Réciproquement, l'interlocuteur attend une argumentation qui supporte la recommandation. En observant des évaluations de produits mises à disposition sur des sites Internet, on constate que les consommateurs s'appuient fréquemment sur leur bonne connaissance du produit, sous la forme "je possède depuis trois mois le produit, je peux donc dire que...". La crédibilité de l'information joue donc un rôle à la fois dans la transmission du message et son acceptation par le récepteur. En tenant compte d'une proportion, même partielle, des individus qui ne transmettent que des informations jugées suffisamment vraisemblables, on peut supposer que l'épidémie d'information devient très limitée.

#### **transmission d'information vs. recherche d'information**

Dans un modèle épidémique, l'information est binaire : on sait ou on ne sait pas. Sur une telle base, il est impossible de représenter la recherche d'information. Or, nous avons vu que les individus reçoivent d'abord une information limitée, puis recherchent de l'information auprès de leurs relations. En reprenant la notation SIR, il apparaît qu'un individu en état R qui n'est plus contagieux (qui ne transmet plus d'information) mais qui possède néanmoins cette information, peut être questionné et avoir une influence sur la dynamique. On peut donc supposer - ce qui nous vérifierons plus loin par simulation (p. 7.2.3) - que la représentation de la recherche d'information modifiera la transmission d'information de façon notable.

#### **information binaire vs. compréhension et persuasion**

Comme le note Geroski en discutant l'approche épidémique [Geroski, 2000], il existe une grande différence entre recevoir une information, la comprendre, et être persuadé par cette information. L'*awareness* ne conduit pas seule à l'adoption. Même si on limite l'utilisation du modèle épidémique à la transmission d'information, sa descriptivité est donc trop limitée pour supporter un mécanisme d'adoption plausible.

#### **discussion**

Etant donnés ces manques de représentativité, la métaphore épidémique pour représenter la diffusion d'information doit donc être considérée avec prudence. La nature des interactions semble plausible pour modéliser des rumeurs (au sens faible, puisqu'il n'y a pas ici introduction d'hypothèse privées) ou la transmission de l'existence d'une innovation. Par contre, dans le bouche à oreille, la communication peut être recherchée, est motivée, et tient compte de la crédibilité des informations. L'approche épidémique ne peut donc pas être considérée comme un modèle plausible du bouche à oreille. En tant que tel, le modèle épidémique est un modèle analogique qui a permis de mieux comprendre les dynamiques d'information, mais ne peut être rapporté à un cas réel. Geroski va plus loin dans cette critique; pour lui, la domination du modèle épidémique limite notre compréhension du phénomène réel et

circonscrit le champs des actions que nous pourrions entreprendre en diffusion d'innovations [Geroski, 2000].

#### 4.3.4 Limites induites par le réseau social

Le réseau social ayant un impact important sur la dynamique (ses propriétés modifient le seuil épidémique), Cointet et Roth ont posé la question de la vraisemblance des réseaux utilisés [Cointet et Roth, 2007a]. Pourquoi utiliser des réseaux stylisés générés selon quelques propriétés statistiques supposées connues depuis des réseaux réels ? Ils proposent d'utiliser des réseaux réels, qui conduisent effectivement à des dynamiques différentes [Cointet et Roth, 2007b]. Ces travaux mettent en évidence l'importance du réalisme du réseau pour l'étude de cas de diffusion réels ; ils rejoignent le constat de Rogers sur le manque de connaissance sur les réseaux qui supportent l'interaction. Faute de plus d'information sur la structure des réseaux réels, il est inutile de calculer des seuils d'épidémie précis, qui ne pourront pas être rapportés à des problématiques réelles.

### 4.4 Modèles multi-agents évolués

Les modèles décrit précédemment sont des modèles analogiques. Ils demeurent simples et ne sont pas rapportés explicitement au terrain. Ils constituent des cadres conceptuels intéressants qui nous permettent de mieux appréhender les dynamiques de pression sociale, d'apprentissage social ou de transmission d'information.

De nombreux modèles ont été développés dans un but plus descriptif ; nous nous intéressons ici aux modèles basés agents, qui offrent une plus grande flexibilité pour décrire un comportement individuel complexe ou un rapport à l'environnement non trivial. On pourrait citer des modèles d'adoption de services de téléphonie [Collings *et al.*, 1999], d'adoption d'innovation agricoles [Berger, 2001, Chattoe et Gilbert, 1998].

Le projet CUBES [Ben Said *et al.*, 2002] a proposé un modèle multi-agents d'une population intégrant plusieurs éléments que l'on retrouve dans les modèles de diffusion d'innovation : agents consommateurs possédant des opinions et des attitudes, agents marques pour décrire les produits et des réseaux sociaux pour la communication. Plusieurs comportements gérant la dynamique du modèle ont été implémentés. Si le système CUBES ne permet pas d'être confronté directement à des données réelles, un travail a permis de le calibrer à l'aide d'algorithmes génétiques afin de reproduire certaines tendances comportementales observées [Ben Said, 2003].

Nous nous arrêterons sur deux modèles liés à la diffusion d'innovation. Le projet IMAGES constitue un exemple de modèle fortement couplé au terrain, associé à un important travail de collecte de données, qui révèle le potentiel et les difficultés inhérentes à la modélisation orientée agents. L'approche consumat illustre quand à

elle un modèle basé agents plus détaillé, fortement enracinée dans les observations et théories de sciences sociales.

#### 4.4.1 Projet IMAGES

##### Description

Le projet IMAGES [Deffuant, 2001] est un projet collaboratif visant à gagner en compréhension sur l'adoption de nouvelles mesures agro-environnementales en général ; le projet a été rapporté à plusieurs cas de diffusion dans différentes zones européennes, comme la diminution de l'apport en engrais (Isère, France) ou l'agriculture biologique (Allier, France). Des enquêtes individuelles ont été conduites auprès des agriculteurs dans plusieurs zones d'études en Europe. Parmi les données collectées, les agriculteurs étaient notamment interrogés sur les conséquences qu'ils percevaient dans l'innovation, sur leur attitude vis-à-vis des pratiques envers la conservation, et sur le réseau social de l'agriculteur. Le modèle développé a été paramétré et validé sur ces données, faisant de ce projet un exemple de modélisation orientée agents fortement couplée au terrain.

**Chaque agent** représente une unité agricole. Les caractéristiques des agents dans la population générée sont déterminées sur la base des questionnaires.

**Le comportement de communication** est déterminé par rapport à l'évaluation de l'innovation par l'agent ; les interactions sont donc motivées. L'émission et la recherche d'information sont toutes deux représentées. Il n'y a émission d'information que si l'agent a reçu un quelconque stimulus portant sur l'innovation. La probabilité de parler de l'innovation décroît au fur et à mesure de la diffusion.

**Les croyances** sont comprises en terme de valeurs réelles représentant le bénéfice individuel et la valeur sociale (évaluation par l'environnement social). L'incertitude est prise en compte pour chacune de ces croyances, en associant à ces valeurs un intervalle de confiance qui définit des bornes inférieures et supérieures attendues (on retrouve le modèle de *relative agreement* décrit plus haut 4.2.3)

**Le bénéfice individuel** n'est pas supposé connu par les adopants potentiels au départ, mais sera élaboré lors de la réception d'information par un média de masse ou par la rencontre d'un autre agent qui dispose d'une évaluation personnelle.

**L'influence sociale** n'existe que si les opinions des agents en interaction ne sont pas trop éloignées. Ce choix est conforme avec les constats de rejet d'information trop dissonnante.

**Différents états** ont été inclus dans les agents, qui correspondent (approximativement) aux étapes d'adoption. Un agent considère qu'il a ou non suffisamment d'information à propos de l'innovation (valeur Booléenne déterminée par l'incertitude). Il peut ensuite s'estimer intéressé ou incertain, ce qui le conduira à chercher de l'information et à adopter ou rejeter l'innovation.

**Evaluation** Au départ, il était prévu que les agents évaluent l'innovation sur la base de leurs motivations (approche multi-critères). Les motivations des adoptants ont

été déterminées par interviews, et raffinées par les modélisateurs. Ces motivations incluent des motivations économiques et psychosociales. Toutefois, la description de différentes motivations nécessitant un nombre de paramètres trop important, il a été décidé de résumer l'évaluation, à l'instar des modèles à seuil, aux deux forces de l'évaluation de l'environnement social (valeur sociale) et du bénéfice individuel attendu.

**La structure des interactions** a été collectée lors des interviews, puis générée en fonction de ces données (voir [Amblard et Deffuant, 2001]). Différents types de lien sont représentés (voisinage, professionnel, aléatoire).

**Les variables décisionnelles** incluses dans le modèle portent sur l'évaluation de l'innovation (et l'incertitude associée) qui résultera de la réception d'un message (pouvoir persuasif), ainsi que sur le ciblage d'un groupe d'agriculteurs et la visite personnelle de ces agriculteurs pour souscription à l'innovation.

### Apports

En tant que modèle de diffusion d'innovations, ce modèle lève de nombreuses limites des modèles décrits précédemment. La communication interpersonnelle est motivée, l'incertitude de l'information est prise en compte dans le comportement de communication et d'adoption. Différentes étapes d'adoption sont représentées, et l'évaluation individuelle de l'innovation n'est pas supposée connue *a priori*. La présence des variables décisionnelles en fait un modèle potentiellement utile pour une institution.

Du point de vue de la plausibilité, le modèle a été construit sur la double base des observations directes et des théories existantes. Les résultats de simulation ont été rapportés aux cas réels, prouvant que ce modèle simplifié s'approche des observations réelles ; toutefois, ce modèle semblait trop générique pour reproduire en l'état certains cas de diffusions observés. Diverses expérimentations ont porté sur le modèle avec des scénarios réalistes. Par ailleurs, l'espace des paramètres a partiellement été étudié de façon abstraite par analyse de sensibilité.

La description détaillée des motivations des agents n'a pas pu être maintenue dans le modèle final, car cela aurait conduit à un nombre de paramètres trop importants, paramètres qui s'avèrent d'ailleurs difficiles à paramétrer. On retrouve ici le difficile compromis entre généralité et descriptivité que nous avons évoqué plus haut. Ce modèle, à la suite d'un long processus itératif, propose un compromis intéressant entre ces deux objectifs contradictoires.

D'un point de vue épistémologique, ce projet illustre la pertinence d'un aller-retour entre modèle analogique et modèle descriptif : le modèle est basé pour partie sur de précédents modèles de dynamique d'opinion, et a été simplifié pour en analyser plus précisément la dynamique [Deffuant *et al.*, 2002, Deffuant *et al.*, 2005]. Une version destinée à la diffusion d'innovations en général [Deffuant *et al.*, 2005] a été extrapolée du modèle appliqué. Par ailleurs, la collecte d'information elle-même s'est révélée

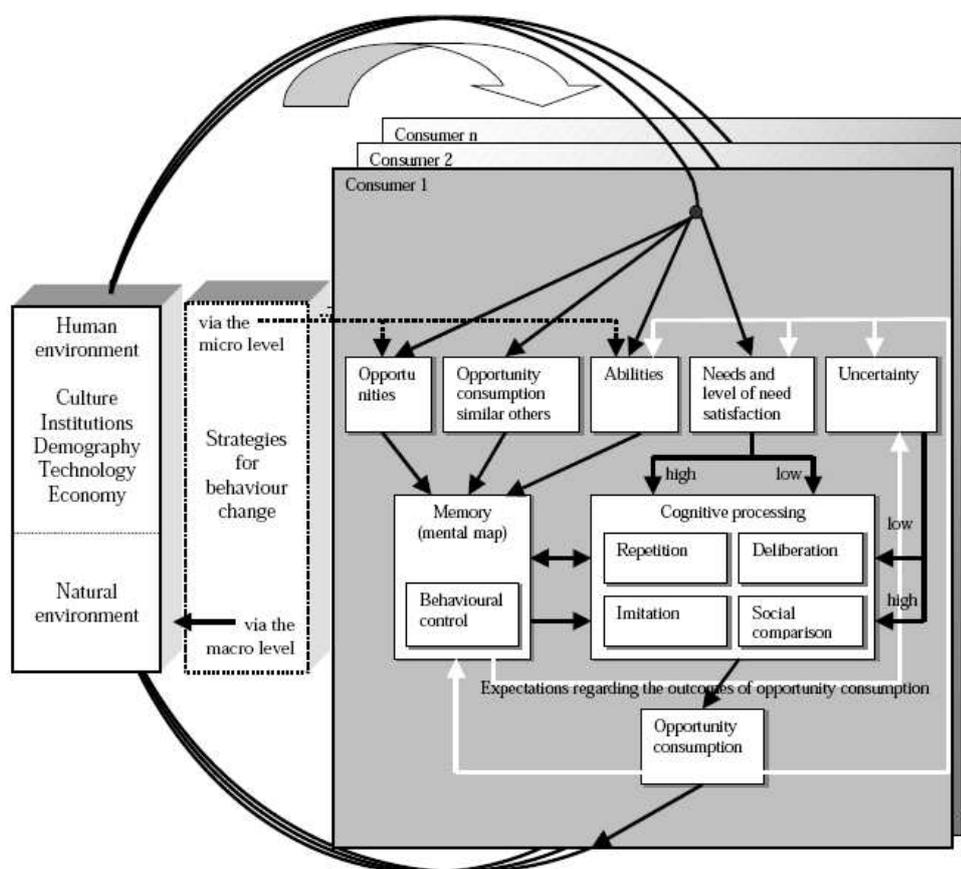


FIG. 4.6: Représentation schématique du comportement des consommateurs (d'après [Jager, 2000])

itérative : un premier questionnaire a été conçu, un travail de modélisation préliminaire a révélé la nécessité d'informations supplémentaires, conduisant à une seconde vague d'enquête. L'élaboration de ce modèle a d'ailleurs été collaborative, différents chercheurs provenant de domaines différents ayant indépendamment développé des prototypes ciblés sur une composante particulière avant fusion (et simplification) du modèle final.

#### 4.4.2 Approche *consumat*

##### Principe

On appelle *dilemme social* une situation dans laquelle l'intérêt de l'individu va à l'encontre du bien-être commun. Or, tout comme dans un dilemme de prisonniers, si chaque individu choisit la stratégie qui maximise son bénéfice individuel, la totalité des agents subit les conséquences néfastes de ces choix. C'est particulièrement le cas pour les ressources naturelles, quand des entités économiques consomment des ressources communes à renouvellement lent pour satisfaire des intérêts à court terme.

L'*approche consumat* [Jager *et al.*, 1999, Jager, 2000, Jager *et al.*, 2001] propose d'étudier cette problématique par un modèle basé agents dans lequel le comportement des agents est inspiré de théories psychologiques. Comme on peut le voir sur la figure 4.6, le modèle de comportement des agents est très détaillé. Les composantes essentielles d'un modèle comportemental réaliste, pour les auteurs, sont les besoins, la prise de décision en fonction de ces besoins, et l'apprentissage [Jager et Janssen, 2003]. Les auteurs soulignent la nécessité d'utiliser des règles comportementales plausibles [Janssen et Jager, 2003]. Ce modèle a été appliqué à divers problèmes de gestion de ressources partagées [Jager *et al.*, 2000, Jager *et al.*, 2002].

Les facteurs pris en compte dans un agent consumat étant relativement génériques, le même modèle a été étendu à des choix de produits. Il est par exemple possible de reproduire les situations de verrouillage du marché sur un produit particulier ("*lock-in*"), ce qui est illustré par le cas du clavier QWERTY [Jager, 2000], ou est étudié de façon générale [Janssen et Jager, 1999, Janssen et Jager, 2002]. Les auteurs insistent sur le besoin de contact entre le modèle et le terrain, notamment par paramétrage ou validation depuis des données d'enquête [Vindigni *et al.*, 2002] ou des données en laboratoire [Jager et Janssen, 2002].

De façon générale, les consumats sont des agents qui peuvent choisir entre différentes opportunités, et agir sur leur environnement, en fonction de leurs caractéristiques propres. Ils forment des attentes, disposent de processus cognitifs évolués, et réévaluent leurs choix et leurs connaissances. En autres, on peut retenir dans le modèle :

**Les motivations** des consumats sont basées sur les motivations identifiées par Max-Neef [Max-Neef, 1992], qui incluent des motivations physiques et psychosociales. Comme cela fut identifié par Maslow ou Max-Neef, les motivations peuvent être satisfaites, auquel cas elle ne constituent plus une force dirigeant l'individu. En d'autres termes, si un besoin de reconnaissance sociale est satisfait par l'achat d'un produit, le sujet ne ressentira plus le besoin d'acheter un autre produit pour augmenter sa popularité pendant un moment.

**Les caractéristiques des consumats** sont très détaillées; elles comprennent non seulement les motivations, mais également les aptitudes à exploiter une opportunité, leur budget, leur temps disponible, leur tolérance à l'incertitude. Ces caractéristiques peuvent changer dans le temps, le choix d'une opportunité menant à d'autres aptitudes, un autre budget, etc.

**Le traitement cognitif** (raisonnement et décision) tient compte des différents types de prise de décision, depuis la décision habituelle jusqu'à la décision raisonnée. Le choix de ces modes de cognition est déterminé par l'intensité des besoins, le contrôle perçu de l'individu sur l'action et l'état d'incertitude de l'agent. Selon ces paramètres, le consumat se repose sur le comportement des autres (imitation), répète son action précédente (répétition) ou raisonne pour choisir un meilleur choix (délibération). Il peut également observer le comportement des autres agents et se (comparaison sociale)

**L'incertitude** est ici définie comme la différence entre les attentes formées par l'agent et les conséquences réelles de son comportement. Au sens de la psychologie du consommateur, cela s'assimile au paradigme satisfaction/dissatisfaction.

Du point de vue d'une institution, plusieurs variables décisionnelles sont disponibles [Jager, 2000, p. 114] : modifier la capacité d'une opportunité à satisfaire des motivations, changer les ressources nécessaires pour une opportunité, changer les aptitudes des consommateurs eux-mêmes, ou même changer les normes culturelles qui déterminent l'importance relative des besoins.

### Apports

L'approche consommateur ne porte pas à proprement parler sur la diffusion d'innovations ; en réalité, elle a été étendue *a posteriori* à des choix entre plusieurs produits. On ne peut donc pas être surpris de ne pas retrouver les facteurs explicatifs observés en diffusion d'innovation, tels que l'observabilité ou la compréhension de l'information, ni les variables décisionnelles liées à la communication. Ce modèle demeure toutefois extrêmement instructif dans une démarche de modélisation de diffusion d'innovation. On note d'ailleurs qu'il inclut explicitement la comparaison sociale ou la recherche d'avis extérieur. Le problème majeur de ce modèle semble être la multiplicité des paramètres, qui le rend sans doute difficile à manipuler et/ou à appliquer à un cas réel.

Le modèle de consommateur est basé sur une importante littérature en sciences humaines, jouant le rôle de cadre intégratif de nombreuses théories psychologiques et psychosociales généralement analysées indépendamment. Il constitue l'exemple type d'une simulation basée sur des agents "cognitifs" [Perez et Batten, 2006]. Il est particulièrement remarquable par son utilisation des motivations humaines [Perez et Batten, 2006, p. 40] ; l'ensemble des comportements est basé sur la satisfaction de besoins, qui résument les besoins physiologiques et psychosociaux. Par ailleurs, le modèle cognitif détermine la communication en fonction des motivations du consommateur.

Du point de vue du comportement du modèle lui-même, qui a été testé dans son espace de paramètres, on constate sans surprise le fort impact du réseau social sur la dynamique collective [Janssen et Jager, 2003].

## 4.5 Discussion

### 4.5.1 Enseignements des modèles existants

Les modèles que nous avons parcourus, indépendamment de leurs objectifs et méthodes propres, convergent vers des constats similaires. Ces constats naissent tant de l'expérimentation avec les modèles que du processus de modélisation lui-même.

**Le fort impact de la structure des interactions** est mis en évidence, tant dans les modèles dits d'apprentissage social, les modèles à seuil sur

réseau, les simulations d'épidémie d'information que dans les modèles d'opinion. Des simulations multi-agents portant plus précisément sur la dynamique d'information sur des réseaux (par ex. [Cowan et Jonard, 2004], [Amblard et Deffuant, 2001] ou [Cointet et Roth, 2007b]) soulignent également la sensibilité de la dynamique collective au réseau, en insistant sur le besoin de structures d'interaction plus représentatives [Cointet et Roth, 2007a]. Diverses simulations prouvent également que la prise en compte d'interactions plus ou moins fréquentes sur ces réseaux conduit à des dynamiques différentes (par exemple, en tenant compte des liens forts ou faibles [Goldenberg *et al.*, 2001]). Il sera donc irréaliste de prétendre développer un modèle véritablement descriptif si l'on ne développe pas une structure d'interaction plausible. S'il est difficile de mesurer les interactions réelles, il semble au moins pertinent de tenir compte des connaissances qualitatives issues lors des observations de terrain. Nous avons vu plus haut que les enquêtes menées en diffusion d'innovations incluent maintenant des questions sociométriques afin de savoir quelles sont les sources d'influence d'un sujet. Le projet IMAGES démontre la transposition possible de ces connaissances en réseau d'interactions généré de façon *ad hoc*.

**La nécessité d'inclure les variables décisionnelles** dans un modèle, afin que ce modèle soit utile. La critique du modèle de Bass porte essentiellement sur le manque de variables décisionnelles ; les travaux récents s'orientent d'ailleurs vers la prise en compte des variables liées au *mix marketing*. Il est intéressant de noter qu'un modèle suffisamment descriptif inclut naturellement les variables décisionnelles, car elles sont généralement également des variables explicatives ; ainsi, si le modèle de consumat ne semblait pas à la base développé comme un outil d'aide à la décision, il permet de déterminer les stratégies utilisables pour lancer une innovation.

**Le manque de données** constitue une limite importante au paramétrage et à la validation des modèles. Ce problème a déjà été identifié au niveau des modèles agrégatifs qui détaillent les niveaux de connaissance dans la population. Il a également été souligné dans le projet IMAGES, le manque de connaissances sur les critères de décision, pourtant reconnus comme facteurs explicatifs, conduisant à leur suppression dans le modèle final (p. 80). Comme nous l'avons souligné dans la partie modélisation, il est donc important de sélectionner les indicateurs et paramètres du modèle, dès sa conception, en tenant compte des données potentiellement disponibles (p. 2.3.2).

**L'influence des paramètres initiaux** est importante dans un phénomène de diffusion, la dynamique du modèle pouvant changer fortement pour une petite variation de paramètre. Ces systèmes peuvent être dits chaotiques, tout comme le sont les phénomènes météorologiques [Lorenz, 1996]. De façon générale, les systèmes sociaux sont considérés comme chaotiques [Kiel et Elliott, 1997, Eve *et al.*, 1997], notamment en psychologie sociale [Vallacher et Nowak, 1994]. Ce constat nous concerne à deux points de vue. D'une part, un modèle déterministe de la diffusion d'innovations qui s'avèrerait instable ne le serait pas nécessairement par manque de connaissance, mais reflèterait au contraire la réalité. D'autre part,

un modèle visant à être prédictif ne pourrait l'être qu'en disposant de données très précises sur l'état initial du système social ; or ces données seront probablement impossibles à collecter, non seulement par l'impossibilité de collecter des informations sur tous les individus et leurs interactions, mais aussi parce que des données telles que les croyances inconscientes ou les besoins latents sont difficiles à identifier chez un être humain. L'identification de ce risque ne peut que limiter notre espoir de développer un jour un modèle prédictif de diffusion d'innovations. Par contre, il demeure possible d'analyser les attracteurs du modèle et les conditions de convergence, comme cela a été fait par exemple en dynamique d'opinions (4.2.3) ou dans l'approche consumat (4.4.2).

**La simplicité du modèle** - conformément aux constats dans le domaine (*cf* 2.4.5 p. 29) - est déterminante à trois titres. Tout d'abord, elle rend le modèle *manipulable* et analysable. Le modèle développé dans le projet IMAGES a dû être simplifié pour une étude complète de sa dynamique (p. 80) . Ensuite, la simplicité permet de *confronter le modèle au phénomène réel*, à la fois pour paramétrage et pour validation. Ce constat doit être relativisé, puisque les modèles trop simples s'avèrent incapables d'être confrontés à une expérience réelle ; il s'agit donc bien de rechercher un compromis simplicité-descriptivité. Enfin, un modèle simple est *communicable*. Le modèle de Bass a été largement diffusé pour sa simplicité, tandis que le modèle du projet IMAGES n'a pas pu être publié dans son intégralité, les publications scientifiques impliquant de sévères limites en volume.

#### 4.5.2 Le potentiel de la modélisation basée agents

Dans son ouvrage de 2003, le sociologue Everett Rogers démontre que les recherches en diffusion d'innovation sont relativement stagnantes [Rogers, 2003] ; les méthodes appliquées sont stables, les modèles appliqués à la chaîne, sans nouvelle question ou approche. Cette même année, le géographe Peter Gould converge vers un constat similaire [Gould, 1995] : les véritables processus à l'oeuvre dans la diffusion sont méconnus, conduisant au développement et raffinement de modèles mathématiques n'ayant qu'une faible portée explicative et prédictive (rapporté dans [Daude, 2006, p. 349]). *“Les méthodes employées ont tendance à circonscrire la curiosité du chercheur et à ne faire poser que les questions auxquelles elles peuvent apporter des réponses. C'est en cherchant les limites de ces méthodes qu'il est alors possible de dépasser les frontières artificielles que l'on s'est fixées, pour poser de nouvelles questions et inventer de nouveaux concepts et outils pour y répondre, lesquels constitueront sans aucun doute de nouvelles bornes qu'il faudra dépasser.”* [Gould, 1995].

Pour ces chercheurs ancrés dans la réalité du phénomène social, les modèles posent donc les mauvaises questions, n'expliquent pas les véritables processus en jeu dans la diffusion, demeurent ancrés par inertie dans les modèles précédents, et finalement échouent à faire progresser la connaissance dans ce domaine. Ces critiques sévères des modèles existants portent sur les modèles agrégatifs et de *micro-modelling* référencés par Gould et Rogers. Les modèles basés agents, comme nous l'avons vu, constituent une nouvelle approche de modélisation qui permet d'aborder cette problématique avec

un outil pertinent. Ainsi, les modèles analogiques, tels que le modèle à seuil ou le modèle épidémique, permettent de mieux comprendre comment des dynamiques collectives (adoption, stabilité du marché, etc.) émergent des interactions individuelles. Ces modèles analogiques ont été exploités afin de générer des recommandations utiles aux institutions. Toutefois, les institutions demeurent dans l'attente d'un modèle plus descriptif, qui intègre tant les facteurs explicatifs de la diffusion ou de l'échec d'une innovation que les variables décisionnelles correspondant à leurs actions possibles. On constate d'ailleurs que dans tous les courants de recherche, les modèles s'orientent progressivement dans cette direction. Nous avons vu également que des modèles orientés agents peuvent être appliqués à des cas de diffusion réels ; cette application demeure toutefois loin d'être triviale, tant du point de vue de la collecte de données que de l'étude d'un modèle détaillé.

### 4.5.3 Limites à dépasser dans les modèles de diffusion d'innovation

Toutefois, l'approche de modélisation orientée agents constitue un outil au potentiel intéressant, et non une solution en soi. Comme nous le recommande Peter Gould, nous devons d'abord analyser les limites des approches existantes. Pour simplifier, nous considérerons que l'on peut proposer un modèle utile si ce modèle a un meilleur pouvoir descriptif, intègre des variables explicatives non utilisées jusqu'alors, ou devient plus utile à une institution en intégrant des variables décisionnelles.

#### Pouvoir descriptif

On peut augmenter le pouvoir descriptif d'un modèle en décrivant mieux un phénomène donné, ou en décrivant des phénomènes non décrits à l'heure actuelle.

On pourrait améliorer le pouvoir descriptif des modèles existants en s'attaquant aux différents composants dont nous avons souligné le manque de réalisme. On peut notamment penser au réalisme des interactions, qui pourrait être amélioré en intégrant la recherche d'information et différents niveaux de connaissance. La structure du réseau social ayant un fort impact sur la dynamique, il serait également intéressant de disposer d'un modèle plus réaliste de cette structure. De façon plus générale, les facteurs explicatifs de l'adoption ou de l'échec d'une innovation devraient se retrouver dans le modèle.

Rogers souligne que les modèles se sont généralement attachés à reproduire des cas de diffusion réussis ; or les cas d'échec d'innovation sont plus nombreux que les diffusions réussies. Un modèle capable d'éclairer sur les différentes causes d'échec, ou tenant compte des facteurs d'échec de diffusion recensés par Rogers, constituerait un monde virtuel intéressant, dans lequel une institution pourrait étudier non seulement comment diffusion son offre, mais également comment ne pas échouer.

De façon secondaire, Rogers évoque également le cas des innovations incrémentales ou innovations interdépendantes, dont la vitesse d'adoption est différente des innova-

tions indépendantes. Ces innovations interdépendantes peuvent reposer sur des mêmes changements de croyances, de mêmes changements de valeurs, sur les mêmes besoins, ou être simplement liées dans les campagnes de communication.

### **Variables explicatives**

L'utilisation de facteurs explicatifs dans un modèle correspond à l'intégration de processus supposés réalistes, ce qui augmente généralement la plausibilité du modèle proposé. Or, plusieurs facteurs explicatifs de l'adoption ou du rejet d'une innovation manquent étrangement dans les modèles existants.

Pour Rogers, l'un des facteurs d'échecs de diffusion est le manque de compréhension de l'innovation. En marketing, nous avons vu que la création d'une image de marque est devenue déterminante pour imposer un produit. Lors du lancement d'une campagne, le contenu de l'information transmise est crucial, conduisant ou non à la création d'attention et à la persuasion. Plusieurs facteurs explicatifs de succès de Rogers sont liés à la connaissance : la compatibilité avec les croyances préalables, complexité perçue d'après l'information reçue sur l'offre, compatibilité avec ce qui est perçu être les valeurs sociales, l'avantage relatif évalué selon ce que l'on croit sur l'innovation. Or, ces notions de croyance et de connaissances sont fortement abstraites dans les modèles actuels, étant exemptes de toute notion sémantique.

Un autre facteur explicatif réside dans les flux de communication. Ces flux de communication influencent évidemment les croyances évoquées ci-dessus. Ces flux de communication sont principalement les échanges interpersonnels (bouche à oreille), l'expérience ou l'observation des adoptants potentiels avec l'innovation, ainsi bien sûr que la communication de masse. Des facteurs correspondent à l'observabilité et à la testabilité de l'innovation identifiés par Rogers.

### **Variables décisionnelles**

Comme nous l'avons évoqué plus haut, les leviers utilisables par une institution sont relativement peu nombreux. L'institution peut modifier les caractéristiques de l'innovation (y compris par l'ajout d'incitations financières). Les autres variables décisionnelles sont liées à la communication : communication de masse, agents de changements, mise à disposition de l'innovation en test. Comme évoqué plus haut, ces travaux en communication ne portent pas uniquement sur la communication en tant qu'élément abstrait, mais sur la transmission de connaissances (contenu sémantique). En représentant le contenu de la communication, on représenterait sa capacité à être comprise, à persuader, à attirer l'attention, ainsi que le *co-branding* de produits ou la création d'images de produits.



Deuxième partie

Modèle CoBAN  
et générateur de réseaux  
d'interactions



## Chapitre 5

# Représentation des croyances sous forme de réseaux associatifs

### Introduction

#### Objectifs

Le modèle de communication développé pendant cette thèse est nommé CoBAN, pour *COmmunication of Beliefs using Associative Networks* (communication des croyances basée sur des réseaux associatifs). Le modèle de représentation des croyances des adoptants sur une innovation constitue l'élément central du modèle CoBAN. Ce modèle doit permettre de décrire, sous une forme lisible et simple, des croyances réelles d'adoptants ; cette descriptivité vise à réduire la distance entre le modèle et la réalité du phénomène social, en permettant un paramétrage sur des croyances réelles et une validation sur les croyances observées sur le terrain. Cette même représentation doit également permettre de décrire le contenu des informations envoyées par l'institution pour persuader les adoptants potentiels des avantages de son innovation.

Le modèle de représentation des croyances doit également intégrer les facteurs explicatifs du succès ou de l'échec d'une diffusion d'innovation. Parmi ces facteurs explicatifs, Rogers insiste sur la compatibilité ou l'incompatibilité des nouvelles informations avec les croyances des adoptants préalables au lancement de l'innovation. Certaines croyances ne sont pas révisées par *manque de crédibilité de la source d'information*, par exemple lorsque les femmes Luo refusent de croire les avis des médecins blancs, qui leur semblent peu pertinents pour leur ethnie, et leur préfèrent les rumeurs sur les dangers de la pilule contraceptive. Dans d'autres cas, l'innovation entre en conflit avec des valeurs sociales non révisables. Enfin, la non-compréhension, ou la *mauvaise compréhension de l'information*, explique de nombreux échecs d'innovation. Compréhension et révision des croyances constituent pour Rogers des facteurs explicatifs de l'échec de la diffusion d'innovation ; ils sont également liés aux variables décisionnelles de l'institution, qui peut utiliser des sources à la crédibilité plus importante ou transmettre un message plus pertinent.

Nous attendons également d'un modèle descriptif des croyances qu'il permette de représenter les informations partagées entre différentes innovations - afin de représenter la diffusion d'innovations interdépendantes, ou la diffusion de différentes générations d'innovations. Le marketing s'oriente également vers la création de liens entre un événement et une innovation, afin de faire parler les consommateurs de cette innovation et de créer une image subjective d'un produit associée à un événement ou à une personnalité. Il est donc nécessaire de représenter différents objets du monde et leurs interdépendances.

Dans le cadre d'un modèle de diffusion d'innovations, la représentation des croyances servira de base à l'élaboration de modèles d'évaluation et de décision : valeur perçue dans une innovation, recherche ou émission d'information, décision d'adoption ou de rejet. Ce modèle doit donc fournir des éléments suffisants pour être utilisé comme "brique" d'un modèle plus vaste. Les opérations de base d'une mémoire réalisables sur la mémoire doivent être décrites : révision des croyances et récupération d'informations en mémoire. Nous attendons de ces opérations qu'elles soient descriptives et non normatives, contrairement à la plupart des modèles d'inférence et de représentation des croyances développées en Intelligence Artificielle.

Enfin, cette représentation des croyances se doit d'être simple, et économe en ressources computationnelles, afin de pouvoir être utilisée dans un modèle de simulation orientée agents. Des indicateurs permettant d'observer la dynamique de croyances réalistes doivent être proposés, qui doivent pouvoir être rapportés aux observations de terrain. Un protocole de collecte des croyances des adoptants est également nécessaire pour rendre le modèle validable.

### **Aperçu général du chapitre**

De nombreux modèles de représentation des croyances ont bien sûr déjà été développés (5.1). Si aucun ne correspond à nos attentes, nous réutiliserons leurs bases conceptuelles pour développer notre propre représentation. Les croyances seront représentées dans CoBAN sous forme de réseaux associatifs liés à des objets sociaux (5.2). Nous proposons un mécanisme de récupération des croyances en mémoire (5.3), ainsi qu'une révision des croyances tenant compte de la crédibilité des informations (5.4). Les réseaux associatifs permettent de définir des outils d'observation sous la forme de représentations sociales (5.5). Ils permettent de construire un mécanisme d'évaluation et d'adoption, et de décrire de nombreux types de croyances. Nous avons développé, et testé, un protocole d'entretien permettant de collecter ce type de croyances depuis le terrain (5.6)

## 5.1 Modèles de représentation des croyances

### 5.1.1 Réseaux de croyances

Les réseaux de croyances Bayésiens (*belief networks*) ont été proposés par Judea Pearl [Pearl, 1986, Pearl, 1993] pour décrire les croyances et leur révision. Les états du monde sont définis par des variables aléatoires  $X_i$  contenant potentiellement plusieurs états  $\{x_0 \dots x_j\}$ . Les interdépendances statistiques entre ces variables représentent les liens de causalité sous la forme de probabilités conditionnelles. On peut voir ces réseaux comme la représentation de croyances générales sur le monde, qui sont ensuite exploitées par la prise en compte de nouvelles observations du monde, appelées *évidence*. Pearl a décrit les mécanismes de propagation d'évidence qui permettent de répercuter la connaissance plus ou moins forte (sous forme de probabilité) sur les autres variables. Les réseaux de croyances Bayésiens ont marqué l'irruption des modèles graphiques dans la représentation des croyances. Ils permettent de représenter des croyances expertes, des niveaux de certitude ou d'incertitude, et proposent des mécanismes d'inférence normatifs. Ces réseaux de croyances constituent une alternative intéressante de description des croyances, valuées par une probabilité souvent interprétée comme un degré de croyance. Ils peuvent être utilisés pour représenter la combinaison d'informations, quoique cette combinaison purement Bayésienne atteigne rapidement des problèmes de descriptivité [Smets et Kennes, 1994]. Plusieurs hypothèses (dont le monde clos) et contraintes limitent leur utilité dans notre cas. Ces modèles ont depuis été subsumés par des modèles basés sur les fonctions de croyances.

### 5.1.2 Fonctions de croyances

La théorie de Dempster-Shafer est une théorie mathématique de l'évidence, qui permet de combiner plusieurs fragments d'informations [Dempster, 1967] (en gérant les conflits entre ces informations) et permet de calculer le degré de croyance (ou masse de croyance) et d'incertitude résultant de ces informations [Shafer, 1976]. Les informations sont dites *supportées* par des pièces d'*évidence*. Cette théorie connaît de nombreuses interprétations et extensions [Smets, 1994]. L'une de ces extensions est le modèle de croyances transférables proposé par Philippe Smets [Smets et Kennes, 1994], qui généralise la théorie de Dempster-Shafer et introduit les notions de croyance (supportée par des informations connues) et de plausibilité (informations non contredites par les informations connues).

Le modèle des croyances transférables constitue une alternative de représentation des croyances particulièrement intéressante. L'hypothèse du monde clos peut être levée [Smets, 1992], l'incertitude sur l'information calculée. Ce modèle permet aussi de décrire la combinaison de différentes sources d'informations [Smets, 1999]. Tout comme les réseaux de croyances, il peut être utilisé pour représenter des interdépendances entre des croyances, aboutissant à une représentation des croyances sous forme de graphe. Néanmoins, l'utilisation d'un tel modèle pour représenter les croyances d'un adoptant potentiel soulève plusieurs problèmes :

- l’utilisation de valeurs continues pour représenter la crédibilité d’une source d’information et les masses de croyances. Il est difficile de déterminer comment ces valeurs continues seront paramétrées et interprétées dans le modèle.
- cette modélisation impose soit de conserver en mémoire les sources d’information qui supportent chaque croyance, soit de mémoriser le degré de croyance créé par une source d’information et de remplacer l’ancien degré de croyance en mémoire. Aucune de ces solutions ne nous semble satisfaisante. Dans le premier cas, on stocke un ensemble d’informations coûteuses, qui de surcroît sont sans doute oubliées en quelques semaines ou mois par des individus réels. Dans le second cas, on perd l’information de la source qui a transmis l’information, en la résumant par une masse de croyance difficile à interpréter. Or, pendant des entretiens sur le terrain, on demande aux individus d’où provient une information (“pourquoi pensez-vous que...” qui mène à la réponse “un ami / un spécialiste / la télévision...”) et non à quel point ils croient en une information.
- l’affaiblissement de la certitude de croyances anciennes ne peut être décrit qu’en diminuant progressivement la crédibilité d’une source d’information. Cette opération est contraire à la réalité, puisque ce n’est pas la source d’information elle-même qui est en cause, mais plutôt l’ancienneté de la croyance. De plus, une telle opération nécessite de recalculer l’ensemble des croyances à chaque diminution de la crédibilité, opération qui s’avèrerait coûteuse à l’échelle d’une population.

Le modèle des croyances transférables, quoique très intéressant, s’avère sans doute trop compliqué pour un modèle des croyances destiné à être utilisé en simulation multi-agents. Il fait toutefois partie des sources d’inspiration de notre modélisation.

### 5.1.3 Vision associative de la mémoire

On distingue en psychologie cognitive la *mémoire déclarative*, qui stocke les connaissances sur le monde, de la *mémoire procédurale* qui contient les compétences et le savoir-faire [Anderson, 1976]. La mémoire déclarative est elle-même décomposée en *mémoire sémantique* et *mémoire épisodique* [Tulving, 1972]. La mémoire sémantique contient la signification des mots, les connaissances sur les normes et coutumes sociales, sur les gens et les expériences du monde. La mémoire épisodique stocke les expériences personnelles et les contextualise (dans le temps, l’espace et les émotions). Dans le cas des innovations et des connaissances de consommateurs, nous nous intéressons principalement à la mémoire sémantique.

La mémoire, depuis Aristote (*De Memoria et Reminiscentia*) jusqu’aux expériences modernes de psychologie, est considérée comme *associative* [Anderson et Bower, 1973a]. Quand un sujet reçoit un mot-stimulus, il y associe un ou plusieurs mots activés par le stimulus. Ce constat a conduit à des modèles d’organisation de la mémoire sous forme associative, notamment par Anderson [Anderson et Bower, 1973b]. En étude du consommateur, ainsi qu’en psychologie, on

utilise essentiellement des réseaux associatifs pour représenter la mémoire sémantique [Collins et Loftus, 1975].

L'idée de base est la suivante : la mémoire est organisée comme un ensemble de liens entre des concepts (ou symboles). Lorsque l'on active un concept, il active ses voisins, avec une probabilité dépendant de l'intensité des liens qui le lient aux voisins. Ces associations sont directionnelles [Loftus, 1973] : "Mercedes" sera inévitablement lié à "Voiture", mais "voiture" ne sera pas toujours lié à "Mercedes". Sur la base de ce principe général, des travaux se sont efforcés de décrire le processus cognitif mis en jeu dans la mémorisation et l'activation des connaissances [Anderson, 1983b]. En étude du consommateur, on utilise plus simplement les réseaux associatifs pour décrire les connaissances exprimées par un sujet, sans s'intéresser à la représentation cognitive de ces connaissances. Les *mind maps* (cartes mentales), bien connues en marketing, s'appuient sur ce principe. Les premiers modèles de croyances sur des produits développés en psychologie des croyances, originellement basés sur des listes de caractéristiques ou des *frames*, ont également évolué vers ce type de représentation [Barsalou, 1992].

#### 5.1.4 Means-end chains Theory

##### Principe

La *Means-end Chains theory* (MCT) (littéralement : "théorie des chaînes moyens-fins") proposée par Reynolds et Gutman [Reynolds et Gutman, 1988] s'inscrit dans cette vision associative des connaissances. Les croyances d'un sujet sont décrites comme des liens entre concepts. L'intuition qui sous-tend cette théorie est que le consommateur n'évalue pas une offre sur ce qu'elle est, mais en fonction de ce qu'elle lui permettra d'obtenir (fait également mis en évidence en psychologie [Tolman, 1932] ou en marketing [Abbott, 1955]). Ainsi, les offres sont des moyens (*means*) permettant au consommateur d'atteindre des fins (*ends*). La MCT s'enracine sur une méthodologie d'entretien semi-directif qui permet de découvrir les associations existant dans la mémoire du sujet, propose de les formaliser sous forme de réseaux, et enfin d'analyser les connaissances partagées par un groupe de sujets.

##### Collecte de données individuelles

La méthode de collecte de données associée à la MCT est appelée *laddering* [Reynolds et Gutman, 1988]. Il s'agit d'une méthode d'entretien semi-directive. Le principe de base est de faire parler le consommateur sur un stimulus (l'objet, le produit) pour lui faire exprimer *pourquoi* il apprécie un produit. Le protocole de *laddering* se définit en trois étapes :

- Pendant la première phase dite d'**élicitation des attributs**, on cherche à comprendre les attributs associés à l'objet-stimulus. On peut lui donner le choix entre plusieurs produits et lui demander pourquoi il préfère celui qu'il a choisi, ou débiter sur des questions simples comme "pourquoi appréciez-vous la viande de boeuf?"

Question - *Qu'est-ce qui vous fait apprécier l'iPod ?*

Réponse - d'abord, il y a bien sûr l'ergonomie, qui est plus travaillée que sur les concurrents.

Q - *Vous pensez à une autre élément qui vous fait préférer l'iPod aux concurrents ?*

R - le stockage. C'est le seul avec un disque dur, on peut vraiment stocker des heures de musique. C'est vraiment un avantage.

Q - *Pourquoi ?*

R - vous savez, ça évite surtout de brancher tous les jours le lecteur sur l'ordinateur pour changer le contenu. Et puis, on n'a pas de problème par manque de place quand on copie les fichiers. Du coup, on l'utilise plus facilement.

Q - *C'est important pour vous, cette utilisation facile ?*

R - Oui, je l'allume souvent, j'écoute de la musique, n'importe où, et je me sens bien.

Q - *Vous aviez parlé de l'ergonomie ; pourquoi est-ce important pour vous ?*

R - C'est plus facile à utiliser. On ne perd pas de temps à chercher dans les menus, pas de stress, ça va tout seul...

Q - *Pourquoi est-ce intéressant pour vous ?*

R - Gagner du temps ? Comme pour tout le monde, je crois (*rires*). Pour faire autre chose, bien sûr !

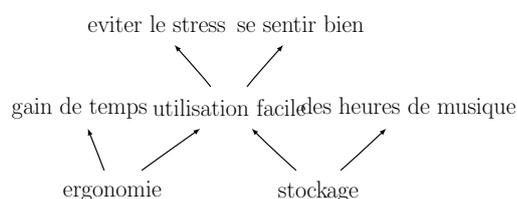


FIG. 5.1: Exemple de *laddering* sur l'iPod : verbatim de l'entretien (à gauche), et description sous forme de hiérarchie de valeurs (à droite)

- La phase suivante est le **laddering** proprement dit. On reprend chacun des attributs déjà énoncés, et on demande pourquoi cet attribut apporte de la valeur au sujet. Afin de ne pas introduire d'information susceptible de biaiser les réponses du sujet, on s'efforce de ne pas introduire d'information en posant les questions. Idéalement, l'interviewer devrait uniquement poser la question "pourquoi?". En pratique, on peut également paraphraser le sujet, manifester un intérêt ou une curiosité pour un élément donné, ou simplement laisser un silence qui incite le sujet à exprimer une autre connaissance [Reynolds et Gutman, 1988]. Pendant cette phase, le sujet énonce des motivations de plus en plus élevées (d'où le terme *laddering*, littéralement traduit comme "escalader" ou "construire des échelles").

A la fin du *laddering*, on dispose d'un ensemble d'associations mesurées chez le sujet liant les attributs de l'objet à des motivations ou des valeurs. Comme cela est illustré sur la figure 5.1, on peut décrire ces associations sous forme de graphe. Ce protocole offre de nombreux avantages. Il introduit *aussi peu de biais que possible* dans les réponses des individus. Contrairement à un questionnaire, on ne pose pas des questions sur ce que l'on croit important dans un produit, mais on laisse le sujet déterminer lui-même ce qui est important pour lui. Cela permet de se centrer sur l'image subjective de l'individu, et non sur la perception optimiste qu'a l'institution sur sa propre innovation (*cf* 3.2.2). Le protocole permet aussi découvrir les motivations qui conduisent à la perception de valeur pour un produit. Des motivations inattendues peuvent être découvertes, comme nous le verrons plus loin. Dans notre effort de modélisation, *ce protocole constitue surtout un lien entre le terrain et le modèle, en décrivant des croyances réelles sous*

forme de réseaux.

Le protocole de collecte souffre de limites communes à tout processus déclaratif. Les sujets ne peuvent exprimer un lien que s'ils ont conscience de ce lien, c'est-à-dire qu'ils ont analysé leur processus d'évaluation inconscient pour le comprendre [Reynolds et Gutman, 1988]. Le sujet peut fournir des explications qu'il s'est construites, mais qui ne correspondent pas à la réalité. Par exemple, dans une séance de *laddering*, un sujet nous a expliqué avoir remplacé son écran plat de 75cm de diagonale par un modèle de 90cm, afin que sa fille de 5 ans puisse mieux regarder ses dessins animés. Ce type de rationalisation du processus d'achat doit être détecté et éliminé des données pour conserver une représentativité. Par ailleurs, il est difficile de récupérer des informations sur des objets considérés comme privés ou honteux.

### Analyse des croyances collectives

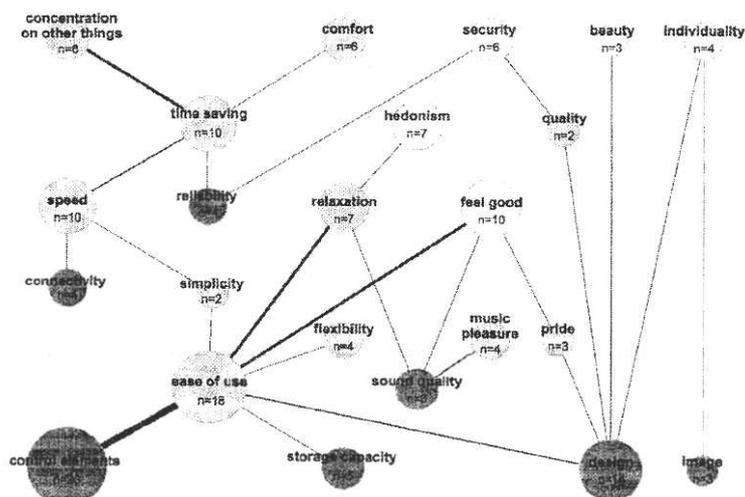


FIG. 5.2: exemple de chaînes collectées par interview pour l'iPod [Reppel *et al.*, 2006]. Les cercles noirs représentent les attributs (niveau le plus concret), les cercles gris les conséquences, et les cercles blancs les valeurs (niveau le plus abstrait)

Les croyances de différents individus peuvent ensuite être fusionnées afin de représenter les croyances et motivations partagées par différents individus. Cette analyse collective se fait en plusieurs étapes :

- définition des équivalences entre concepts (synonymies), afin de pouvoir ensuite déterminer quelles croyances sont équivalentes. Cette étape correspond en quelque sorte à l'étape de codage nécessaire dans toute méthodologie d'entretien. Elle introduit inévitablement une part de subjectivité ; décider si les concepts "cher", "coûteux" et "trop cher" sont équivalents influencera l'analyse subséquente des croyances.

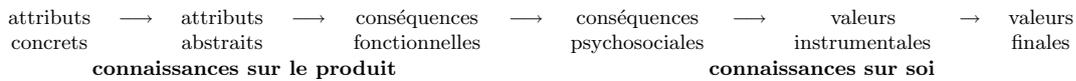


FIG. 5.3: Distinction entre connaissances sur le produit et connaissances du sujet

- fusionner les graphes individuels en utilisant les synonymies.
- filtrer les graphes ainsi créés, en supprimer les liens et concepts énoncés par trop peu de sujets (par exemple, moins de 3 personnes sur 15). Cette étape permet d’éliminer les croyances qui ne participent pas de la perception *collective* du produit.

Le graphe de croyances obtenu est nommé HVM (*Hierarchical Value Map* ou carte hiérarchique des valeurs), dont un exemple est présenté en figure 5.2. On peut représenter graphiquement le nombre de sujets qui ont évoqué un concept en variant les couleurs, l’épaisseur des liens ou les tailles de concepts. On apprend ici que la plupart des sujets évoquent les éléments ergonomiques de l’iPod, ainsi que son design et sa capacité de stockage. Ces attributs sont associés à la facilité d’utilisation, à la relaxation, à l’hédonisme, et au gain de temps.

Dans la MCT, on distingue plusieurs types de concepts (figure 5.3) : attributs concrets et abstraits, conséquences fonctionnelles ou psychosociales, valeurs intermédiaires et terminales. Audenaert [Audenaert et Steenkamp, 1997, p. 219] ajoute que les premiers niveaux correspondent aux croyances sur l’innovation elle-même, tandis que les niveaux les plus abstraits correspondent à des croyances de l’individu sur lui-même. Ce réseau peut être vu comme un réseau sémantique [Spradley, 1979], à la seule différence que la chaîne est généralement présentée comme une hiérarchie, c’est-à-dire que les liens sont unidirectionnels, du plus concret au plus abstrait. Plusieurs auteurs précisent que ce cadre de collecte, représentation et analyse des croyances et motivations n’est pas aussi simple qu’en théorie : les liens collectés contiennent souvent des boucles [Rekom et Wierenga, 2002]. L’interprétation des chaînes n’est pas non plus triviale, posant notamment la question de la perte de sémantique qu’implique la fusion de chaînes provenant de différents sujets [Grunert *et al.*, 1995].

### Pouvoir descriptif

La MCT décrit implicitement deux notions particulièrement intéressantes : la *compréhension* des informations et la perception subjective de l’information. En effet, la MCT suppose que le produit est évalué sur les concepts de haut niveau - conséquences, valeurs - reliés à des concepts de bas niveau qui ne sont pas porteurs de valeur en tant que tels. La compréhension apparaît quand un lien existe entre un attribut concret et un attribut participant à l’évaluation du produit. L’incompréhension est donc décrite par l’absence de lien entre un attribut concret et une conséquence ou motivation psychosociale. La perception est subjective, car les liens par eux-même peuvent être subjectifs (“cher” ou “pas cher”, pour un même attribut concret de prix quantitatif, dépendent du budget de l’individu). Elle peut

être fausse, si un individu a mémorisé un lien qui n'est pas conforme à la réalité, mais l'utilise tout de même pour la compréhension et l'évaluation du produit. La MCT permet également de représenter les informations transmises par une publicité par le même type de réseau [Reynolds *et al.*, 1995].

### Applications

La théorie a été appliquée sur de nombreux objets comme les avions [Reynolds et Gutman, 1984], les stations de ski [Klenosky *et al.*, 1993], les boissons rafraichissantes alcoolisées [Reynolds et Gutman, 1988], le poisson, ou encore la viande de boeuf. Alors que la méthode était à l'origine appliquée à des produits ou services, elle est maintenant appliquée à des pratiques ou des images. Ainsi, elle a été utilisée pour mieux comprendre la volonté de perdre du poids [Pieters *et al.*, 1995], le recyclage [Bagozzi *et al.*, 1996] ou l'image du président Clinton [Bagozzi et Dabholkar, 2000]. Dans ce sens, elle rejoint les travaux sur les représentations sociales (*cf.* 3.4.7), s'étendant en réalité à tout objet social.

Notons que d'autres méthodes de collecte de données existent ([Fransella et Bannister, 1977, Lines *et al.*, 1995, Steenkamp et Trijp, 1997], ainsi que des méthodes plus formelles pour créer les réseaux [Gengler *et al.*, 1995, Hofstede *et al.*, 1998a]. L'*association pattern technique* [Hofstede *et al.*, 1998a] rend possible la collecte d'information pour de grands nombres d'individus en détectant les chaînes dans une première phase, puis en construisant des questionnaires utilisables à vaste échelle (voir [Hofstede *et al.*, 1998b]). Baozzi [Bagozzi et Dholakia, 1999] a introduit des techniques d'analyse de réseau issues des sciences sociales [Wasserman et Faust, 1994a].

#### 5.1.5 Apports des modèles existants

Les fonctions de croyance introduisent la notion de degrés de croyance représentés par des supports. Les réseaux de croyance montrent que l'on peut représenter des croyances expertes par des réseaux, et proposent des mécanismes d'inférence sur ces réseaux. La MCT prouve la pertinence d'une représentation sous forme de réseau associatif pour décrire les croyances réelles d'un individu, d'un ensemble d'individus, ou de messages institutionnels. Cette représentation permet de décrire la compréhension ou l'incompréhension. La MCT prouve aussi que de telles croyances peuvent être collectées depuis le terrain. Par contre, la MCT ne décrit pas la manipulation de ces croyances. Aucun de ces modèles n'est utilisable en l'état dans un modèle orienté agents, mais servira d'inspiration pour notre propre représentation.

## 5.2 Représentation des croyances dans CoBAN

### 5.2.1 Concepts et croyances

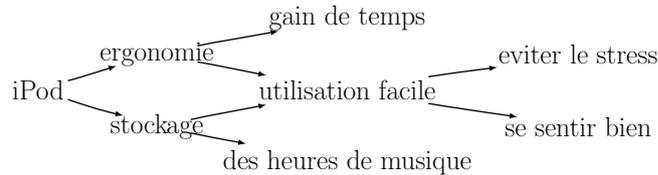


FIG. 5.4: Exemple de réseau associatif décrivant des croyances sur l'iPod

Les croyances des adoptants potentiels sont définies comme des liens dirigés entre concepts. Ces croyances représentent un graphe  $\{\mathcal{C}, \mathcal{B}\}$ , l'ensemble des concepts représentés dans le modèle  $\mathcal{C}$  constituant l'ensemble des sommets possibles, et  $\mathcal{B}$  étant un ensemble d'arcs liant des concepts. Les croyances sont des liens dirigés dans l'espace des concepts  $\mathcal{C}$ . Par exemple, la figure 5.4 représente la croyance que l'iPod est ergonomique, ce qui rend son utilisation facile et permet de gagner du temps. Potentiellement, on peut représenter comme croyance toute combinaison dans  $\mathcal{C}^2$ . Toutefois, en pratique, un très petit nombre de ces liens pourront exister dans le modèle. Il ne ferait pas sens, dans l'exemple présenté dans la figure 5.4, de définir l'existence d'un lien entre "gain de temps" et "stress". L'ensemble des croyances représentables dans le modèle, noté  $\mathcal{B}$ , est donc faible au regard de l'espace des concepts :  $|\mathcal{B}| \ll |\mathcal{C}||\mathcal{C} - 1|$ . Croyances et concepts constituent des paramètres définis par l'utilisateur du modèle. En pratique, les croyances qui peuvent exister dans le modèle ne sont pas fournies comme un ensemble abstrait. Elles se définiront naturellement lors de l'élaboration des autres paramètres du modèle : croyances préalables des individus, messages persuasifs envoyés par la publicité, information découverte lors de l'expérience avec le produit, et autres sources d'information.

Tout comme dans la MCT, un concept peut représenter un attribut concret ou abstrait, une conséquence fonctionnelle ou psychosociale, une valeur intermédiaire ou terminale. Parmi les concepts  $\mathcal{C}$ , certains constituent des objets du monde réel susceptibles d'intérêt : besoins, produits, catégorie de produits, innovation. Pour désigner ces concepts, nous réutilisons le concept de psychologie sociale de l'objet social, qui correspond à un objet digne d'intérêt pour un groupe social [Moscovici, 1984b]<sup>1</sup>. Ces concepts particuliers seront donc nommés *objets sociaux*, définis par l'ensemble  $\mathcal{O} \subset \mathcal{C}$ . Par opposition aux autres concepts énoncés préalablement, on peut parler de ces objets, rechercher de l'information à leur sujet et y associer une représentation.

<sup>1</sup>Il n'existe pas de définition consensuelle de ce qu'est un objet social. L'objet social est défini par rapport à d'autres concepts de psychologie sociale, comme l'objet pour lequel se forme une attitude ou l'objet central d'une représentation sociale.

### 5.2.2 Support et crédibilité

#### Représentation du support par des niveaux discrets

Dans les réseaux de croyance, la certitude est généralement représentée sous forme de probabilités, de masses de croyances ou d'évidence. Il s'agit de valeurs continues dans  $[0, 1]$ . Cette représentation sous forme de valeurs réelles souffre de plusieurs inconvénients :

- si un support de 0.8 pour une alternative opposé à un support de 0.2 pour une autre, fait intuitivement sens, le calcul de ces valeurs dans des chaînes de croyances est plus délicat. En effet, le support des alternatives est calculé par multiplication des supports des parents, ce qui conduit à de très petites valeurs réelles. Or, il est difficile d'appréhender en tant qu'observateur la différence de support entre une alternative crédible à 0.0001 et une autre à 0.00012.
- le calcul de valeurs réelles est toujours approximé sur les processeurs grand public, conformément à la norme IEEE 754 qui définit la représentation des nombres à virgule flottante. Les erreurs introduites pendant ces approximations prennent une importance considérable quand on traite de très petites valeurs. Ce problème a d'ailleurs été souligné en simulation orientée agents [Izquierdo et Polhill, 2006].
- ces données continues semblent plus difficiles à confronter au terrain. Nous ne disposons pas de protocole permettant de quantifier rapidement le support d'une information chez un sujet.

Les valeurs continues constituent sans doute un niveau de description intéressant à l'échelle de l'individu. Dans notre cas, ces valeurs continues manquent de représentativité, ne nous sont pas nécessaires, et ne sont pas significatives, ce qui constitue un excellent argument pour éviter de les utiliser [Edmonds, 2005a]. En réalité, de notre point de vue, nous ne nous intéressons pas à des valeurs quantitatives, mais à des effets qualitatifs : supériorité d'un niveau de crédibilité sur un autre, ou révision plus ou moins facile d'un niveau de crédibilité par un autre.

Nous préférons donc aux valeurs continues une discrétisation plus simple et compréhensible, ancrée sur les informations qu'un utilisateur du modèle peut collecter et appréhender. On ne peut pas demander à un sujet s'il croit à un élément avec une force de 0.52 ou de 0.31 ; on lui demande plutôt de quelle source il tient son information. Les réponses à cette question sont relativement peu nombreuses : source indéterminée ("on dit que"), source déterminée ("j'ai lu/entendu dans X que", "X m'a dit que") ou expérience personnelle ("possédant le produit, je sais que..."). On constate, comme énoncé dans le fait stylisé I4 (page 62), que les recommandations sont généralement accompagnées d'une justification indiquant la source de l'information, qu'il s'agisse de conversations informelles ou de recommandations.

Nous définissons donc le support d'une croyance comme un ensemble discret  $\Sigma$  composé de différents niveaux de support  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_i\}$ . Il semble naturel de définir que ces niveaux sont ordonnés : le message publicitaire (provenant d'une source

orientée) est moins crédible que la recommandation d'un ami, elle-même supplantée par l'expérience personnelle. Par la suite, nous considérerons donc que  $\Sigma$  est ordonné :  $\sigma_1 \prec \sigma_2 \prec \dots \prec \sigma_i$ . Ordonner les niveaux de support se révélera particulièrement utile lors de la construction du modèle comportemental, lorsque nous définirons des règles telles que "un sujet estime que l'information est assez crédible pour prendre une décision à partir du niveau  $\sigma \in \Sigma$ ".

La notion de support ayant été formalisée, nous pouvons définir plus précisément ce qu'est une croyance. Une croyance est un arc valué entre deux concepts, constitué par  $(C_1, C_2, \sigma)$ , avec  $C_1, C_2 \in \mathcal{C}$  et  $\sigma \in \Sigma$ . Un ensemble de croyances est donc un graphe dirigé valué  $\{\mathcal{C}, A, v\}$  avec  $v : A \mapsto \Sigma$ . La fonction de valuation des arcs  $v$  dans un IAN est propre à chaque agent, et devrait donc être notée  $v^{a,t} : A \mapsto \Sigma$ . En langage naturel, on peut lire une croyance  $(pilule, dangereuse, \sigma^{amie})$  comme "l'agent croit que la pilule est dangereuse parce qu'il l'a entendu d'une amie". Une information est un lien transmis entre deux agents. Un agent qui transmettrait l'information  $(pilule, sansdanger, \sigma^{medecin})$  correspondrait en langage naturel à "Un médecin m'a dit que la pilule est sans danger".

### Exemple de niveaux de support

Le principal avantage des niveaux qualitatifs de supports est qu'ils correspondent à des niveaux de crédibilité énoncés spontanément par des sujets, sur lesquels on peut d'ailleurs interroger pendant un entretien ou par questionnaire. Nous proposons ici des niveaux de croyances apparaissant dans divers comptes-rendus d'expérience de terrain, que des sujets nous ont spontanément évoqués pendant des entretiens, et qui semblent d'après nos expérimentations conduire à des comportements différents :

- l'information provenant de la publicité, ou plus généralement d'une source intéressée à laquelle on accorde une crédibilité moindre, est notée  $\sigma^{pub}$ . Ce niveau de support est souvent transmis par les sujets comme "ils disent que", le "ils" désignant alors l'entreprise ou le média de masse qui a transmis l'information.
- l'ouï-dire  $\sigma^{oui-dire}$  est détecté par une réponse du type "on dit que", ou "j'ai entendu que".
- une personne clairement identifiée, sans qu'elle n'ait toutefois justifié davantage son information, sera notée  $\sigma^{ami}$ . Elle se détecte par un phrase comme "Une amie m'a dit que..."
- une personne ayant transmis une information appuyée sur son expérience personnelle est considérée comme plus crédible ; les sujets précisent d'ailleurs spontanément "un ami, qui a testé ce produit, m'a dit que...". Ce niveau sera noté  $\sigma^{xpindirecte}$  pour *expérience indirecte*.
- enfin, l'expérience correspond à la valeur la plus importante, spontanément différenciée des autres niveaux de crédibilité par les sujets : "je connais bien le produit, ça fait un an que je l'utilise", ou "je ne l'ai pas testé moi-même, je ne peux donc pas le recommander sérieusement".

## 5.2.3 Base de croyances et messages

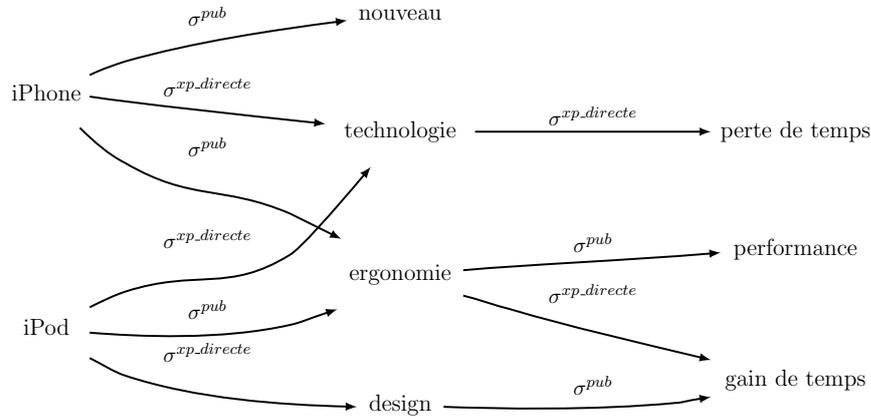


FIG. 5.5: Exemple de base de croyances (IAN) contenant des croyances sur l'iPod, l'iPhone, ainsi que sur la technologie en général

Chaque individu possède sa propre base de croyances que nous appellerons *Individual Associative Network* ou IAN. L'ensemble des croyances d'un agent  $a \in \mathcal{A}$  est noté  $IAN^{a,t}$ . Un IAN comporte potentiellement des croyances liées à plusieurs objets sociaux différents. La figure 5.5 dépeint un exemple d'IAN contenant des croyances sur l'iPhone et l'iPod.

Dans notre modèle, nous définissons une représentation  $R_o^{a,t}$  comme l'ensemble des croyances de l'agent  $a \in \mathcal{A}$  sur l'objet  $o \in \mathcal{O}$  à l'instant  $t$ ; la représentation d'un objet  $o$  est donc le sous-arbre des croyances de l'agent ancré sur  $o$ . La représentation est nécessairement une sous-partie de la base des croyances de l'agent :  $R_o^{a,t} \subset IAN^{a,t}$ . Tout comme en psychologie sociale, une représentation sociale s'articule autour d'un objet, et ne peut exister sans objet. La représentation correspond à la partie des croyances qui sera récupérée en mémoire, sur laquelle s'effectuent les évaluations et décisions, ainsi que les croyances qui peuvent être transmises par un individu. Les réseaux associatifs seront également utilisés pour représenter les informations échangées dans le système social. Nous considérerons que les informations échangées - des messages, au sens des modèles orientés agents - sont nommées TAN (pour *Transmissible Associative Network*). Dans ce graphe, les arcs sont valués. Dans la réalité, cela correspond à une personne qui indiquerait par exemple "la pilule contraceptive fait maigrir, j'ai une amie à qui c'est arrivé", ce qui serait formalisé par  $(pilule, maigrir, \sigma^{xp.ind})$ , avec  $\sigma^{xp.ind}$  le niveau de support d'une expérience indirecte.

### 5.3 Activation des croyances dans CoBAN

Dans le modèle, un agent mobilisera ses croyances pour évaluer son niveau de connaissance, pour évaluer l'innovation, ou plus simplement pour émettre de l'information. Cet accès à la mémoire se fera toujours par rapport à un objet : on active les connaissances à propos de quelque chose. Récupérer en mémoire, c'est donc activer la représentation d'un objet.

#### 5.3.1 Extraction simple

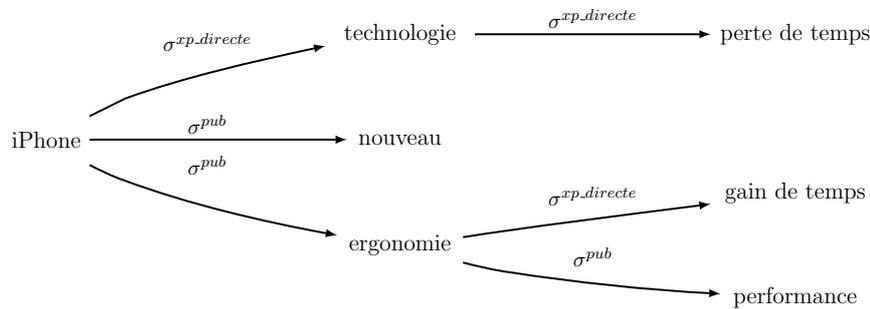


FIG. 5.6: Représentation  $R_{iPhone}^{a,t}$  extraite de l'IAN présenté en figure 5.5 pour l'objet iPhone, en utilisant le principe d'extraction simple.

Nous appellerons *extraction simple* la récupération en mémoire du sous-arbre ancré dans un objet  $o$  des croyances contenues dans la base de croyances  $IAN^{a,t}$  d'un agent  $a$ . L'activation simple permet de récupérer les croyances et le support de chaque croyance. Ce processus sera notamment utilisé pour extraire l'information qui sera transmise par bouche à oreille. Les crédibilités des liens transmis sont identiques aux crédibilités de ces liens dans l'IAN. Un exemple d'extraction de représentation est proposé en figure 5.6.

#### 5.3.2 Activation par diffusion

L'activation simple permet de récupérer la partie des croyances d'un agent correspondant à un objet donné. Mais dans certains cas, comme pour l'évaluation d'une innovation, on ne s'intéresse pas au support de chaque croyance, mais au support des croyances elles-mêmes. Si on croit faiblement que A donne B, et fortement que B donne C, C est faiblement cru à propos de A. Si l'on croit par expérience qu'une interface ergonomique permet de gagner du temps, et qu'une publicité télévisuelle annonce que l'iPhone est ergonomique, on n'est pas certain que l'iPhone permet de gagner du temps. Ce principe est retenu dans les modèles connectionnistes (mémoire [Anderson, 1983a], réseaux sémantiques [Collins et Loftus, 1975]) sous le terme d'activation par diffusion (*spreading activation*), avec des variantes en fonction du modèle spécifique (facteur d'amortissement dans les réseaux de neurones, par exemple).

**Entrées:**  $C_p$  le noeud à partir duquel on fait diffuser la crédibilité héritée du lien précédent

**Entrées:**  $\sigma_{C_p}$  la crédibilité héritée par du noeud parent

**Entrées:**  $IAN^{a,t}$  l'Individual Associative Network (base de croyances)

**Entrées:**  $RA_O^{a,t}$  la représentation activée en cours de construction

- 1: **pour** chaque enfant  $C_e$  lié à un parent  $C_p$  par une croyance  $C_e b_{\sigma_{link}}^{a,t} C_p$  dans  $IAN^{a,t}$  **faire**
- 2:      $\sigma_{filtered} = \min(\sigma_{C_p}, \sigma_{link})$
- 3:     **si**  $C \in RA_O^{a,t}$  **alors**
- 4:          $\sigma_{C_e} = \max(\sigma_{C_e}, \sigma_{filtered})$
- 5:     **sinon**
- 6:         ajouter  $C_e$  to  $RA_O^{a,t}$
- 7:         définir  $\sigma_{C_e} = \sigma_{filtered}$
- 8:     **fin**
- 9: **fin pour**

Algorithme 5.1: Fonction récursive construisant la représentation activée  $RA_o^{a,t}$  d'un objet  $o$

concept	crédibilité reçue du père	crédibilité du lien	crédibilité retenue (min)
iPhone	$\sigma^\infty$	$\emptyset$	$\sigma^\infty$
technologie	$\sigma^\infty$	$\sigma^{xp.directe}$	$\sigma^{xp.directe}$
perte de temps	$\sigma^{xp.directe}$	$\sigma^{xp.directe}$	$\sigma^{xp.directe}$
nouveau	$\sigma^\infty$	$\sigma^{pub}$	$\sigma^{pub}$
ergonomie	$\sigma^\infty$	$\sigma^{pub}$	$\sigma^{pub}$
gain de temps	$\sigma^{pub}$	$\sigma^{xp.directe}$	$\sigma^{pub}$

TAB. 5.1: Traitement des crédibilités lors de l'extraction de la représentation activée  $RA_{iPhone}^{a,t}$  de l'IAN 5.5. La représentation activée résultante correspond à la colonne de droite :  $RA_{iPhone}^{a,t} = \{ (iPhone, \sigma^\infty), (technologie, \sigma^{xp.directe}), (perte de temps, \sigma^{xp.directe}), [...] \}$

Nous appellerons activation par diffusion le processus qui extrait les concepts liés à un objet, et associe à chaque concept un support en fonction de la chaîne de croyances qui relie l'objet au concept. Nous appellerons *représentation activée* la représentation  $RA_o^{a,t}$ , définie comme une liste de concepts associés à des niveaux de supports  $\{\mathcal{C}, s\}$  avec  $s$  une fonction qui attribue à chaque concept de la représentation un support  $s : \mathcal{C} \mapsto \Sigma$ . Contrairement aux représentations récupérées par activation simple, les représentations activées ne sont donc pas des graphes pondérés mais une simple liste de concepts valués. L'algorithme d'activation par diffusion (5.1) est simple : on commence par attribuer à l'objet un support infini  $\sigma^\infty$ , qui est transmis et filtré par le support de chaque croyance. Le support d'un concept dépend au plus faible du support hérité du concept père ou du support de la croyance qui les lie. Cela revient à énoncer que *la force d'un concept correspond à la force du plus faible lien de la chaîne qui connecte l'objet  $o$  à ce concept*. Si un concept reçoit plusieurs niveaux d'activation, le plus élevé est conservé (ce qui correspond à un noeud MAX en théorie de l'évidence ou à un OU

logique). Un exemple de traitement avec crédibilité héritée du père, crédibilité du lien et crédibilité conservée est présenté dans le tableau 5.1.

## 5.4 Révision des croyances dans CoBAN

### 5.4.1 Observations sur la révision des croyances

Lors de la réception d'un ensemble d'informations ( $TAN$ ), un agent doit intégrer ces nouvelles informations à sa base de croyance ( $IAN$ ). Commençons par aborder cette question en envisageant le cas simple d'une unique information  $(A, C, \sigma^{new})$ , qui est confrontée à une croyance préalable  $(A, C, \sigma^{old})$ . La révision des croyances vise à définir la nouvelle croyance - qui sera  $(A, B)$  ou  $(A, C)$  - et son nouveau support  $\sigma^{rev}$ . Considérons les différents cas de figure, en fonction de la nouvelle information reçue (contradictoire ou identique à la croyance préalable) et au support de l'information (inférieur, égal ou supérieur à celui de la croyance préalable).

#### Information compatible avec la croyance préalable

Quand un individu reçoit une information compatible avec sa croyance préalable ( $B = C$ ), la révision des croyances semble peu sujette à discussion. Quoi qu'il arrive, l'ancienne croyance  $(A, B)$  persistera. Le nouveau support  $\sigma^{rev}$  dépend des supports de l'information et de la croyance :

- Si la nouvelle information est plus crédible que la croyance précédente ( $\sigma^{new} \succ \sigma^{old}$ ), elle renforcera la croyance précédente ( $\sigma^{rev} = \sigma^{new}$ ). Par exemple, si vous avez entendu dire que l'iPhone est ergonomique, et que vous vérifiez cette information par expérience personnelle, votre croyance est renforcée.
- Si la nouvelle information est moins crédible ou aussi crédible que la croyance précédente ( $\sigma^{new} \preceq \sigma^{old}$ ), le support de la croyance demeure inchangé :  $\sigma^{rev} = \sigma^{old}$ . Par exemple, si vous savez par expérience que l'iPhone est ergonomique, une publicité qui vante l'ergonomie de l'iPhone n'affaiblira pas votre croyance. Dans ce cas  $B = C$ , on a donc  $\sigma^{rev} = \max(\sigma^{new}, \sigma^{old})$ .

#### Information contredisant la croyance préalable

Quand un individu reçoit une information  $(A, C, \sigma^{new})$  qui contredit une croyance préalable  $(A, B, \sigma^{old})$ , avec  $(B \neq C)$ , la révision des croyances devient un problème de *persuasion*. D'un point de vue normatif, il semble évident que l'individu devrait systématiquement remplacer son ancienne croyance si la nouvelle information est plus crédible, et ignorer l'information si elle est moins crédible. Cette approche est retenue dans les modèles classiques de révision des croyances [Williams et Rott, 2001]. Mais nous cherchons à construire un modèle descriptif et non normatif, et la réalité s'avère plus complexe. Nous identifions deux facteurs essentiels qui, en plus du support, impactent de façon notable la révision des croyances.

1. la *multiplicité des sources* fournissant une même information avec le même niveau de croyance influence la révision des croyances. Une unique information reçue avec

un support donné peut ne pas conduire à la révision des croyances, tandis que plusieurs informations reçues avec le même support conduisent à la révision.

2. *l'ancienneté des informations et des croyances* conduit à une révision des croyances plus ou moins probable. Une croyance ancienne sur une innovation peut être estimée obsolète par l'individu, que ce soit parce que l'état du monde peut avoir changé (l'innovation s'est transformée) ou simplement parce que la conviction s'émousse avec le temps. Les modèles classiques de révision de croyance posent implicitement l'hypothèse que la révision des croyances se fait dans un délai court. Or, dans notre cas, la révision des croyances est décrite dans des périodes longues (plusieurs semaines, mois ou années). Sur une telle durée, l'ancienneté des informations doit être prise en compte.
3. une inertie des croyances : lorsqu'une croyance est acceptée, il est peu probable qu'elle soit immédiatement remplacée par une croyance contradictoire.

Si *la nouvelle information est plus crédible* que la croyance précédente ( $\sigma^{new} \succ \sigma^{old}$ ), il est très probable que l'on remplace l'ancienne croyance. Si une publicité télévisuelle vous informe que l'iPhone permet d'accéder rapidement à Internet, mais qu'un journal spécialisé vous informe que cet accès est en réalité lent, il est probable que vous croyiez cette nouvelle information plutôt que la publicité qui vante le produit. On pourrait toutefois noter des exceptions à ce principe. Si les niveaux de support  $\sigma^{new}$  et  $\sigma^{old}$  sont proches, la multiplicité des sources et la récence de l'information deviendront déterminantes. Supposons qu'une personne accorde en général davantage de crédit à un comparatif sérieux (basé sur des tests et des statistiques, publié par un magazine indépendant) qu'à l'avis isolé d'un ami. Supposons qu'un tel comparatif élise le fournisseur d'accès à Internet le plus fiable. Si un ami lui fait part de ses problèmes avec ce même fournisseur, il est peu probable que cet avis isolé remplace la croyance introduite par le comparatif. Par contre, si plusieurs amis rapportent des ennuis avec ce fournisseur, l'individu préférera sans doute ces avis à l'information du comparatif indépendant qui apparaîtra désormais minoritaire.

Si la nouvelle information est aussi crédible que la croyance préalable ( $\sigma^{new} = \sigma^{old}$ ), la révision est difficile à déterminer. Imaginons une personne qui a reçu un avis énonçant qu'un produit est fiable, tandis qu'un autre lui révèle au contraire que le produit est fragile. Quelle information sera finalement retenue ? Si la croyance est déjà ancienne quand la nouvelle information est reçue, elle supplantera sans doute plus sûrement la première. Si de multiples informations viennent contredire la croyance, il est probable que cet ensemble d'informations indépendantes remplacera la croyance précédente. On ne peut donc, faute d'expériences réelles, que supposer que la probabilité de révision est plus importante si plusieurs informations sont reçues ou si la croyance est ancienne.

Si *la nouvelle information est moins crédible* que la croyance précédente ( $\sigma^{new} \prec \sigma^{old}$ ), il semblerait cohérent de systématiquement replacer la croyance préalable. Néanmoins, cela conduirait à long terme à nier la capacité de persuasion des messages répétitifs. En d'autres termes, cela indiquerait qu'un acheteur qui a

personnellement expérimenté la lenteur d'un iPhone lors de la navigation sur Internet ne révisera jamais ses croyances, même après trois années pendant lesquelles la publicité lui affirme que l'iPhone est rapide. En réalité, le sujet se laisserait sans doute convaincre, ne serait-ce que parce que le produit a pu être amélioré, ou parce qu'il estimera son expérience marginale. Il semble donc cohérent d'énoncer que la probabilité de révision d'une croyance par une information à la crédibilité inférieure est très peu probable, mais possible, en particulier si la croyance est ancienne.

### 5.4.2 Révision probabiliste d'une croyance

#### Décrire la révision des croyances par des probabilités

Ces observations nous prouvent la difficulté à définir de façon rigoureuse et générique la révision des croyances. A notre niveau de description - à l'échelle d'une population dans un modèle générique - il est difficile de définir précisément comment les croyances seront révisées. Nous nous reposerons donc sur une description probabiliste de ces révisions.

	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
$\sigma_1$	intermediaire	faible	faible	faible
$\sigma_2$	forte	intermediaire	faible	faible
$\sigma_3$	forte	forte	intermediaire	faible
$\sigma_4$	forte	forte	forte	intermediaire

TAB. 5.2: Exemple de table probabiliste de révision de croyances pour une ensemble de supports  $\Sigma = \{\sigma_1 \prec \sigma_2 \prec \sigma_3 \prec \sigma_4\}$  définissant la probabilité de réviser une croyance de crédibilité  $\sigma_{old} \in \Sigma$  (en haut) en fonction du niveau de crédibilité  $\sigma_{new}$  (à gauche) de la nouvelle information.

Nous définissons la révision d'une croyance par une information contradictoire comme une probabilité  $p^{rev}$ . Cette probabilité est définie en fonction de la crédibilité attribuée à la nouvelle information  $\sigma^{new}$  et du support de l'ancienne information  $\sigma^{old}$  :  $p^{rev} : (\sigma^{old}, \sigma^{new}) \mapsto [0, 1]$ . Il s'agit donc d'une table de probabilités qui énonce quelle est la probabilité qu'une nouvelle information remplace une croyance. Cette table est définie comme paramètre du modèle. Afin de conserver une cohérence avec l'ordonnement de l'ensemble  $\Sigma$ , les probabilités de révisions, structurées comme en tableau 5.2, doivent respecter certaines contraintes afin de demeurer cohérentes (voir figure 5.2) :

- si  $\sigma^{new} \succ \sigma^{old}$ , la probabilité de révision est élevée voire certaine.
- si  $\sigma^{new} = \sigma^{old}$ , la probabilité de révision est intermédiaire, afin de tenir compte de l'inertie.
- si  $\sigma^{new} \prec \sigma^{old}$ , la probabilité de révision est très faible, mais pas nulle, afin de ménager la possibilité de réviser à long terme une croyance ancienne.

Sur cette base, la table de révision  $p^{rev}(\sigma^{old}, \sigma^{new})$  permet de tenir compte des spécificités de chaque niveau de support. Pendant les expérimentations, nous serons

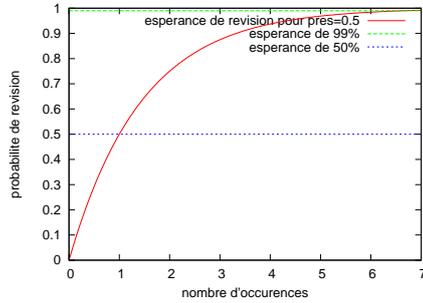


FIG. 5.7: Probabilité qu'une croyance ait été révisée par nombre de réception d'information, pour  $p^{res} = 0.5$

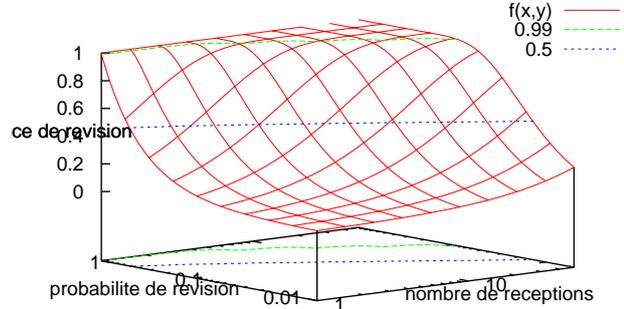


FIG. 5.8: Probabilité qu'une croyance ait été révisée sachant le nombre de réceptions d'information et la probabilité de révision

amenés à décrire un niveau de crédibilité pour les croyances préalables, associé à des probabilités de révision spécifiques (voir 7.3.3).

#### Probabilité de révision de croyance pour des informations successives

La révision de croyances pour des supports  $\sigma^{old}$ ,  $\sigma^{new}$  donnés est un tirage aléatoire répété qui survient à chaque réception d'information. Ce tirage aléatoire peut être considéré comme un schéma de Bernoulli sur l'univers  $\{R, \neg R\}$  (avec  $R$  la révision de croyance), dont les paramètres seraient  $n$  le nombre de tirages et  $p = p(R) = p^{res}(\sigma^{old}, \sigma^{new})$  (avec  $q = 1 - p$ ). La probabilité que l'on obtienne un nombre donné d'occurrences  $x = \{0..n\}$  de  $R$  selon ces paramètres, noté  $X = x$ , est fournie par la loi binomiale :  $p(X = x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$ . Dans notre cas, nous nous intéressons à toute issue dans laquelle la croyance a été révisée au moins une fois, c'est-à-dire tout nombre de tirages supérieur à 1 :  $p(X = [1..n]) = 1 - p(X = 0)$ . Nous disposons donc facilement de la formule qui lie la probabilité de révision des croyances, l'espérance de révision pendant  $n$  tirages et le nombre de tirages :  $p(X > 1) = 1 - (1 - p)^n$ . On obtient donc la formule qui nous permet de paramétrer la probabilité de révision des croyances en fonction du nombre de réceptions d'informations nécessaires pour atteindre une espérance donnée de révision des croyances :  $p^{rev} \geq 1 - e^{\frac{\ln(1-p^{attendu})}{n}}$ . Cette notion est plus intuitive à appréhender pour l'utilisateur du modèle que la probabilité de révision brute.

La figure 5.7 représente la relation entre le nombre de réceptions d'information et l'espérance de révision des croyances, dans le cas où la probabilité de révision des croyances est  $p^{rev} = 0.5$ . Comme on peut le voir sur cette figure, une espérance de révision des croyances de 50% est atteinte dès la première réception d'information, tandis qu'il faut approximativement 7 réceptions d'information pour avoir une quasi-

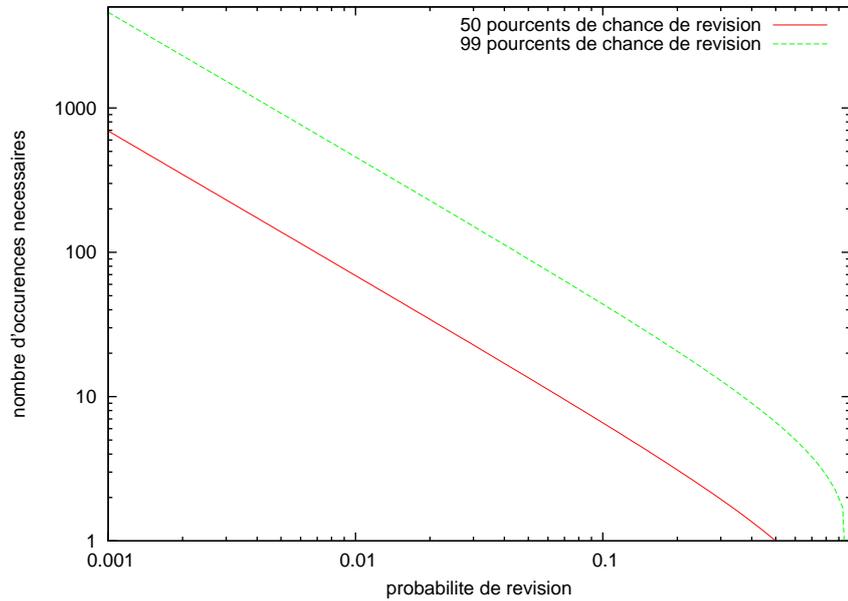


FIG. 5.9: Probabilités de révision d’une croyance à 50 et 99% sachant le nombre de messages persuasifs reçus et la probabilité de révision

certitude (99% d’espérance) que la croyance soit révisée. La figure 5.8, qui présente la même information pour toutes les probabilités de  $p^{rev}$  possibles, démontre que la probabilité qu’une croyance soit révisée est exponentielle dans les premiers tirages, et ralentit en approchant de la révision certaine. Nous avons représenté sur cette figure deux repères d’espérance de révision à 50% et 99% (quasi-certitude).

### Paramétrage des probabilités de révision

En utilisant cette formule, il devient possible de paramétrer plus naturellement la table de révision des croyances, en se basant sur le nombre de réceptions d’information estimé nécessaire pour la persuasion. Sur la figure 5.9, les repères de probabilité de révision à 50 et 99% sont représentés pour faciliter ce paramétrage. Ainsi, si l’utilisateur du modèle considère que la révision d’une expérience personnelle (de support  $\sigma^{xp}$ ) par un message publicitaire (crédibilité  $\sigma^{pub}$ ) est quasi-certaine après 500 réceptions de messages publicitaires, la probabilité de révision sera fixée à  $p^{rev}(\sigma^{pub}, \sigma^{xp}) = 0.0095$ . Dans ce cas, après réception de 70 messages, la probabilité de révision sera de 0.5. Faute de donnée directe ou indirecte sur les statistiques de révision des croyances, cette approche permet de se reposer sur des évaluations “de bon sens”, qui pourraient néanmoins être mesurées sur le terrain pour une meilleure précision.

Ce mécanisme de révision probabiliste demeure simple, tout en étant compatible avec plusieurs observations :

- temporalité et pression informationnelle : une croyance ancienne sera probablement révisée si la durée est suffisamment longue et/ou le nombre de messages

- important.
- multiplicité des sources : de nombreuses sources envoient des messages plus nombreux, ce qui augmente la probabilité de réviser l'information.
- une inertie est décrite dans la révision des croyances, une croyance ne pouvant pas être révisée immédiatement.

### 5.4.3 Algorithmes de révision de croyances

#### Définition d'ensembles d'exclusion

Afin de décrire la révision de croyances contradictoires, il est bien sûr nécessaire de définir ce que sont des croyances incompatibles entre elles, ce qui n'existe pas encore dans notre modèle, dans lequel les concepts sont indépendants. Comme cela a été fait dans les fonctions de croyance, nous définissons un ensemble d'incompatibilités entre concepts noté  $\Theta$ , qui contient des ensembles  $\theta$  de concepts incompatibles, avec  $\forall \theta \in \Theta, \theta \subset \mathcal{C}$ . Deux concepts sont incompatibles si l'on ne peut pas croire simultanément qu'un objet est rattaché simultanément à ces deux concepts. Par exemple, "cher" et "bon marché" sont incompatibles, de même que "dangereux" et "sûr". Dans de nombreux cas, les ensembles d'exclusion contiennent plus de deux concepts, comme "très bon marché", "prix habituel" et "cher". Chaque ensemble d'exclusion contient donc au moins deux concepts (et potentiellement plus de deux concepts).  $\Theta$  est un paramètre du modèle fourni par l'utilisateur. Pour simplifier, nous considérerons ici qu'un concept est au plus contenu dans un seul ensemble d'exclusion.

Lorsqu'une information  $(A, B, \sigma^{new})$  est reçue, avec  $A, B \in \mathcal{C}$  et  $\sigma^{new} \in \Sigma$ , on détecte la contradiction avec une croyance existante pour un objet  $o \in \mathcal{O}$  par l'algorithme suivant :

- $B$  appartient à un ensemble d'exclusion :  $\exists \theta_i \in \Theta | B \in \theta_i$ . Si  $B$  n'appartient à aucun ensemble d'exclusion, il ne peut pas y avoir contradiction.
- on récupère les concepts associés à  $o$  en construisant la représentation activée  $RA_o^{a,t}$ . Il y a contradiction si un concept opposé à  $B$  est relié à l'objet  $o$  :  $\exists C_j | C_j \in \theta_i \cap RA_o^{a,t}$ .

#### Révision d'une croyance

La révision d'une croyance est réalisée par l'algorithme 5.2. Conformément à ce que nous avons détaillé plus haut, les cas de contradiction (ligne 1) ou de non contradiction (ligne 16) sont distingués. Dans le premier cas, la révision des croyances est probabiliste (ligne 5). En l'absence de contradiction, on augmente la crédibilité d'une croyance préalable (lignes 19 à 22) ou l'on ajoute la nouvelle croyance (ligne 28). La révision des croyances se base sur le support des concepts et non des croyances (ligne 1). Par conséquent, il est possible de devoir supprimer plusieurs liens menant à un concept afin de créer une croyance menant à un concept incompatible (lignes 9 à 11).

---

**Entrées:**  $(C_1, C_2, \sigma^{new})$  l'information reçue  
**Entrées:**  $IAN^{a,t}$  la base de croyances  
**Entrées:**  $RA_o^{a,t} = (C^{RA}, s^{RA})$  la représentation activée correspondant à l'objet  $o$ , avec  $C^{RA} \subset \mathcal{C}$  et  $s : C^{RA} \mapsto \Sigma$   
**Entrées:**  $p^{rev} : \Sigma, \Sigma \mapsto [0 : 1]$

- 1: **si**  $\exists \theta_i \in \Theta | B \in \theta_i$  **et**  $\exists C_j | C_j \in \theta_i \cap C^{RA}$  **alors**
- 2:    // il existe une contradiction entre l'information reçue et les croyances préalables
- 3:    *random* = tirage aleatoire uniforme dans  $[0 : 1]$
- 4:     $\sigma^{old} = s(C_j)$
- 5:    **si** *random*  $\leq p^{rev}$  **alors**
- 6:        // le tirage aléatoire mène à une révision
- 7:        // on supprime tous les liens menant au concept incompatible,
- 8:        // en se limitant aux liens connectés à l'objet lui-même
- 9:        **pour** chaque information  $(o, C_x, \sigma^x) \in IAN^{a,t} | C_j$  fils de  $C_x$  **faire**
- 10:          supprimer  $(o, C_x, \sigma^x)$  de  $IAN^{a,t}$
- 11:        **fin pour**
- 12:        ajouter  $(C_1, C_2, \sigma^{new})$  à  $IAN^{a,t}$
- 13:    **sinon**
- 14:        // ne rien faire ; la croyance était contradictoire mais n'est pas remplacée
- 15:    **finsi**
- 16: **sinon**
- 17:    **si**  $\exists (C_1, C_2, \sigma^{old}) \in IAN^{a,t}$  **alors**
- 18:        // il existe un lien identique...
- 19:        **si**  $\sigma^{new} \succ \sigma^{old}$  **alors**
- 20:          // ... dont on va augmenter la crédibilité
- 21:          supprimer  $(C_1, C_2, \sigma^{old})$  de  $IAN^{a,t}$
- 22:          ajouter  $(C_1, C_2, \sigma^{new})$  à  $IAN^{a,t}$
- 23:        **sinon**
- 24:          // ne rien faire ; il existe déjà un lien identique à la crédibilité équivalente ou supérieure
- 25:        **finsi**
- 26:    **sinon**
- 27:        // le lien n'existe pas encore, et n'entre pas en contradiction avec un lien précédent ; on l'ajoute.
- 28:        ajouter  $(C_1, C_2, \sigma^{new})$  à  $IAN^{a,t}$
- 29:    **finsi**
- 30: **finsi**

---

Algorithme 5.2: Algorithme de révision d'une croyance  $revision\_croyance((C_1, C_2, \sigma^{new}), RA_o^{a,t})$ . Les lignes commençant par “//” sont des commentaires de l'algorithme.

---

**Entrées:**  $TAN^{o,a}$  l'ensemble des informations reçues  
**Entrées:**  $\sigma^{source}$  la crédibilité perçue de la source du message  
**Entrées:**  $IAN^{a,t}$  la base de croyances (*Individual Associative Network*)

- 1:  $RA_o^{a,t} = construire\_representation\_activee(IAN^{a,t}, o)$ .
- 2: **pour** chaque information  $(C_1, C_2, \sigma^{new}) \in TAN$  **faire**
- 3:      $\sigma^{recu} = max(\sigma^{source}, \sigma^{new})$
- 4:     appeler  $revision\_croyance((C_1, C_2, \sigma^{recu}), RA_o^{a,t})$
- 5: **fin pour**

---

Algorithme 5.3: Algorithme de révision de croyances lors de la réception d'un nouveau message

Jusqu'ici, nous avons décrit la révision d'une unique croyance  $(A, C, \sigma^{old})$  par une unique information  $(A, B, \sigma^{old})$ . En réalité, nous avons défini un message comme un réseau associatif (TAN) composé d'un ensemble de croyances  $\{(C_1, C_2, \sigma_i) .. (C_3, C_4, \sigma_j)\}$ . La révision de plusieurs croyances est simplement considérée comme la révision d'autant de croyances indépendantes, comme cela est décrit par l'algorithme 5.3. En d'autres termes, nous considérons qu'un agent peut rejeter une information qui contredit ses propres croyances, mais néanmoins croire une autre information transmise dans le même message.

## 5.5 Indicateurs sur la connaissance

Nous avons souligné (2.3.2) la nécessité de définir des indicateurs, dès la conception du modèle, pour observer l'évolution des simulations et le comparer au terrain.

### 5.5.1 *Awareness*

L'un des états décrits dans les étapes d'adoption de Rogers, et souvent mesuré pendant la diffusion d'un produit (études d'impact sur les campagnes de communication), est l'*awareness*, c'est-à-dire la proportion de consommateurs ayant entendu parler du produit. Dans notre cas, nous pouvons dire d'un agent  $a$  qu'il est en état *aware* si la représentation de l'objet  $o$  n'est pas vide  $R_o^{a,t} \neq \{\emptyset\}$ , et réciproquement qu'un agent est *unaware* si  $R_o^{a,t} = \{\emptyset\}$ . Cet indicateur constitue un premier élément statistique qui permet de comparer la dynamique de croyance dans la population. Par extension, nous pouvons définir l'*awareness* de la population d'agents comme la proportion des agents en état *aware* par rapport à un objet social.

### 5.5.2 Représentations sociales

L'*awareness*, ou non, d'une innovation, ne permet pas de distinguer les différents types de croyances partagées dans la population. Or, notre représentation étant à la fois inspirée de la MCT et des représentations sociales, nous pouvons utiliser le même

principe que dans ces théories pour mesurer et représenter les représentations partagées dans la population.

Dans notre cadre, nous définirons une représentation sociale comme un ensemble de croyances partagées par un groupe d'agents. Dans des collectes d'information sur le terrain, il est nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques évoluées, qui calculent la distance entre deux arbres de croyances pour classer les représentations proches [Doise *et al.*, 1995b]. Dans notre modèle, les croyances sont simplifiées, les sources d'information et les interprétations subjectives moins nombreuses que dans la réalité. Une simple détection des représentations identiques constitue donc un outil statistique suffisant pour observer l'évolution du contenu des croyances dans la population.

A chaque pas de temps, on parcourt donc les représentations  $R_o^{a,t}$  de chaque agent  $a \in \mathcal{A}^{adopt}$  pour chaque objet  $o \in \mathcal{O}$ , et on les groupe par représentations identiques. Cette classification est automatique, détectant dynamiquement les nouvelles représentations pendant la simulation. Cet outil sera utilisé pour visualiser l'évolution des croyances en coloriant les agents différemment pour chaque représentation, ou en dressant des statistiques sur la proportion d'agents partageant une représentation donnée. Notons que la représentation vide correspond à l'état *unaware*, tandis que la somme des proportions des agents partageant des représentations non-vides correspond à la proportion *aware*.

Les représentations sociales, contrairement à l'*awareness*, permettent de suivre l'évolution du *contenu* des croyances. Des méthodes de collecte existent pour les représentations sociales, ainsi que pour la MCT; les représentations sociales constituent donc un outil applicable à la fois sur la population réelle et la population simulée, outil qui peut être utilisé pour la validation du modèle.

## 5.6 Protocole de collecte

L'ensemble du modèle reposant sur les réseaux associatifs, il était évidemment nécessaire de vérifier que nous pouvions les collecter depuis le terrain. La MCT propose le protocole de *laddering*, précisément conçu pour collecter des chaînes de croyances. Il nécessitait toutefois quelques modifications pour s'appliquer à notre problématique propre.

- L'élicitation des attributs n'était pas réalisée par l'évaluation du produit comme dans la MCT ("pourquoi préférez-vous ce produit à une autre") mais s'étendait à toutes les croyances récupérables chez le sujet. Nous avons donc utilisé les questions "que savez-vous à propos du produit", "pourquoi l'appréciez-vous", "que diriez-vous à quelqu'un qui désirerait en acheter un", etc.
- Le *laddering* s'effectuait dans n'importe quel ordre, en reprenant les attributs pour lesquels aucune chaîne n'avait été finalisée ("vous aviez parlé de [...], pourquoi?")

- pendant l'entretien, le graphe de croyances était tracé, afin de faciliter l'analyse des données. L'entretien était également enregistré, afin de pouvoir récupérer des informations quand le rythme était trop rapide
- à la fin de l'entretien, nous reprenions chacun des concepts de niveau élevé, et demandions au sujet à quel point ce concept était important pour lui. L'échelle d'évaluation était définie comme :
  - (++) "sans cela, je n'aurais pas adopté"
  - (+) "c'est un avantage, mais pas décisif dans mon choix"
  - (=) "n'influence pas mon choix"
  - (-) "élément négatif mais pas décisif"
  - (- -) "à cause de cet attribut, je n'ai pas adopté / je n'adopterai pas / j'aimerais abandonner l'innovation"
- l'évaluation mesurée (- -) était transformée en concept spécial : "rejet"

Cette expérimentation poursuivait de nombreux objectifs :

- tester le protocole d'entretien
- déterminer si le traitement des résultats pouvait être partiellement automatisé, afin de rendre possible l'application de ce protocole à de nombreux cas de diffusion d'innovation
- vérifier si la représentation des croyances sous forme de réseaux associatifs était pertinente pour représenter les croyances d'adoptants
- déterminer si des valeurs sociales ou autres motivations de haut niveau communes à plusieurs produits pouvaient être identifiées pour un même sujet
- observer les croyances existantes, leur similarité ou dissimilarité, leur variation en contenu à travers différents profils d'adoptants
- évaluer le potentiel d'une telle méthodologie d'entretien pour une institution
- de façon plus intangible, prendre contact avec des adoptants

Les sujets ont été recrutés sur la base d'un corpus de sujets géré par France Télécom R&D (Rennes). Ils étaient indemnisés pour leurs frais de déplacement. Le protocole étant nouveau pour eux - la plupart des entretiens portaient sur le test de prototypes de produits - on peut raisonnablement écarter le risque de "professionalisation" des sujets. 30 sujets ont été rencontrés, chaque séance durant environ 1h30. L'entretien débutait par un questionnaire (cf. plus bas) qui permettait de vérifier les informations sociodémographiques du sujet, d'expliquer le principe de l'entretien, mais surtout de créer une ambiance de discussion naturelle.

Chaque sujet était interrogé sur 4 produits, totalisant 120 entretiens-produits. Trois de ces produits ont été sélectionnés par leur intérêt pour l'entreprise France Télécom. (1) Connection à Internet par offre dite "Triple-Play" (accès ADSL à Internet, téléphone et télévision), (2) cadre photo numérique (petit écran LCD permettant d'afficher des photos) et (3) iPhone<sup>2</sup>, téléphone à l'ergonomie novatrice créé par Apple et commercia-

---

<sup>2</sup>Au moment de ces expériences - février et mars 2008 - ces produits étaient récents sur le marché ; les cadres photos numériques avaient été popularisés à l'occasion des fêtes de Noël 2007, et l'iPhone

lisé en France sous la marque France Télécom - Orange. Pour chacun de ces produits, nous avons sélectionné en proportions égales des sujets n'ayant pas recherché d'information (au courant de l'existence du produit uniquement par les informations reçues de différents canaux), des sujets en recherche active d'information et des sujets ayant acheté le produit. Notons que pour les produits (1) et (2), les sujets pouvaient posséder n'importe quelle offre de la catégorie, chez France Télécom ou chez un concurrent. Ces produits étaient très orientés vers la technologie, ce qui faisait courir le risque de rencontrer des sujets qui n'avaient d'intérêt pour aucun d'entre eux, empêchant de déterminer des valeurs sociales de haut niveau. Nous avons donc ajouté un quatrième produit choisi avec le sujet, dans n'importe quelle catégorie ; des sujets nous ont parlé voiture à motorisation hybride, écran plat, voyage ou achat de bateau.

Nous avons associé à cette collecte d'information un questionnaire, afin d'obtenir quelques indications utiles pour le modèle de communication et d'autres paramètres. Nous avons ainsi interrogé les sujets sur les attributs qu'ils recherchaient pendant leur processus de recherche d'information, les raisons pour lesquelles ils avaient discuté d'un produit, ainsi que le nombre de personnes avec lesquelles ils avaient communiqué. Nous avons développé un logiciel facilitant la fusion de ces réseaux individuels comme réseaux collectifs. Nous fournissons ici quelques exemples de croyances collectives récupérées. Ces réseaux collectifs correspondent aux représentations sociales qui permettent d'observer le modèle ; c'est ce type de réseau qui pourrait être utilisé pour comparer les résultats du modèle avec des résultats réels.

Nous présentons ici les résultats directement liés à la question de la descriptivité des croyances. D'autres détails peuvent être trouvés dans [Thiriot, 2008].

### 5.6.1 Exemple de résultat : perception de l'iPhone

La figure 5.10 (page 117) présente la représentation sociale de l'iPhone, pour tous les sujets. Seuls les concepts évoqués par au moins 3 sujets sont retenus. La taille des concepts, comme l'épaisseur des liens, est proportionnelle au nombre de sujets l'ayant évoqué. Le chiffre entre parenthèses jouxtant les noms des concepts est le nombre de sujets ayant évoqué ce concept.

- On constate que la quasi-totalité des sujets évoquent le prix de l'appareil, la moitié le prix de l'abonnement, ce qui conduit 19 sujets sur 28 à l'estimer trop cher et à le rejeter.
- 21 sujets sur 28 parlent de l'accès Internet en mobilité, qui a constitué l'argument commercial (avec l'ergonomie et le design) des publicités télévisuelles. Néanmoins, plusieurs des sujets qui évoquent cet accès en mobilité le perçoivent comme un motif de rejet du produit (perçue comme inutile, ou brisant les relations sociales, ou favorisant une addiction déjà présente).

---

commercialisé dans la même période.

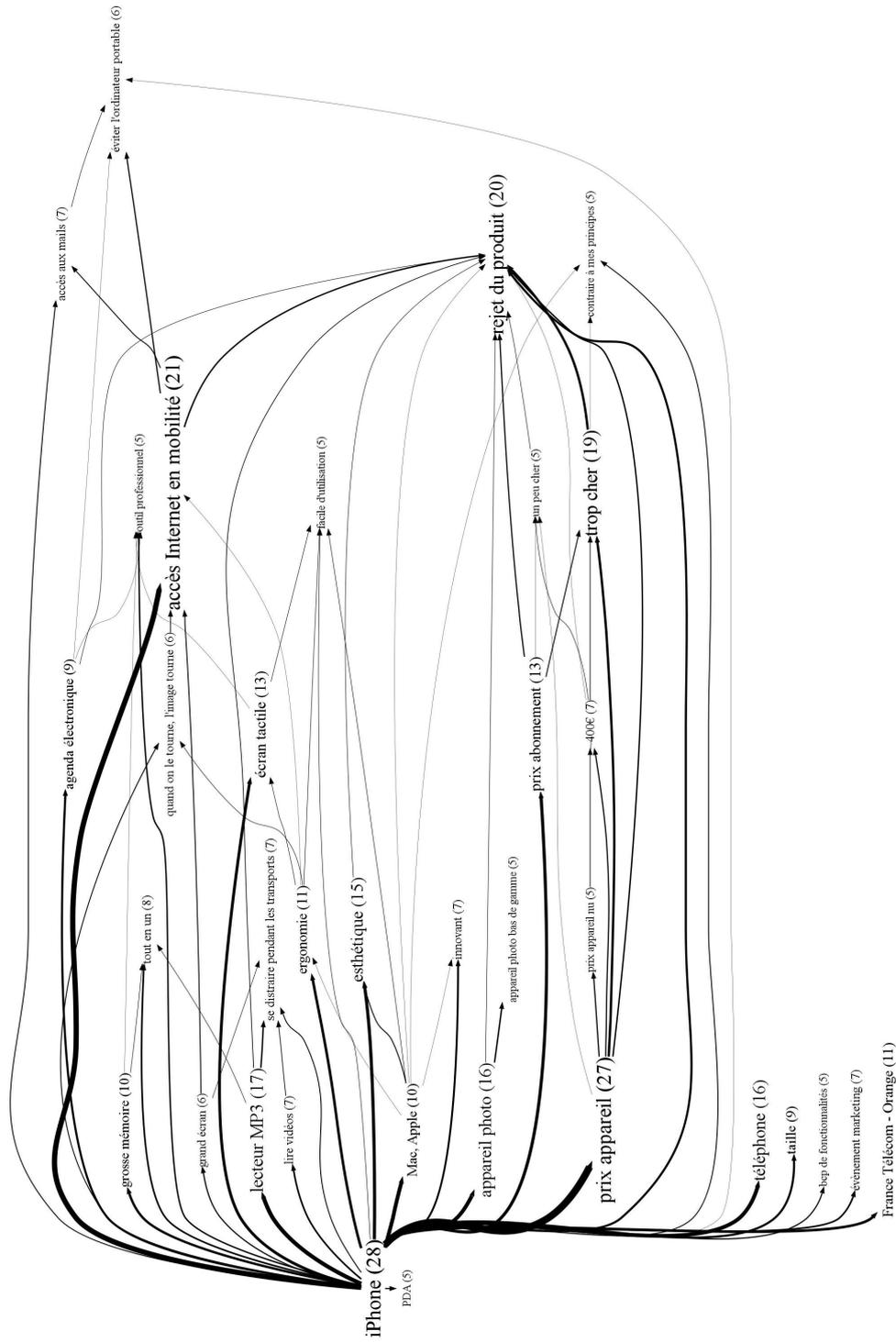


FIG. 5.10: Représentation sociale de l'iPhone, pour les 28 sujets connaissant son existence. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de sujets ayant évoqué un concept, l'épaisseur des liens est proportionnelle au nombre de sujets qui l'ont exprimé.

- 17 sujets sur 28 évoquent sa fonctionnalité MP3 (lecture de musique), perçue comme permettant de “se distraire pendant les transports” (également mentionné comme conséquence de la lecture de vidéos).
- la fonctionnalité appareil photo est associée à l’iPhone pour 16 sujets sur 28.
- 16 personnes seulement le citent comme un téléphone - sans doute parce que l’association est trop évidente pour mériter d’être mentionnée
- 15 personnes citent le design, sans le rattacher à aucune motivation plus élevée
- 10 personnes l’associent à son créateur Apple, rattaché à l’innovation, à l’esthétique, à l’ergonomie et à la facilité d’utilisation
- 7 sujets le mentionnent comme un “événement marketing”. Il s’agit principalement des agents qui sont en état *aware*, sans avoir recherché davantage d’information.
- 5 sujets le considèrent comme “contraire à [leurs] principes”

### 5.6.2 Différences dues à l’état d’adoption

On constate des différences dans le contenu des croyances, en fonction de l’état d’adoption des sujets. Nous présentons les différences de perception pour la catégorie de produit “cadres photos numériques” pour les sujets *aware* (figure 5.11 p. 119), en recherche d’information (fig. 5.12 p. 120) et possédant un cadre photo (fig. 5.13 p. 122). Quel que soit leur état, les sujets savent qu’un cadre photo numérique permet de diffuser un diaporama, et mentionnent le moyen de chargement du cadre (critère discriminant entre les différents produits existants).

Les différences de croyances sont parfois dues à des comportements de consommation différents. Ainsi, 3 des 8 agents en état *aware* ne prévoient pas d’acheter le produit immédiatement, car ils savent que le prix des nouveaux produits technologiques baisse rapidement après leur commercialisation. Un tel lien peut être intéressant à décrire pour caractériser - à l’aide de croyances - le comportement de consommation. D’autres différences proviennent de l’exposition au canal expérience. Les sujets possédant un cadre photo numérique en trouvent l’utilisation facile (fait important à noter, puisqu’une telle enquête permet de déterminer que cette information positive sera transmise si on les questionne). L’expérience a aussi révélé à 3 des 7 sujets que le cadre est en réalité inutile, puisqu’il fait double emploi avec un téléviseur et/ou un ordinateur. Une institution est également intéressée par l’usage développé grâce à la possession ; ici, un cadre permet de regarder ses propres photos, ou de les montrer à des amis.

### 5.6.3 Réseaux associatifs et image de marque

La collecte fait également apparaître des représentations associées aux marques (figures 5.14 p. 122 et 5.15 p. 123). Par exemple, Orange est perçue comme ayant un service après-vente (SAV) qui permet de trouver des interlocuteurs. Ce type de croyance peut donc être décrit par des réseaux associatifs. On peut supposer que ces croyances seront activées pour d’autres produits vendus par la même entreprise ; leur collecte peut donc servir de paramétrage au modèle.

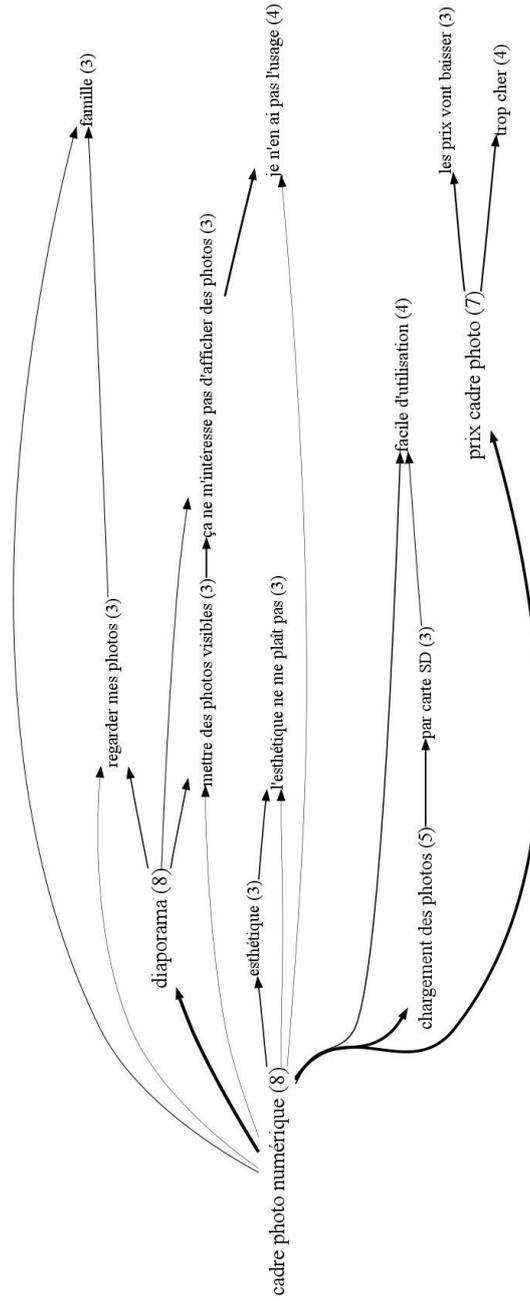


FIG. 5.11: Représentation sociale du cadre photo numérique pour les sujets en état *aware*

#### 5.6.4 Bilan des expériences

Ces expériences nous prouvent que les croyances peuvent bien être collectées sur le terrain, qu'elles diffèrent d'un état d'adoption à l'autre. Il semble possible de réutiliser certaines de ces croyances - en particulier celles liées aux marques, ou au comportement de consommation - pour paramétrer le modèle, afin de décrire les croyances préalables susceptibles d'influencer l'adoption d'une innovation. En résumé, le **protocole de collecte peut jouer deux rôles dans ce processus de modélisation : paramétrage et validation**. Cette étude prouve aussi la flexibilité des réseaux associatifs. De façon annexe, nous constatons que le protocole d'enquête permet de découvrir des motivations ou des usages innattendus.

### 5.7 Bilan

Conformément à notre objectif, nous avons réalisé une représentation des croyances capable de décrire des croyances réelles, qui peuvent être collectées par entretien ou questionnaire. L'incompréhension d'une information est décrite par l'absence d'un lien entre l'attribut et une motivation de l'agent. L'incompatibilité entre information et croyances survient quand l'information n'a pas une crédibilité suffisante pour contredire les croyances préalables. Les liens entre catégorie de produit et innovation, ou entre plusieurs innovations, peuvent être facilement représentés. De même, toute croyance peut être partagée entre plusieurs innovations.

Afin de rendre le modèle paramétrable, nous avons évité l'utilisation de niveaux continus de croyance, et proposé des niveaux qualitatifs qui se collectent plus naturellement. Nous avons également développé des indicateurs utilisables sur le système social réel et le modèle, sous la forme du taux d'*awareness* et des représentations sociales. La représentation de croyances offre une grande flexibilité à l'utilisateur du modèle, lui permettant de décrire plus ou moins précisément les croyances qu'il croit exister, ou qui ont été mesurées dans la population.

Comme souvent en simulation sociale, nous nous heurtons à des vides théoriques dans les sciences humaines ; nous avons comblé ces vides par des hypothèses qui nécessiteront un travail d'expérimentation conséquent. En particulier, si la révision probabiliste des croyances nous paraît élégante, la forme de la courbe de probabilité cumulée de révision n'est pas paramétrée sur une quelconque réalité observée. Il est possible que la courbe réelle connaisse une pente plus rapide ou plus lente.

Les paramètres du modèle de représentation des croyances sont résumés dans la table 5.3.

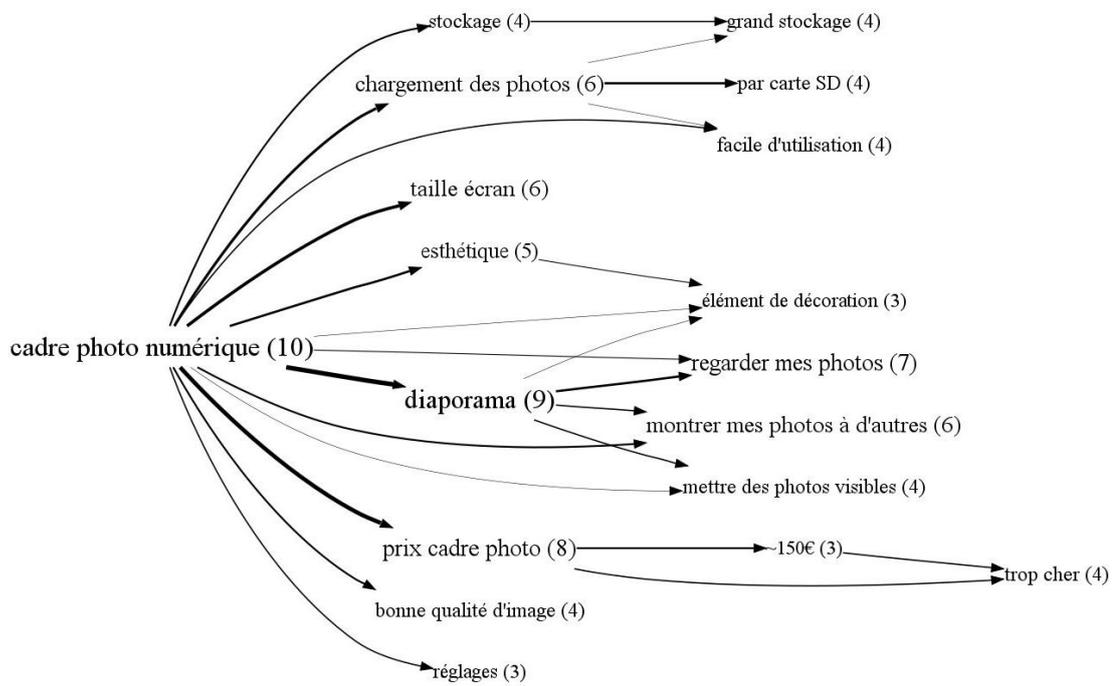


FIG. 5.12: Représentation sociale du cadre photo numérique pour les sujets en recherche d'information

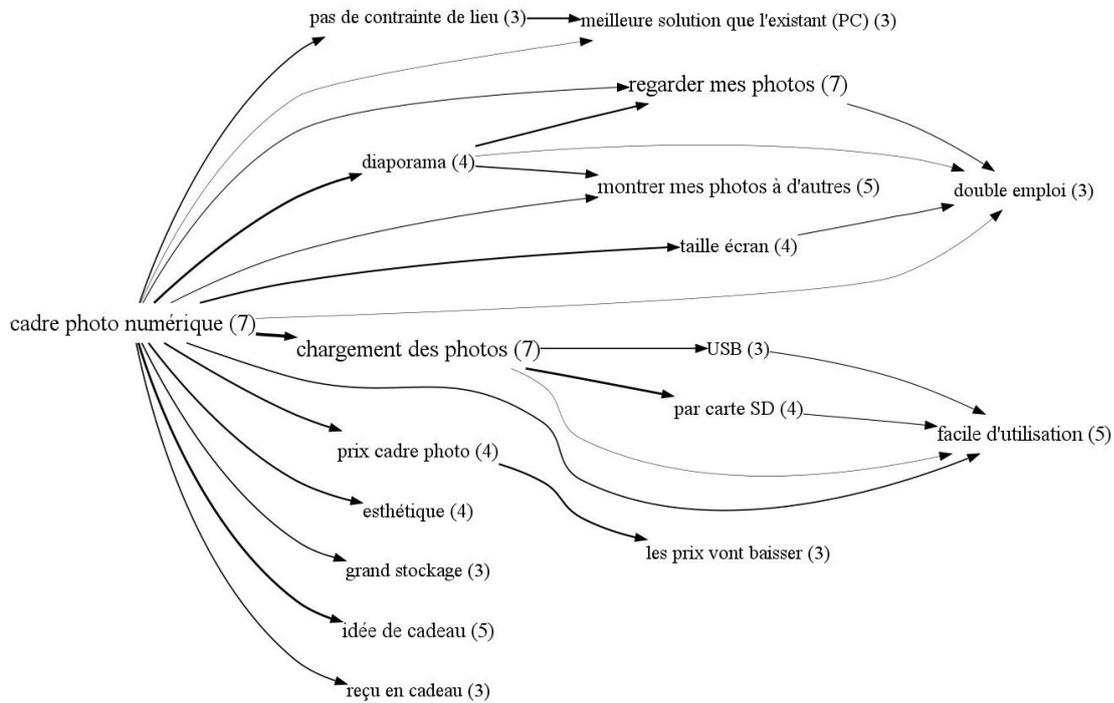


FIG. 5.13: Représentation sociale du cadre photo numérique pour les sujets qui possèdent un cadre photo numérique

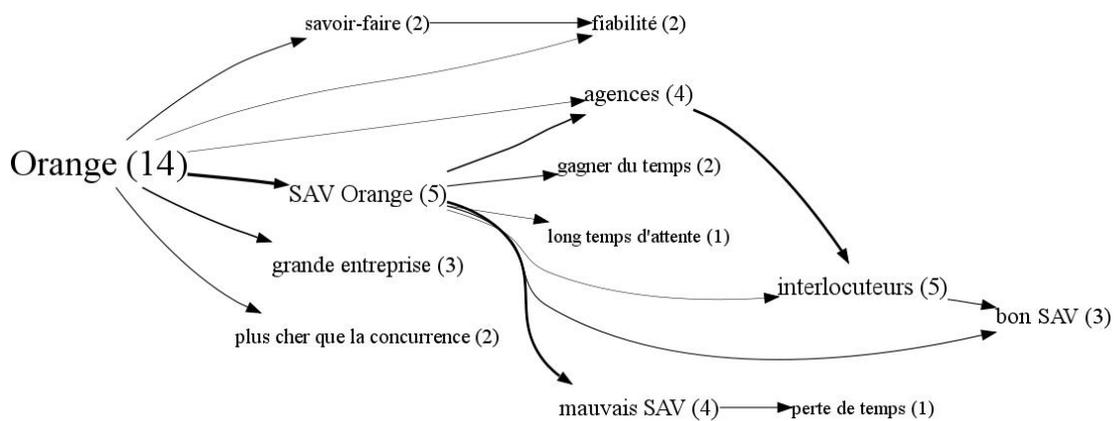


FIG. 5.14: Perception de la marque Orange récupérée lors des entretiens sur les offres "Triple Play" (pour tous les sujets, concepts évoqués au moins deux fois)

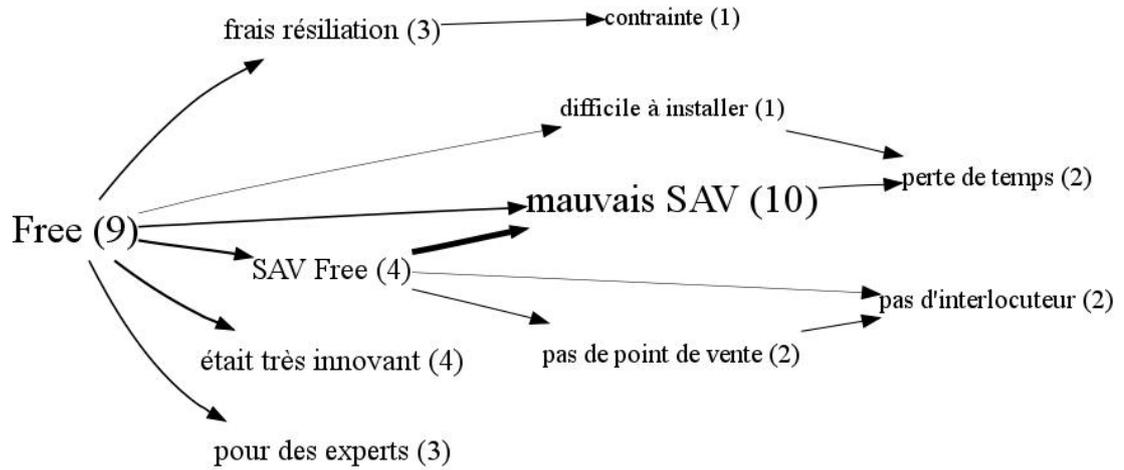


FIG. 5.15: Perception de Free récupérée lors des entretiens sur les offres “Triple Play” (pour tous les sujets, concepts évoqués au moins deux fois)

paramètre	notation
<b>croiances</b>	
concepts représentés	$\mathcal{C}$
objets sociaux	$\mathcal{O} \subset \mathcal{C}$
niveaux de support	$\Sigma$
table de filtrage	$T\Sigma : \Sigma \mapsto \Sigma$
probabilité de révision	$f^{revision}(\sigma^{old}, \sigma^{new}) : \Sigma, \Sigma \mapsto [0, 1]$
perception subjective	$f^{filtrage}(\sigma^{recu}) : \Sigma \mapsto \Sigma$
<b>informations exogènes</b>	
croiances préalables de chaque segment	$\forall s \in \mathcal{S}, \forall a \in s, IAN^{a,0}$

TAB. 5.3: Paramètres de communication du modèle CoBAN.



# Chapitre 6

## Modèle de communication

### 6.1 Eléments du modèle de communication

#### 6.1.1 Les agents, des entités communicantes

Dans le modèle CoBAN, un agent est une entité capable de communiquer. L'ensemble des agents représentés dans le système est noté  $\mathcal{A}$ . La plupart des agents représentent les adoptants potentiels  $\mathcal{A}^{adopt} \subset \mathcal{A}$ ; ces agents-adoptants sont capables de recevoir et d'émettre de l'information. Ils sont considérés comme des sources d'information endogènes dans le système, dont le comportement de communication est décrit par le modèle. Par contre, d'autres agents  $\mathcal{A}^{exo} \subset \mathcal{A}$  sont utilisés pour représenter les sources d'information exogènes au modèle, qui correspondent aux médias de masse utilisés par l'institution pour introduire l'information. Tout comme en marketing, l'hétérogénéité de la population sera simplifiée par segments. Ces segments  $\mathcal{S}$  sont des ensembles d'adoptants potentiels définis de façon à ce qu'un agent appartienne toujours à un segment. Des exemples de segments seront proposés pendant les expérimentations (7.3).

#### 6.1.2 Les agents-émetteurs, des sources d'information exogènes

Les **sources d'information exogènes**  $\mathcal{A}^{exo}$  sont contrôlées par l'utilisateur du modèle. Ce sont des sources d'information qui agissent sur impulsion de l'institution pendant la diffusion des innovations. Les sources exogènes contiennent les médias de masse utilisés pour la publicité (affiches, télévision, presse, web, etc.) ainsi que les agents de changement (dont les vendeurs et les adoptants incités à promouvoir l'innovation). Le comportement de communication des sources exogènes fait partie des paramètres du modèle de communication.

La structure d'un agent-émetteur est très simple; c'est un agent auquel on peut demander de transmettre une représentation donnée sur un objet social, pendant une période donnée, en utilisant un canal défini.

### 6.1.3 Les agents-adoptants, sources d'information endogènes

Les adoptants potentiels sont décrits par des agents-adoptants  $\mathcal{A}^{adopt} \subset \mathcal{A}$  qui représentent les unités sociales susceptibles d'adopter une innovation. Dans les études sur la diffusion d'innovations auprès du grand public, l'unité de base est généralement l'individu ou le foyer. En fonction du cas de diffusion étudié, des unités plus vastes ou plus précises peuvent être définies : les femmes pour la diffusion de la contraception, les fermes pour des diffusions agricoles ou les médecins pour les nouveaux médicaments. Nous ne nous intéressons pas ici à l'adoption d'innovations par des organisations, dont les comportements de communication et d'adoption sont quelque peu différents [Rogers, 2003, p. 225].

Les agents-adoptants sont des **entités communicantes endogènes**  $\mathcal{A}^{endo}$  qui transmettent de l'information sans aucune intervention de l'utilisateur du modèle. Elles correspondent aux sources d'information qui ne sont pas contrôlées par l'institution pendant la diffusion d'innovation. Les sources endogènes comprennent toujours les adoptants potentiels  $\mathcal{A}^{adopt}$ , à l'exclusion des agents de changement contrôlés par l'institution. Certains médias de masse peuvent également être considérés comme endogènes, comme les sites web collaboratifs qui mémorisent et retransmettent uniquement des avis provenant d'adoptants.

On pourrait également considérer d'autres médias de masse comme des sources elles-mêmes endogènes, comme par exemple la presse généraliste qui évoque les innovations déjà plébiscitées dans la population. Les travaux sur l'*agenda-setting* vont d'ailleurs dans ce sens, en évoquant le transfert de saillance de l'agenda public vers l'agenda de la presse. Néanmoins, l'introduction de ces médias de masse comme sources endogènes supposerait de savoir décrire le transfert de saillance de la population, ou d'autres médias de masse, vers l'agenda de la presse. Faute de disposer d'un tel modèle, nous n'intégrerons pas actuellement ces médias de masse comme sources endogènes, mais exogènes.

### 6.1.4 Canaux de communication

Les canaux de communication, comme cela est devenu classique dans les modèles orientés agents, constituent dans le modèle les supports de toute communication. Un canal est un lien entre deux agents  $(a_1, a_2)$ . L'ensemble des canaux décrits dans le modèle est noté  $\mathcal{L}$ . Nous appellerons *canal unidirectionnel* un canal qui lie un agent-émetteur à un agent-adoptant. Les sources exogènes sont toujours liées par des canaux unidirectionnels : l'individu qui reçoit un message par la télévision ou par la presse ne peut envoyer d'information à la télévision. Un canal unidirectionnel correspond à ce que l'on appelle en marketing une communication "en *push*", envoyée au récepteur sans qu'il ne l'ait sollicitée. Un *canal bidirectionnel* permet par contre d'échanger de l'information ; on parle de canal bidirectionnel quand chaque agent est un agent-adoptant.

### Canaux de masse

Un canal de masse permet à une source d'envoyer une même information à un grand nombre d'individus. La construction des canaux de masse est un paramètre du modèle. La probabilité d'exposition  $p^{exposition,masse}$  est déterminée en fonction des données connues sur l'impact des médias de masse. Une probabilité d'interaction  $p^{interact} : \mathcal{L} \mapsto [0, 1]$  associe à chaque canal une probabilité d'interaction à chaque pas de temps. L'ensemble des canaux de masse sera raffiné en fonction des canaux utilisés pendant la diffusion modélisée. L'utilisateur peut proposer des niveaux de granularité différents, soit en représentant l'ensemble des médias de masse comme un unique canal attaché à une unique source exogène, soit en distinguant la télévision, la presse généraliste, la presse spécialisée, etc. On peut représenter un canal de masse par un ensemble de liens entre la source et chaque récepteur, solution que nous retiendrons ici. Pour ces canaux,  $p^{exposition}$  représente la probabilité que chaque individu soit exposé au média de masse : voir une affiche, regarder la télévision au moment de la transmission du message, écouter la radio, etc.

### Réseau d'interactions

Le *réseau d'interactions*, souvent appelé réseau social, définit les interactions interpersonnelles possibles entre les adoptants potentiels. À ce stade, nous supposons qu'il existe un *générateur de réseau social*  $G : \mathcal{A}^{adopt} \mapsto (\mathcal{A}^{adopt}, L)$  qui génère pour une population d'agents  $\mathcal{A}^{adopt}$  une structure d'interactions descriptive des interactions existant réellement, sous la forme d'un réseau non dirigé. Ce générateur est considéré comme un paramètre du modèle. Dans un premier temps, nous utiliserons des algorithmes générateurs de réseaux sociaux utilisés couramment en simulation orientée agents, comme le générateur de Barabasi-Albert et celui de Watts et Strogatz. Nous discuterons plus loin la pertinence, les risques et les limites induites par cette notion de réseau d'interaction, et proposerons un générateur alternatif (8).

Nous supposons donc que le réseau d'interactions a la forme  $(\mathcal{A}^{adopt}, L, p^{interact})$ , avec  $p^{interact} :: L \mapsto [0 : 1]$ . Les probabilités  $p^{interact}$  définissent la probabilité que deux agents ayant un lien social se rencontrent ; nous définirons le protocole d'interaction de façon à décrire que les individus n'échangent pas systématiquement sur l'innovation lorsqu'ils se rencontrent. Cette probabilité peut être définie pour une population donnée, indépendamment de l'innovation dont on simule la diffusion. Ce type de probabilité est généralement connu en fonction du type de relation sociale entre deux individus. En France, l'INSEE a publié quelques enquêtes qui indiquent les fréquences moyenne de rencontre entre amis, collègues, membres de la famille proche ou éloignée (par ex. [INSEE, 2008]). Dans d'autres cas de diffusion d'innovations, les statistiques sur le type de relation qui a conduit à un apport d'information est généralement mesuré ; par exemple, on sait que les femmes Luo discutent des moyens contraceptifs avec d'autres femmes du même âge [Watkins *et al.*, 1995a]. Ce type de statistique n'est toutefois applicable que si le générateur de réseau d'interactions décrit le type de relation qui lie deux personnes, ce qui n'est pas le cas des générateurs cités plus haut. Faute de

paramétrage précis, la probabilité d'interaction sociale pourra être considérée comme constante, auquel cas  $\forall l \in L, p^{interact} = x$ .

### L'expérience avec le produit

L'expérience avec le produit est considérée comme un cas particulier de canal de communication, qui permet à un sujet de manipuler et tester l'innovation. Nous considérons que cette expérience permet de gagner en information. Par exemple, une femme qui utilise la pilule contraceptive en apprend davantage sur les caractéristiques positives ou négatives. La probabilité d'exposition au canal "expérience" est généralement quasiment nulle avant adoption, et certaine après adoption. Toutefois, cette probabilité peut être utilisée pour déterminer des stratégies marketing de mise à disposition de produits dans des boutiques ou la distribution d'échantillons gratuits; dans ce cas, la probabilité d'exposition à l'expérience sera paramétrée de la même façon que celle d'un média de masse. Notons qu'il peut être utile de différencier expérience courte ou longue. L'expérience courte représente l'information que l'on gagne par observabilité : efficacité d'un engrais que l'on infère en croisant un champ, première appréciation en voyant un nouveau téléphone portable, etc. Par contre, l'expérience longue correspond à l'information qui est reçue en utilisant à long terme le produit : fiabilité du produit, frais d'entretien et autres coûts cachés, qualité du service après-vente, effets secondaires d'un médicament. L'utilisateur du modèle est libre de décrire ce type de distinctions par paramétrage.

## 6.2 Protocole de communication

### 6.2.1 La communication basée sur des objets sociaux

Nous définissons la communication comme un échange d'information sur un ou plusieurs objets sociaux. Lors d'un échange interpersonnel, deux individus discutent des sujets qu'il ont à l'esprit à ce moment, que nous appellerons les *objets sociaux saillants*. Un échange par canal de masse peut être vu de la même façon, la source d'information (le média) envoyant un message de son choix portant sur un ou plusieurs objets sociaux. Nous associons donc à chaque agent  $a \in \mathcal{A}$  un ensemble d'objets sociaux saillants  $Sal^{a,t} \subset \mathcal{O}$ . Cet ensemble peut être vu, selon l'angle de l'*agenda-setting*, comme l'agenda d'un agent. Nous verrons plus loin qu'un objet social devient saillant pour un agent parce qu'il désire parler proactivement de cet objet, ou parce qu'il recherche de l'information sur cet objet.

Le protocole d'interaction est le même pour tous les objets saillants, que l'objet soit devenu saillant pour récupérer de l'information ou parce que l'agent désire transmettre proactivement de l'information. Toutefois, il sera par la suite intéressant de mesurer les échanges provoqués par recherche ou émission proactive. Nous décomposons donc l'ensemble des objets saillants  $Sal^{a,t} \subset \mathcal{O}$  en  $SalPro^{a,t} \subset \mathcal{O}$  et  $SalSea^{a,t} \subset \mathcal{O}$ , qui correspondent respectivement à l'ensemble des objets devenus saillants par émission

---

**Entrées:**  $A_1, A_2 \in \mathcal{A}$  les agents associés dans le canal de communication  
**Entrées:**  $A_1.estSourcePure, A_2.estSourcePure \in \mathbb{B}$  la caractéristique agent-emetteur (ou non) de chaque agent  
**Entrées:**  $Sal^{A_1,t}, Sal^{A_2,t} \subset \mathcal{O}$  les objets sociaux saillants pour  $A_1$  et  $A_2$

```

1: si  $A_1.estSourcePure$  ou  $A_2.estSourcePure$  alors
2:   // ce canal est un canal unidirectionnel
3:   si  $A_1.estSourcePure$  alors
4:      $source = A_1$ 
5:      $recepteur = A_2$ 
6:   sinon
7:      $source = A_2$ 
8:      $recepteur = A_1$ 
9:   finsi
10:   $sujets = Sal^{source,t}$ 
11:  pour chaque sujet  $o \in sujets$  faire
12:     $message = source.demanderMessage(o)$ 
13:     $recepteur.recevoirMessage(message)$ 
14:  fin pour
15: sinon
16:   // ce canal est bidirectionnel
17:    $sujets = Sal^{A_1,t} \cup Sal^{A_2,t}$ 
18:  pour chaque sujet  $o \in sujets$  faire
19:     $message1 = A_1.demanderMessage(o)$ 
20:     $message2 = A_2.demanderMessage(o)$ 
21:     $A_1.recevoirMessage(message2)$ 
22:     $A_2.recevoirMessage(message1)$ 
23:  fin pour
24: finsi

```

---

Algorithme 6.1: Algorithme *genererInteraction*( $A_1, A_2$ ) gérant la communication entre deux agents  $A_1$  et  $A_2$  : détermination des objets sociaux qui constitueront les sujets de conversation et transmission des messages.

proactive et pour recherche d'information.  $Sal^{a,t}$  est défini par union de ces deux ensembles :  $Sal^{a,t} = SalPro^{a,t} \cup SalSea^{a,t}$ .

Le canal liant deux agents  $A_1$  et  $A_2$  définit la probabilité qu'ils soient exposés l'un à l'autre à chaque pas de temps. Toutefois, l'exposition à un canal ne signifie pas qu'il y aura systématiquement échange d'information sur l'innovation. Lorsqu'ils se rencontrent, deux agents déterminent les sujets de conversation (les objets sociaux) à propos desquels ils vont échanger de l'information.

### 6.2.2 Détermination des sujets de communication

La détermination des sujets de communication vise à déterminer quels objets sociaux  $sujets \subset \mathcal{O}$  feront l'objet d'un transfert d'information.

Si le canal qui provoque la communication entre  $A_1$  et  $A_2$  est unidirectionnel, le sujet de la communication est déterminé uniquement par la source de l'information (ligne 10 de l'algorithme 6.1). Par exemple, une publicité impose le ou les objets à propos desquels elle envoie un message. Le récepteur ne dispose d'aucun pouvoir pour orienter le transfert d'information sur un autre sujet. Il peut naturellement couper cette communication (changer de chaîne sur la télévision, tourner la page de publicité d'une revue); cette possibilité est prise en compte dans la probabilité d'exposition de l'individu au canal.

Si le canal est bidirectionnel, ce qui est typiquement le cas d'une conversation interpersonnelle, chaque agent peut amener la conversation sur le ou les sujets de son choix. Nous considérons que tous les sujets de conversation qu'au moins l'un des agents veut aborder seront discutés. L'ensemble des sujets discutés est donc l'union des objets sociaux saillants de chaque agent :  $sujets = Sal^{A_1,t} \cup Sal^{A_2,t}$  (ligne 17 de l'algorithme 6.1). Le même principe s'applique à tout canal bidirectionnel; ainsi, un individu qui est connecté à Internet peut orienter la communication sur un ou plusieurs objets en effectuant des recherches sur des mots-clés, et recevra des informations à ce sujet.

### 6.2.3 Création et transfert des messages

Une fois l'ensemble des objets sociaux discuté  $sujets \in \mathcal{O}$  défini, on traite chaque discussion à propos des objets  $o \in sujets$  indépendamment. Dans le cas d'un canal unidirectionnel, on demande à l'émetteur l'information qu'il désire transmettre à propos de  $o$ , et on la transmet au récepteur (lignes 11 à 14 de l'algorithme 6.1). Dans le cas d'un canal bidirectionnel, nous supposons que cet échange est réciproque, chaque agent transmettant à l'autre ses informations sur  $o$ , indépendamment de ses croyances et de l'état de saillance de cet objet pour l'agent (lignes 18 à 23 de l'algorithme 6.1). Par conséquent, un agent qui possède de l'information mais ne désirait pas en parler pourra être conduit à la transmettre. De même, un agent curieux transmet les informations en sa possession lorsqu'il recherche de l'information.

### 6.2.4 Algorithme d'exposition par les canaux

Une interaction entre agents ne peut avoir lieu, d'après ce protocole, que lorsque les agents se rencontrent grâce à un canal de communication. Comme cela est décrit dans l'algorithme 6.2, à chaque pas de temps dans le modèle, on parcourt l'ensemble des canaux existant dans le modèle et on effectue un tirage aléatoire pour déterminer si ces agents se rencontrent. En cas de rencontre (ligne 4 de 6.2), on utilise l'algorithme 6.1 pour proposer aux agents de discuter sur les sujets de leur choix. Cet algo-

---

**Entrées:**  $\mathcal{L}$  les canaux de communication du modèle

```

1: pour chaque canal  $c = (A_1, A_2, p^{inter}) \in \mathcal{L}$  faire
2:    $random =$  tirage aleatoire uniforme dans  $[0 : 1]$ 
3:   si  $random \leq p^{inter}$  alors
4:      $gererInteraction(A_1, A_2)$  (algorithme 6.1)
5:   fin
6: fin pour

```

---

Algorithme 6.2: Algorithme qui gère la rencontre, ou non, de chaque paire d'agents interconnectés par un canal. Cette fonction *stepChannels* est appelée à chaque pas de temps.

l'algorithme considère tous les canaux de communication comme équivalents, ce qui simplifie l'implémentation du modèle et la construction de statistiques.

Le modèle, tant conceptuel que sa traduction informatique, est basé sur une discrétisation du temps. A l'heure actuelle, nous considérons qu'un pas de temps correspond à une semaine réelle. Comme nous venons de le voir, à chaque pas de temps, l'ensemble des canaux du modèle est parcouru pour offrir aux agents l'opportunité de communiquer. Bien sûr, s'agissant d'un modèle informatique, les agents ne peuvent agir réellement simultanément, mais sont appelés séquentiellement. En l'occurrence, l'ordre dans lequel les canaux sont appelés pourrait influencer les résultats de la simulation, et ce pour deux raisons principales :

- *Si un agent peut modifier son état pendant le pas de temps, il biaise le principe du temps discret* ; il peut ainsi transmettre une information qu'il ne possédait pas en début de pas de temps, et modifier son comportement en fonction des nouvelles informations. Par exemple, si A envoie un message à B, et que B met immédiatement à jour son état en fonction de ce message, B pourra aussitôt transmettre à C une information qu'il a apprise pendant le pas de temps. Il est donc possible qu'une cascade informationnelle A, B, C ait lieu en un unique pas de temps. Dans ce cas, le modèle devient extrêmement sensible à l'ordonnancement des communications ; il devient aussi plus difficile à observer. Nous définissons donc *une file d'attente de messages pour chaque agent*. Pendant le tour, chaque message reçu est accumulé dans cette file d'attente. En fin de tour, une méthode *postStep* est appelée sur chaque agent, pendant laquelle chaque agent traite les messages (dans l'ordre de leur réception), et adapte éventuellement son état interne (croyances). Ainsi, tous les agents interagissent sur la base de leur état en début de pas de temps.
- même en utilisant ce principe, lors du traitement d'informations contenant des croyances contradictoires, *l'ordre dans lequel les messages sont reçus influence la révision de l'état interne*. Ceci est dû au principe de révision des croyances adopté dans le modèle. Cette sensibilité à l'ordre dans lequel les canaux sont parcourus

---

**Entrées:** *fileMessages* la file d'attente des messages reçus pendant le pas de temps par l'agent  
**Entrées:**  $SalSea^{a,t-1}$  et  $SalPro^{a,t-1}$  les ensembles d'objets saillants, avec  $Sal^{a,t-1} = SalPro^{a,t-1} \cup SalSea^{a,t-1}$

- 1: // mise à jour des croyances avec les messages reçus pendant le tour
- 2: **pour** chaque message  $m \in fileMessages$  **faire**
- 3:    $m = filtrerCredibilite(m)$
- 4:   révision des croyances de l'IAN avec  $m$
- 5: **fin pour**
- 6: récupérer la liste des objets  $O^{recents}$  à propos desquels des croyances ont été modifiées
- 7:  $SalSea^{a,t} = \emptyset$
- 8:  $SalPro^{a,t} = \emptyset$
- 9: **pour** chaque objet  $o \in O^{recent} \cap Sal^{a,t-1}$  **faire**
- 10:   construire la représentation activée  $RA_o^{a,t} = (C^{rep}, s)$  avec  $s : C^{rep} \mapsto \sigma$
- 11:    $postStepSaillanceRecherche(RA_o^{a,t})$  (algorithme 6.6)
- 12:    $postStepSaillanceEmission(RA_o^{a,t})$  (algorithme 6.4)
- 13: **fin pour**

---

Algorithme 6.3: Algorithme *postStepAgent* qui gère les messages stockés dans la file d'attente de l'agent, et gère la saillance des objets.

ne peut être évitée. Toutefois, elle est aggravée si les canaux sont toujours testés dans le même ordre, ce qui revient à donner une importance supérieure aux agents appelés les premiers. Nous parcourons donc les canaux de façon aléatoire, en modifiant leur ordre à chaque pas de temps.

## 6.3 Comportement de communication d'un agent-adoptant

### 6.3.1 Réception des messages

Chaque agent possède une liste de messages qui accumule les messages reçus pendant un pas de temps. Ces messages ne sont traités qu'à la fin du pas de temps. Cette étape dite de *post-step* est décrite dans l'algorithme 6.3. Comme cela est visible dans l'algorithme, on analyse pour tous les objets récemment modifiés si cet objet doit devenir saillant pour recherche ou émission d'information.

On notera la présence d'une étape de filtrage de la crédibilité de message (Alg. 6.3, ligne 3). En effet, il est nécessaire de diminuer la crédibilité énoncée par l'émetteur du message en l'adaptant à la perception subjective qu'en a l'agent lui-même. Par exemple, si  $A_1$  transmet à  $A_2$  les informations qu'il a acquises par son expérience personnelle ( $\sigma^{xpdirecte}$ ), cette crédibilité constitue une expérience indirecte pour  $A_2$ . Pour prendre en compte cette diminution de la crédibilité, l'utilisateur fournit une table de filtrage

crédibilité reçue	crédibilité perçue
$\sigma_{publicite}$	$\sigma_{publicite}$
$\sigma_{oui-dire}$	$\sigma_{oui-dire}$
$\sigma_{avis}$	$\sigma_{oui-dire}$
$\sigma_{xp-indirecte}$	$\sigma_{avis}$
$\sigma_{xp-directe}$	$\sigma_{xp-indirecte}$

TAB. 6.1: Exemple de table de filtrage des supports de croyances reçues.

des niveaux de supports  $T\Sigma : \Sigma \mapsto \Sigma$ . La table 6.1 représente un exemple de table de filtrage. On notera qu'une information reçue par ouï-dire ne devient pas une information intéressée, de même qu'une information acquise par la publicité ne peut pas être réduite davantage.

Ce mécanisme semble être compatible avec les observations de terrain en notre possession. Par exemple, les femmes Luo ne croyaient pas les médecins blancs (perçus comme proposant une médecine "pour les blanches"), mais ne faisaient pas davantage confiance au personnel local formé pour éviter cette distance; en effet, ces femmes savaient pertinemment que ce personnel ne faisait que transmettre les informations des médecins.

### 6.3.2 Saillance d'un objet par proactivité

De nombreux paramètres interviennent dans le choix de communiquer proactivement sur une innovation (3.4.3). Nous retiendrons ceux qui peuvent être modélisés sur la base de notre représentation des croyances, qui peuvent être collectés sur le terrain et paramétrés. Ces contraintes nous obligent à éliminer plusieurs des facteurs influençant l'émission d'informations. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de l'adaptation à l'interlocuteur (parler de ce qui l'intéresse, ou ne pas lui parler d'un sujet qui ne l'intéresse pas). Il est également inutile de discriminer entre les communications liées au vécu personnel ou à la volonté de sociabiliser, ces facteurs étant difficiles à décrire, et trop différents d'une innovation à une autre.

Pour simplifier, nous définissons qu'un objet devient saillant en fonction des motivations de l'agent et de ses croyances sur l'innovation. Un objet  $o$  deviendra saillant pour émission proactive sur la base des croyances et de leurs crédibilités, récupérées par l'activation de représentation  $RA_o^{a,t}$  décrite plus haut (5.3.2). Afin de pouvoir s'adapter à différents cas de figure, la fonction qui détermine la volonté de parler d'un objet est définie par une fonction fournie en paramètre :  $f^{proactive} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$ . Cette fonction retourne une valeur Booléenne (vrai ou faux) indiquant si le sujet désire ou non, sur la base de ses intérêts, parler de l'innovation. Elle peut être une évaluation multicritères de l'innovation, basée sur des préférences associées aux différents concepts. Le processus de détermination de saillance est décrit dans l'algorithme 6.4. Nous présenterons plusieurs exemples de fonctions d'évaluation dans la partie expérimentation (7). Nous

---

**Entrées:**  $SalSea^{a,t-1}$  et  $SalPro^{a,t-1}$  les ensembles d'objets saillants, avec  $Sal^{a,t-1} = SalPro^{a,t-1} \cup SalSea^{a,t-1}$

**Entrées:**  $finEmission : \mathcal{O} \mapsto \mathbb{N}$  la table qui mémorise pour chaque objet le moment où l'on doit arrêter d'émettre de l'information (infini par défaut)

**Entrées:**  $pasCourant$  le pas de temps actuel (entier positif)

**Entrées:**  $d^{proactif}$  la durée maximale d'émission d'information

```

1: si  $o \notin SalSea^{a,t}$  alors
2:   // on ne recherche pas d'information sur  $o$ 
3:   si  $f^{proactive}(RA_o^{a,t}) = vrai$  alors
4:     // l'agent apprécie l'objet et veut émettre de l'information sur  $o$ 
5:     si  $finEmission(o) = \infty$  alors
6:       // on commence à émettre de l'information pour  $o$ 
7:       ajouter  $o$  à  $SalPro^{a,t}$ 
8:        $finEmission(o) = pasCourant + d^{proactif}$ 
9:     sinon si  $finEmission(o) \geq pasCourant$  alors
10:      // on continue à émettre de l'information pour  $o$ 
11:      ajouter  $o$  à  $SalPro^{a,t}$ 
12:     sinon
13:      // on a déjà émis de l'information sur  $o$ 
14:     finsi
15:   finsi
16:
17: finsi

```

---

Algorithme 6.4: Algorithme *postStepSaillanceEmission* qui gère la saillance des objets sociaux pour un agent  $a$  après révision des croyances, à la fin d'un pas de temps.

examinerons également le cas d'une fonction plus complexe qui intègre la satisfaction ou la dissatisfaction pour un produit.

Il serait irréaliste d'imaginer un individu parlant de façon incessante d'un même sujet qui l'intéresse. Un objet social cesse d'être saillant après un nombre donné de pas de temps  $d^{proactif}$ . Ce paramètre du modèle est défini pour l'ensemble de la population, faute d'information quantitative détaillée sur ce paramètre.

### 6.3.3 Saillance d'un objet pour rechercher de l'information

Les observations sur la recherche d'information (3.4.4) peuvent être décrites sur la seule base du support des croyances et des motivations de l'individu, déjà présents dans le modèle. Un agent peut rechercher de l'information par curiosité, parce que l'un des attributs présents dans la représentation activée l'intéresse. Cet intérêt est calculé par la fonction  $f^{curiosite} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$ . Cette fonction booléenne, fournie en paramètre pour chaque segment d'adoptants potentiels, est définie sur la base de l'expertise de

---

**Entrées:**  $C^{valeur} \subset \mathcal{C}$  les concepts que l'agent utilise pour évaluer une innovation  
**Entrées:**  $\sigma^{min} \in \Sigma$  le seuil requis pour arrêter de rechercher de l'information  
**Entrées:**  $RA_o^{a,t} = (C^{rep}, s)$  avec  $s : C^{rep} \mapsto \sigma$  la représentation activée de  $a$  pour  $o$

```

1: pour chaque concept  $C \in C^{rep} \cap C^{valeur}$  faire
2:   si  $s(C) < \sigma^{min}$  alors
3:     // ce concept nécessite encore vérification, sa crédibilité n'est pas suffisante
4:     retourner faux et sortir
5:   fin si
6: fin pour
7: retourner vrai

```

---

Algorithme 6.5: Algorithme *informationSuffisante*( $R_o^{a,t}$ )

---

**Entrées:**  $RA_o^{a,t}$  la représentation activée de l'objet  $o$   
**Entrées:**  $C^{valeur} \subset \mathcal{C}$  les concepts que l'agent utilise pour évaluer une innovation  
**Entrées:**  $\sigma^{min} \in \Sigma$  le seuil requis pour arrêter de rechercher de l'information  
**Entrées:**  $SalSea^{a,t-1}$  l'ensemble d'objets saillants pour recherche d'information  
**Entrées:**  $finDeRecherche : \mathcal{O} \mapsto \mathbb{N}$  la table qui mémorise pour chaque objet le moment où l'on doit arrêter de rechercher de l'information (infini par défaut)  
**Entrées:**  $pasCourant$  le pas de temps actuel (entier positif)  
**Entrées:**  $d^{recherche}$  la durée maximale de recherche d'information  
**Entrées:**  $fcuriosite : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$

```

1: si  $fcuriosite(RA_o^{a,t})$  et  $informationSuffisante(R_o^{a,t}) = faux$  alors
2:   // l'information sur  $o$  est insuffisante, on recherche de l'information à son sujet
3:   si  $finDeRecherche(o) = \infty$  alors
4:     // on commence à chercher de l'information pour  $o$ 
5:     ajouter  $o$  à  $SalSea^{a,t}$ 
6:      $finDeRecherche(o) = pasCourant + d^{recherche}$ 
7:   sinon si  $finDeRecherche(o) \geq pasCourant$  alors
8:     // on continue à chercher de l'information pour  $o$ 
9:     ajouter  $o$  à  $SalSea^{a,t}$ 
10:  sinon
11:    // on ne recherchera plus d'information pour  $o$ , même si l'information est insuffisante
12:  fin si
13: fin si

```

---

Algorithme 6.6: Algorithme *postStepSaillanceRecherche*( $RA_o^{a,t}$ ) qui détermine si un objet  $o$  doit devenir saillant pour recherche d'information.

l'utilisateur du modèle ("les technophiles se renseignent sur tous les nouveaux produits"), sur la base d'observations qualitatives générales (on sait par exemple que les jeunes asiatiques s'intéressent à des thèmes comme le divertissement, le sport ou le glamour [Knight et Chapman, 2004]) ou sur des observations collectées pour une diffusion donnée.

Cette recherche d'information s'effectue tant que l'individu n'a pas trouvé d'information suffisamment crédible, de son point de vue, pour lever l'incertitude sur ces attributs (voir algorithme 6.6). Conformément aux observations de Rogers, nous définissons un seuil  $\sigma_a^{min} \in \Sigma$  qui décrit la crédibilité à atteindre pendant la recherche d'information, seuil qui peut varier selon les agents.

La recherche d'information s'arrête si l'individu a obtenu des informations d'une crédibilité suffisante pour les attributs qui l'intéressent. Toutefois, il est peu réaliste de définir une recherche d'information infinie pour un individu ; selon les caractéristiques de l'innovation, une lassitude ou un oubli peut intervenir après quelque temps. Nous définissons donc un nombre de pas  $d^{recherche}$  au delà duquel l'agent cesse de rechercher de l'information.

Le processus complet de début et fin de saillance d'un objet social en fonction de ces paramètres est décrit dans les algorithmes 6.5 et 6.6. Il découle de ce processus qu'un agent qui n'a d'intérêt pour aucun des concepts qu'il possède sur un objet ne recherchera pas d'information (pas de curiosité). Un agent intéressé par un objet, parce qu'il accorde de l'intérêt pour l'un des concepts liés, recherchera de l'information jusqu'à obtenir la certitude recherchée sur les qualités ou défauts possibles de l'objet, ou jusqu'à se lasser de cette recherche.

### 6.3.4 Etats communicationnels

Les états communicationnels d'un agent vis-à-vis d'un objet  $o \in \mathcal{O}$  dépendent des listes d'objets saillants. A l'instant  $t$ , un agent est dit en recherche d'information si  $o \in SalSea^{a,t}$ , émetteur proactif si  $o \in SalPro^{a,t}$ , et neutre si  $o \notin Sal^{a,t}$ . L

### 6.3.5 Décision ou évaluation basée sur les représentations

Comme dans la *Means-end Chains Theory*, nous partons du principe qu'une innovation est évaluée pour ce qu'elle permet de faire et non pour ce qu'elle est. L'évaluation de l'innovation porte donc sur les niveaux les plus hauts des chaînes de croyance. L'évaluation de l'innovation est donc doublement subjective, car elle repose sur des croyances potentiellement fausses et des préférences et motivations personnelles.

L'étape d'évaluation d'une offre est une problématique de jugement et de décision qui ne constitue pas le coeur de notre travail de recherche, malgré de précédentes investigations à ce sujet [Kant et Thiriot, 2006, Thiriot et Kant, 2006]. Un modèle de décision doit correspondre au type de décision requis par l'innovation ; on sait qu'un

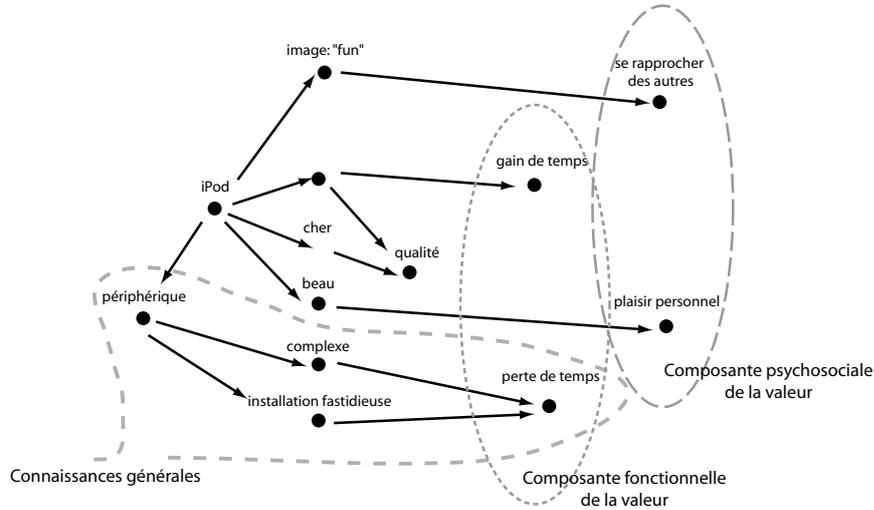


FIG. 6.1: Evaluation d'une innovation sur un réseau de croyances associatif

sujet fortement engagé envers une offre utilise un processus cognitif délibératif, tandis qu'une décision de moindre importance sera prise par un processus plus simple et plus approximatif [Engel *et al.*, 1995b]. Dans le cas où l'on étudie le choix entre plusieurs innovations, la décision doit être basée sur un modèle de choix adapté. Par ailleurs, le modèle de décision doit être choisi en fonction des données collectables sur ce processus de décision. Un modèle très détaillé, qui tiendrait compte de l'aversion au risque d'un décideur, ne pourrait pas être paramétré à l'échelle d'une population. A ce stade, nous proposons donc une formalisation très simple basée sur une fonction d'évaluation multicritères, qui peut être remplacée au gré des informations disponibles et spécificités d'une innovation.

Nous supposons l'existence du paramètre  $f^{adopt} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$ , fonction de décision multicritères qui utilise une représentation activée pour décider de l'adoption ou du rejet ; elle est appelée après l'évaluation de la saillance des objets récemment, uniquement si  $information.Suffisante(R_o^{a,t})$  est vraie. Cette fonction d'évaluation se base sur un ensemble de concepts  $C^{valeur} \subset \mathcal{C}$ , qui sont utilisés pour évaluer l'innovation. Nous retiendrons pour l'instant une évaluation multi-critères simple par somme pondérée, telle qu'elle est couramment utilisée en marketing, qui effectue une agrégation sur des concepts pondérés par des poids propres aux préférences de chaque individu ou segment d'individus. Nous verrons dans la partie expérimentation des exemples de fonction d'évaluation.

Comme cela avait été remarqué dans le MCT, en évaluant une innovation en se reposant sur les niveaux de croyance situés en bout de chaîne de croyance, on représente implicitement la compréhension (un lien est présent entre l'attribut et la motivation) ou l'incompréhension (absence de lien).

## 6.4 Résumé

paramètre	notation
<b>population</b> agents adoptants taille de la population agents exogènes <i>(ensemble des agents)</i>	$\mathcal{A}^{adopt}$ $ \mathcal{A}^{adopt} $ $\mathcal{A}^{exo}$ $\mathcal{A} = \mathcal{A}^{adopt} \cup \mathcal{A}^{exo}$
<b>segments</b> segments  proportion de chaque segment	$\mathcal{S} = \{s_1 \dots s_n\}$ , tels que $\forall s \in \mathcal{S}, s \subset \mathcal{A}^{adopt}$ et $\bigcup_{s \in \mathcal{S}} = \mathcal{A}^{adopt}$ $\forall s \in \mathcal{S}, prop^s \in [0, 1]$ (si les segments sont exclusifs : $\sum_{s \in \mathcal{S}} prop^s = 1$ )
<b>structure des interactions interpersonnelles</b> structure des interactions probabilité d'interaction interpersonnelle	$(\mathcal{A}^{adopt}, L^{inter})$ uniforme ( $p^{interact} \in [0, 1]$ ) ou associée à chaque lien $(p^{interact} : L^{inter} \mapsto [0, 1])$
<b>comportement de communication</b> temps de proactivité temps de recherche d'information crédibilité nécessaire pour évaluation fonction d'émission proactive d'information fonction de recherche d'information	$d^{proactif}$ $d^{recherche}$ $\forall S \in \mathcal{S}, \sigma_{adoption}^{min} \in \Sigma$ $\forall S \in \mathcal{S}, f^{proactive, S} : RA^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$ $\forall S \in \mathcal{S}, f^{curiosite, S} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$
<b>adoption (facultatif)</b> fonction de décision ensemble des concepts sur lesquels se base la fonction de décision	$f^{adopt} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$ $C^{valeur} \subset \mathcal{C}$

TAB. 6.2: Paramètres de communication du modèle CoBAN.

Ce modèle de communication décrit la rencontre des agents interconnectés par des canaux. En fonction de la probabilité d'exposition définie pour le canal, les agents se rencontrent, ou non. Si c'est le cas, on leur donne la possibilité d'interagir sur les sujets de leur choix, décrits par des ensembles d'objets saillants. La saillance peut naître pour rechercher de l'information ou en émettre proactivement. Quoiqu'il arrive, on considère que les agents échangent toutes leurs croyances liés à l'objet. Les paramètres de communication sont décrits dans le tableau 6.2.

## Chapitre 7

# Expérimentations avec le modèle CoBAN

### Avant-propos

Le but des expérimentations avec le modèle CoBAN est triple. Tout d'abord, nous cherchons à comprendre la **sensibilité du modèle à ses paramètres**. Parallèlement, les expérimentations permettent d'**illustrer les phénomènes descriptibles** dans CoBAN. Quand cela est possible, nous analyserons les **conclusions que l'on peut tirer de ces simulations pour la diffusion d'innovations et le marketing viral**. Ces expérimentations nous permettent également de valider certains de nos choix de modélisation, en vérifiant que le choix des paramètres est judicieux, et jouent effectivement le rôle attendu dans le processus collectif.

Les paramètres du modèle sont rassemblés dans le tableau 7.1. Ces paramètres étant relativement nombreux, il est difficile de réaliser une exploration automatique de l'espace des paramètres du type analyse de sensibilité. D'ailleurs, plusieurs paramètres sont qualitatifs - comme le contenu du message institutionnel - et ne peuvent être choisis qu'en déterminant des scénarios de diffusion d'innovations. Nous lui substituons une exploration progressive de l'effet de chacun des paramètres sur le modèle. Dans un premier temps (7.2), nous étudierons l'impact des principaux paramètres de communication : recherche et émission proactive d'information, et impact de la structure d'interactions. L'adoption plus ou moins tardive de différents segments, telle que proposée par Rogers, sera ensuite explorée (7.3 p. 159) en testant différents facteurs explicatifs (entre autres, motivations de chaque segment et existence de croyances préalables). Enfin, nous illustrerons le gain de pouvoir descriptif apporté par nos choix de modélisation en simulant la diffusion d'innovations liées et le marketing événementiel (7.4 p. 184).

### 7.1 Implémentation

Le modèle CoBAN a été implémenté en Java, en utilisant la plateforme RePast [North *et al.*, 2005]. Java est un langage orienté objets dont la lisibilité et la simplicité

paramètre	notation
<b>population</b> agents adoptants taille de la population agents exogènes <i>(ensemble des agents)</i>	$\mathcal{A}^{adopt}$ $ \mathcal{A}^{adopt} $ $\mathcal{A}^{exo}$ $\mathcal{A} = \mathcal{A}^{adopt} \cup \mathcal{A}^{exo}$
<b>segments</b> segments proportion de chaque segment	$\mathcal{S} = \{s_1 \dots s_n\}$ , tels que $\forall s \in \mathcal{S}, s \subset \mathcal{A}^{adopt}$ et $\bigcup_{s \in \mathcal{S}} = \mathcal{A}^{adopt}$ $\forall s \in \mathcal{S}, prop^s \in [0, 1]$ (si les segments sont exclusifs : $\sum_{s \in \mathcal{S}} prop^s = 1$ )
<b>croyances</b> concepts représentés objets sociaux niveaux de support table de filtrage probabilité de révision perception subjective	$\mathcal{C}$ $\mathcal{O} \subset \mathcal{C}$ $\Sigma$ $T\Sigma : \Sigma \mapsto \Sigma$ $f^{revision}(\sigma^{old}, \sigma^{new}) : \Sigma, \Sigma \mapsto [0, 1]$ $f^{filtrage}(\sigma^{recu}) : \Sigma \mapsto \Sigma$
<b>informations exogènes</b> croyances préalables de chaque segment message envoyé par les agents exogènes probabilité d'exposition de chaque segment à chaque source exogène	$\forall s \in \mathcal{S}, \forall a \in s, IAN^{a,0}$ réseau associatif (généralement une représentation d'objet) $\forall s \in \mathcal{S}, \forall a \in \mathcal{A}^{exo}, p^{exp,a,S} \in [0, 1]$
<b>structure des interactions interpersonnelles</b> structure des interactions probabilité d'interaction interpersonnelle	$(\mathcal{A}^{adopt}, L^{inter})$ uniforme ( $p^{interact} \in [0, 1]$ ) ou associée à chaque lien $(p^{interact} : L^{inter} \mapsto [0, 1])$
<b>comportement de communication</b> temps de proactivité temps de recherche d'information crédibilité nécessaire pour évaluation fonction d'émission proactive d'information fonction de recherche d'information	$d^{proactif}$ $d^{recherche}$ $\forall S \in \mathcal{S}, \sigma_{adoption}^{min} \in \Sigma$ $\forall S \in \mathcal{S}, f^{proactive,S} : RA^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$ $\forall S \in \mathcal{S}, f^{curiosite,S} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$

TAB. 7.1: Vue d'ensemble des paramètres du modèle CoBAN.

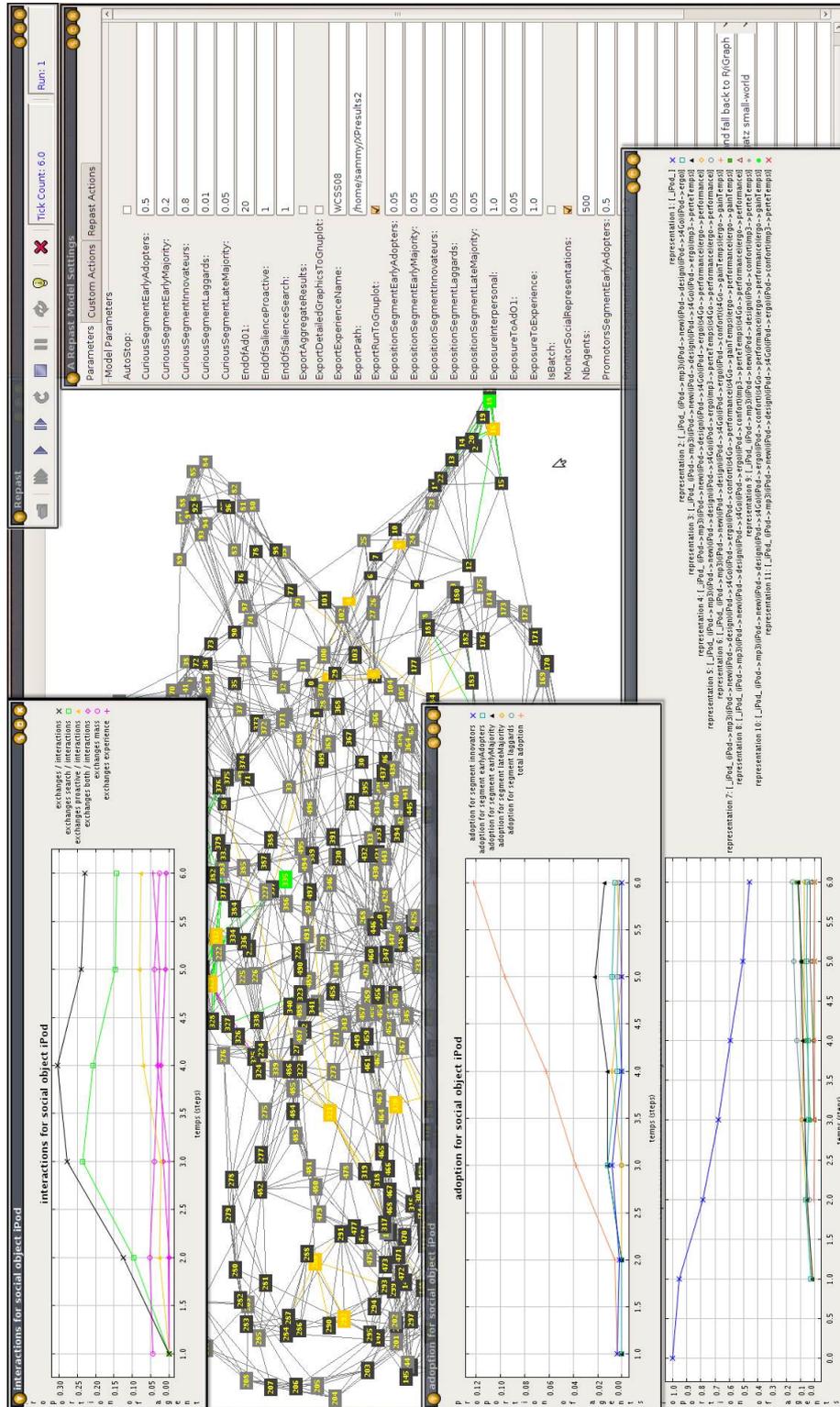
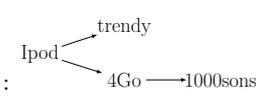


FIG. 7.1: Capture d'écran du logiciel implémentant le modèle CoBAN. Les agents situés sur le réseau d'interaction sont visibles en arrière-plan. La fenêtre de droite contient les paramètres du modèle. Les graphiques à gauche de l'écran affichent (de haut en bas) les statistiques sur les interactions, l'adoption et les représentations sociales.

facilitent la détection des erreurs et leur correction. L'approche objet permet de conserver dans l'implémentation les concepts du modèle théorique. Notre logiciel décrit donc les agents indépendants, leurs IANs, leurs croyances sous forme de réseau, les liens qui les relient, etc. (le code contient une vingtaine de classes de base, une centaine de classes héritées précisant les comportements des agents pour chaque simulation, ainsi qu'une cinquantaine de classes utilisées pour les interfaces graphiques). Nous avons d'ailleurs utilisé extensivement la méthodologie dite d'*eXtreme Programming*, qui impose la réalisation de nombreux tests au fil du développement. Plusieurs implémentations ont été réalisées - en règle générale, une réimplémentation avant chaque publication - afin de vérifier l'absence d'erreur. De façon générale, nous avons pu constater qu'une expérience en programmation permet un gain de temps considérable dans la description du modèle, et surtout permet de réaliser une description élégante et sûre du modèle théorique.

RePast n'est pas une plateforme à proprement parler, mais plutôt un ensemble de bibliothèques censées faciliter la conception d'interfaces graphiques pour des modèles, sans contrainte sur la structure du modèle elle-même. Afin de conserver une parfaite maîtrise du modèle développé, nous avons ignoré la plupart des fonctionnalités de RePast ; ainsi l'ordonnancement des agents a-t-il été développé par nos soins, ainsi que les appels au générateur de nombres aléatoires (uniforme). Le gain de temps est sans doute réel, bien que certains choix conceptuels de Repast, associés à l'obsolescence de la documentation, trouble parfois la sérénité nécessaire à l'expérimentation. Plusieurs outils de visualisation ont été conçus (voir figure 7.1). La *vue de la population* permet de d'observer la population positionnée sur le réseau social, avec (au choix) l'état communicationnel de l'agent ou la représentation sociale qu'il possède. Pour chaque objet social introduit dans le modèle, on peut également visualiser et/ou exporter les statistiques liées aux interactions, aux représentations sociales et à l'adoption. Une *fenêtre de paramètres* permet de les éditer facilement, rendant la manipulation aisée. L'exploration de l'espace des paramètres a été réalisée en répartissant les calculs sur quelques dizaines de machines, chacune chargée d'explorer une partie de cet espace.

En réalité, l'élaboration du modèle est un processus itératif entre l'élaboration du modèle conceptuel et sa formalisation computationnelle. Nous retenons essentiellement du processus d'implémentation qu'il constitue un langage à part entière, qui fait parfois apparaître des insuffisances ou contradictions passées inaperçues dans le modèle théorique. Notons que, sauf mention spécifique, le modèle n'est pas sensible aux choix d'implémentation ; par exemple, le test de plusieurs générateurs de nombres aléatoires (uniformes) s'est avéré sans impact.

paramètre	valeur
<b>population</b> taille de la population agents exogènes	$ \mathcal{A}^{adopt}  = 5000$ $\mathcal{A}^{exo} = (\text{publicite})$
<b>segments</b> segments proportion de chaque segment	$\mathcal{S} = \{\text{promoteurs}, \text{neutres}\}$ $p^{\text{promoteurs}} \in [0, 1]$
<b>croyanances</b> concepts représentés objets sociaux niveaux de support probabilité de révision perception subjective	$\mathcal{C} = \{\text{iPod}, \text{4Go}, \text{trendy}, \text{1000sons}\}$ $\mathcal{O} = \{\text{iPod}\}$ $\Sigma = \{\emptyset\}$ (ignoré) (ignoré) (ignoré)
<b>informations exogènes</b>  message envoyé par l'agent publicité probabilité d'exposition à la publicité durée de la campagne publicitaire	 $TAN^{pub} :$ $p^{pub} = 0.05$ (homogène)  5 pas de temps
<b>structure des interactions interpersonnelles</b> structure des interactions probabilité d'interaction interpersonnelle	générateur de Watts-Strogatz ou Barabasi-Albert uniforme et systématique : $p^{interact} = 1$
<b>comportement de communication</b> temps de proactivité temps de recherche d'information fonction d'émission proactive d'information pour les promoteurs	$d^{proactif} = 1$ $d^{recherche} = 1$ $f^{proactivite}(RA_o^{a,t}) = (1000sons \in RA_o^{a,t})$

TAB. 7.2: Paramètres du modèle utilisés pour l'analyse d'impact des paramètres sur la dynamique d'information.

## 7.2 Expériences sur la dynamique d'information

**Objectif : comprendre l'influence des paramètres de communication**

### 7.2.1 Modèle épidémique pur : communication proactive et médias de masse

Supposons qu'une institution assure la promotion de son innovation par une campagne de masse de 5 semaines. Certains individus de la population seront intéressés par cette information et en parleront proactivement autour d'eux. Ce flux d'information en deux temps, du canal de masse à l'individu, puis d'un individu à un autre, est celui décrit par le *two-steps flow model* (cf. p. 37). L'institution, ou l'entreprise, aimerait prévoir quelle proportion de la population sera finalement atteinte par cette information. On sait que les individus relayeront les informations qui les intéressent ; cette communication proactive est donc motivée. Ce point de vue simpliste correspond à l'approche purement épidémique de l'information (4.3). Il nous permet d'introduire les

graphiques et le cas d'étude qui supportera les expériences suivantes, tout en vérifiant que le modèle peut effectivement se comporter comme un modèle épidémique.

Afin de faciliter la compréhension des expériences qui suivent, nous illustrerons nos études abstraites du modèle par des informations et croyances stylisées liées à l'iPod (lecteur de musique portable proposé par l'entreprise Apple). Ces informations ne visent pas au réalisme, et sont uniquement utilisées à titre illustratif. On pourrait les remplacer par des croyances et informations sur d'autres produits et innovations. Dans cette expérience, nous supposons que l'information propagée par les médias est le  $TAN^{pub}$  présenté dans le tableau 7.2. Cette information se lirait : "l'iPod est à la mode, et permet de stocker 4 giga-octets de données, ce qui permet de mémoriser 1000 morceaux de musique". Le canal de masse est idéalisé dans cette expérience; c'est un agent-émetteur exogène qui émet proactivement cette information pendant 5 pas de temps, correspondant aux cinq semaines de campagne publicitaire. L'information est envoyée indifféremment à tous les agents de la population, avec une probabilité d'exposition de  $p^{pub} = 0.05$  (chaque agent, à chaque pas de temps, a 5% de chances de recevoir l'information envoyée par le canal de masse).

Certains consommateurs seront enthousiasmés par la grande capacité de stockage de l'iPod, et en parleront proactivement autour d'eux. Ces consommateurs enthousiastes seront représentés par les *agents promoteurs*, en proportion  $p^{promoteurs}$  dans la population. La fonction d'émission proactive des agents promoteurs  $f^{promoteurs} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$  est donc définie par  $f^{proactivite}(RA_o^{a,t}) = (1000sons \in RA_o^{a,t})$ , tandis que les agents non proactifs ont pour fonction  $f^{proactivite}(RA_o^{a,t}) = faux$ . Les paramètres sont résumés dans le tableau 7.2. Dans ce cas simple, nous négligeons le canal d'expérience, les croyances préalables des agents, ainsi que la crédibilité des croyances. La structure des interactions interpersonnelles est générée par l'algorithme de Watts-Strogatz avec un degré moyen de 8 (chaque individu est connecté à environ huit voisins).

### Exemple de diffusion

La figure 7.2 représente un exemple de simulation basé sur ce paramétrage purement épidémique du modèle, avec une proportion de promoteurs de 20% ( $p^{promoteurs} = 0.2$ ). Les échanges d'information dans le modèle, représentés par les courbes pointillées, sont normalisés par le nombre d'agents. Conformément au paramétrage, les échanges interpersonnels sont uniquement dûs aux interactions proactives portées par les agents promoteurs. La campagne de publicité dure 5 pas de temps, et atteint bien la valeur 5% des agents à chaque tour, cette proportion décroissant légèrement pendant la campagne, puisque la publicité atteint des personnes possédant déjà l'information. Les courbes pleines représentent la proportion d'agents qui possèdent chacune des représentations affichées à droite de la figure. Etant donné la simplicité du paramétrage, seules deux représentations sociales apparaissent dans le modèle : la représentation vide R1, qui correspond à l'absence totale d'information, et la représentation R3 correspondant à l'information reçue par la publicité.

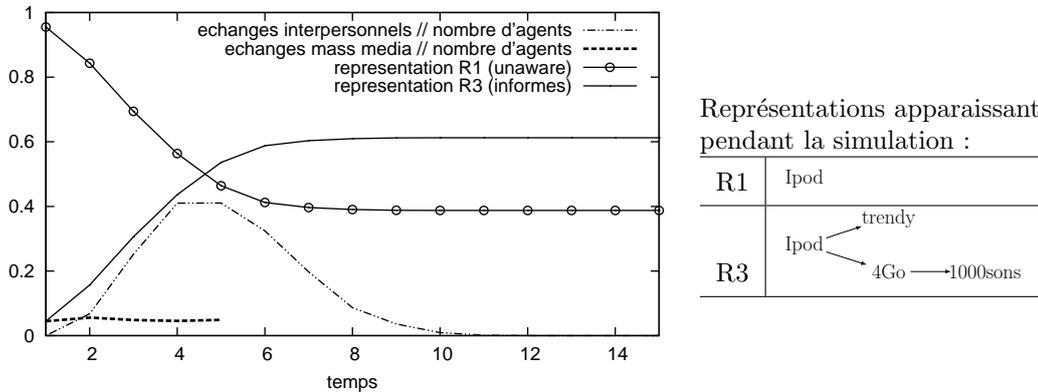


FIG. 7.2: Exemple représentatif de simulation de diffusion purement épidémique d'information, avec 20% de promoteurs, dans une population de 5 000 agents. Les représentations sociales apparaissant dans le modèle sont décrites à droite.

### Impact du nombre de promoteurs sur la dynamique épidémique

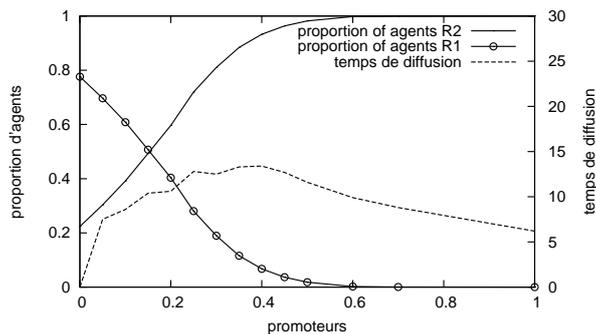


FIG. 7.3: Proportion d'agents détenant chaque représentation à la fin de la simulation, pour différentes proportions de promoteurs ( $p^{\text{promoteurs}} \in [0 : 1]$ ).

L'institution s'intéresse principalement au résultat final de la diffusion d'information créée par sa publicité et les interactions interpersonnelles. La figure 7.3 représente la proportion finale d'agents détenant les représentations R1 et R3 à la fin de la simulation. Quand il n'existe pas de promoteurs ( $p^{\text{promoteurs}} = 0$ ), aucun agent ne relaie l'information ; la proportion d'agents détenant l'information à la fin de la simulation correspond à ceux qui ont été exposés à la publicité. Toutefois, une petite augmentation de ce nombre de promoteurs correspond à une rapide augmentation du nombre d'agents informés. On observe un effet de seuil épidémique déjà identifié lors de précédentes études sur l'approche épidémique (4.3) : avec  $p^{\text{promoteurs}} \sim 0.4$ , 90% de la population est déjà atteinte. Avec  $p^{\text{promoteurs}} \geq 0.6$ , toute la population est informée.

On observe sur la même figure 7.3 que la durée de la diffusion interpersonnelle d'information dépend également de cette proportion d'agents promoteurs. Quand celle-ci est petite, le temps de diffusion est court, puisqu'il n'existe que de rares et petites cascades informationnelles, dont la durée demeure limitée. Lorsque  $p^{\text{promoteurs}} \sim 0.4$ , le temps de diffusion est maximal, puisqu'il existe suffisamment de promoteurs pour créer de longues cascades d'information, et suffisamment peu pour que les cascades d'information soient en nombre limité et nécessitent plusieurs étapes pour atteindre la population. Par contre, lorsque  $p^{\text{promoteurs}} > 0.6$ , le nombre de promoteurs est suffisamment important pour que les agents informés par la publicité dans la population créent chacun des cascades locales qui seront relayées par leurs proches. Dans ce cas, les cascades sont nombreuses et demeurent locales, puisqu'elles rencontrent rapidement des agents déjà informés par une autre cascade.

### Influence de la structure d'interactions sur la dynamique épidémique

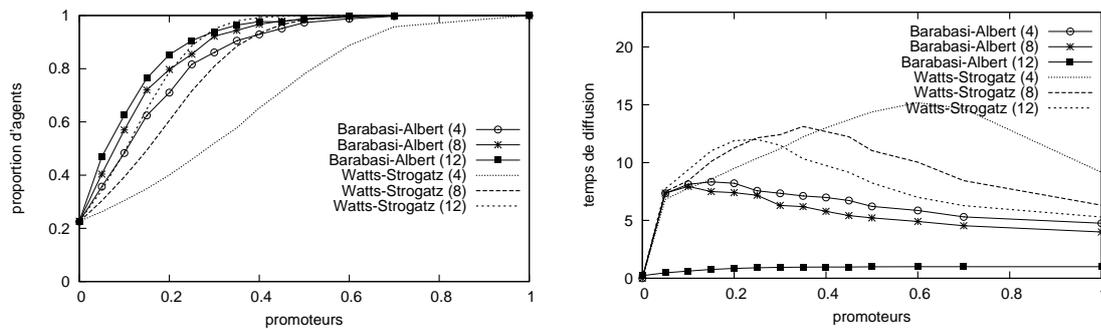


FIG. 7.4: Proportion d'agents possédant de l'information à l'issue de la diffusion (*gauche*) et durée de diffusion (*droite*), pour différentes proportions de promoteurs et différents générateurs de réseaux d'interaction.

La figure 7.4 présente le résultat de la diffusion épidémique en utilisant différents générateurs de réseaux d'interaction. L'algorithme de Watts-Strogatz génère des "réseaux sociaux" dont le *clustering* est élevé (il existe des groupes fortement interconnectés) avec un chemin moyen entre deux agents relativement stable (la distance moyenne entre deux agents est d'environ 5 ici). Ce générateur est paramétré dans sa zone de transition (cf. page 201), avec des degrés individuels moyens de 4, 8 et 12 qui font directement varier la densité du réseau. Le générateur de Barabasi-Albert crée des réseaux par attachement préférentiel, dans lesquels les noeuds du réseau ont une répartition de degré de connectivité en loi de puissance (quelques individus sont connectés à de nombreux voisins, tandis que la plupart sont connectés à peu de voisins).

Sans surprise, les seuils épidémiques varient fortement sur ces réseaux. En général, plus le réseau est dense, plus la diffusion est probable pour une même proportion de

promoteurs. A densité égale, la diffusion est plus importante sur les réseaux BA que sur les réseaux WS ; en effet, dans ces réseaux, un noeud à forte connectivité touche un grand nombre de personnes. Le temps de diffusion (figure 7.4 (à droite)) varie également avec la densité du réseau social. Le temps de diffusion est cette fois nettement plus réduit sur un réseau BA. *La structure d'interactions a donc un impact non négligeable sur la diffusion, tant en terme de proportion de la population finalement atteinte que pour la durée de diffusion.*

### Apport pour l'institution

Le seuil sur  $p^{promoteurs}$  constitue une limite importante de la diffusion épidémique. Il est rare qu'une innovation ou un produit motive plus de 30% des adoptants/consommateurs. Ce seuil est pourtant déterminé sur un réseau social dans lequel chaque agent est connecté à environ 8 personnes. Or, en situation réelle, il est peu probable que les individus potentiellement intéressés par une innovation discutent avec autant d'interlocuteurs. Il est donc probable que la diffusion se situe avant, ou au mieux, dans la zone de transition. Ce résultat est parfaitement compatible avec la réalité : il est rare que l'information sur un produit se diffuse spontanément dans toute la population. Par la suite, nous prêterons donc une attention particulière à cette zone de transition.

### 7.2.2 Compréhension de l'information institutionnelle et proactivité

paramètre	valeur
<b>segments</b>	
segments	$\mathcal{S} = \{promoteurs, experts, neutres\}$
proportion de chaque segment	$p^{promoteurs} \in [0, 1], p^{experts} \in [0, 1]$ (non exclusifs)
<b>informations exogènes</b>	
croyances préalables des agents experts	$\forall a \in S^{experts}, IAN^{a,t_0} = (\text{stockage}=4\text{Go} \rightarrow \text{stocker } 1000 \text{ morceaux})$

TAB. 7.3: Paramètres du modèle utilisés pour l'analyse d'impact des paramètres sur la dynamique d'information. Seuls les paramètres modifiés par rapport au tableau 7.2 sont représentés.

La diffusion purement épidémique est une simplification importante ; dans la réalité, Rogers souligne que *les informations institutionnelles peuvent être incomprises*. Ainsi, les paysans de Los Molinas ne pouvaient pas comprendre l'intérêt de faire bouillir de l'eau pour tuer les microbes, le sens du concept "microbe" leur étant inconnu. De façon stylisée, la situation peut être considérée comme l'envoi d'une information incomplète, que seule une partie de la population sera capable de comprendre. A l'évidence, seules les personnes comprenant l'information seront susceptibles de parler proactivement de l'objet social. La propagation proactive de l'information dépend donc de la motivation à transmettre l'information, mais également des croyances liées à l'objet social.

Reprenons le scénario précédent, en supposant cette fois que l’institution qui lance le produit envoie une information qui n’est pas comprise par l’ensemble de la population, par besoin de condenser la densité d’informations transmises par la publicité ou par une mauvaise évaluation des croyances des consommateurs préalable à la campagne de publicité. L’essentiel du scénario demeure identique : campagne de publicité de cinq semaines, exposition uniforme des agents à la publicité  $p^{pub} = 0.05$ , structure du réseau d’interactions (voir tableau 7.3). Cette fois, l’information envoyée par la publicité (tableau 7.3) se limite à : “l’iPod est à la mode, et permet de stocker 4 gigaoctets de données”. Comme précédemment, les agents promoteurs sont enthousiasmés par la capacité de stockage de “1000 sons” de ce produit ; mais seule une partie de la population détient l’information “4Go permettent de stocker 1000 sons”. Ces consommateurs seront représentés dans la population par des *agents experts*, dont la base de croyance est initialisée avec la croyance (4Go, 1000sons), tandis que l’IAN des agents non-experts est vide au début de la simulation. Ces agents experts sont en proportion  $p^{experts} \in [0 : 1]$ . Notons que les propriétés d’expertise et de proactivité sont considérées comme indépendantes. Lors de l’initialisation du modèle, chaque agent a une probabilité  $p^{experts}$  d’être expert et  $p^{promoteurs}$  d’être promoteur, ces tirages aléatoires étant indépendants. La proportion d’agents à la fois promoteurs et experts est donc statistiquement  $p^{promoteurs} * p^{experts}$ .

Contrairement au paramétrage épidémique, nous faisons intervenir ici à la fois compréhension et motivation à transmettre l’information. Les agents experts (créés en proportion  $p^{experts}$ ) comprennent la publicité. Pour leur part, les agents promoteurs ont la motivation à parler de cet objet, à condition de comprendre l’information provenant de la publicité. L’émission proactive d’information ne peut donc intervenir que quand un agent détient la connaissance *et* la motivation. Lors de l’initialisation, la proportion d’agents à la fois motivés et experts est  $p^{promoteurs} * p^{experts}$ . Ces agents, en recevant l’information partielle transmise par la publicité, comprennent ses avantages et transmettent l’information. Ils peuvent la propager à des agents promoteurs qui la transmettront également proactivement, qu’ils aient précédemment reçu la publicité sans disposer de l’expertise (non-experts) ou qu’ils soient experts mais n’aient pas reçu la publicité. Ils peuvent également la transmettre à des agents qui ne seront pas promoteurs, mais qui obtiendront ainsi l’information.

On peut alors se demander si les proportions d’experts et de promoteurs jouent le même rôle dans la diffusion d’information, et s’il existe un effet de seuil qui permettrait de garantir qu’une information mal conçue soit tout de même propagée dans la population.

### Compréhension et proactivité : exemple de simulation

La figure 7.5 représente l’évolution des trois représentations sociales qui apparaissent dans la population. R1 correspond à l’absence de croyance, R2 à l’information reçue par la publicité et R3 aux croyances qui combinent l’information reçue par la publicité avec les croyances préalables. En rapportant l’évolution de R2, on constate que la

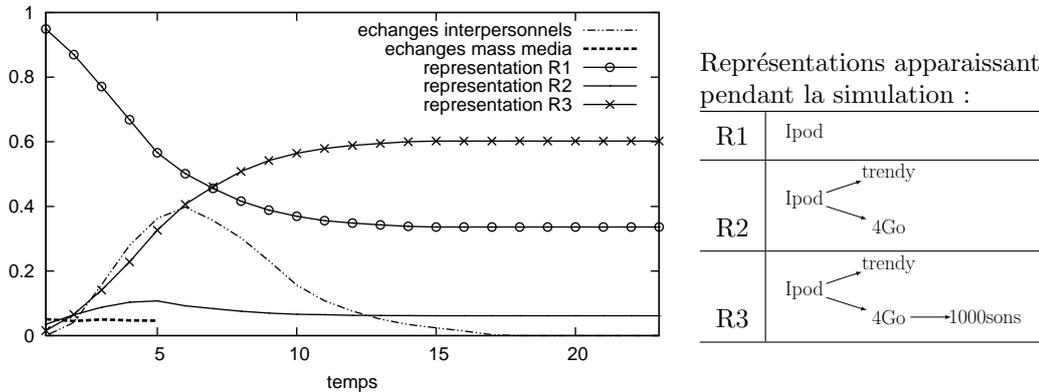


FIG. 7.5: Exemple représentatif de simulation de diffusion d'information nécessitant des croyances préalables pour être comprise, avec  $p^{\text{promoteurs}} = 0.3$  et  $p^{\text{experts}} = 0.3$ . Les représentations sociales apparaissant dans le modèle sont décrites à droite.

proportion d'agents possédant cette représentation augmente pendant la publicité, puis diminue tandis que les interactions interpersonnelles propagent R3 dans la population, remplaçant R2 ou R1.

### Compréhension et proactivité : dynamique dans l'espace de paramètres

De même que dans l'exemple précédent, nous nous intéressons maintenant à la proportion finale de représentations à la fin de la simulation, dans l'espace de paramètres  $(p^{\text{expert}}, p^{\text{promoteurs}})$ . On notera que le paramétrage épidémique présenté plus haut correspond à un cas particulier de compréhension totale de l'information, avec  $p^{\text{expert}} = 1$ . La figure 7.6 représente le nombre d'agents possédant chacune des représentations recensées en figure 7.5. Les représentations R1, R2 et R3 s'excluent mutuellement et couvrent toute la population. Nous nous concentrerons sur la proportion finale d'agents possédant la représentation R3 (*en bas à gauche*), qui correspond à la représentation la plus complète de l'innovation. Nous constatons que les proportions d'experts et de promoteurs jouent des rôles très différents dans la diffusion d'information.

**A nombre de promoteurs identique**, si le nombre d'experts est peu important, peu d'agents comprendront l'intérêt de l'innovation. Toutefois, ces rares agents transmettront cette information, et atteindront les promoteurs qui la feront suivre, propageant l'information en cascade au reste de la population. C'est pourquoi, *si le nombre d'experts augmente, leur apport est peu important*, ce qui est visible par la pente très douce de la courbe de R3. Cette courbe douce correspond à l'effet de seuil épidémique étudié précédemment : si le nombre de sources est suffisant (ici, d'agents experts et promoteurs), ces sources permettent déjà d'atteindre une grande partie de la population, et l'augmentation du nombre de sources a un effet négligeable. On constate toutefois l'existence d'un *seuil minimum d'experts au dessous duquel aucune propagation de l'information ne peut survenir*. En effet, faute de sources d'information, aucune cascade d'information ne peut apparaître dans la population. Ce seuil, qui apparaît comme la

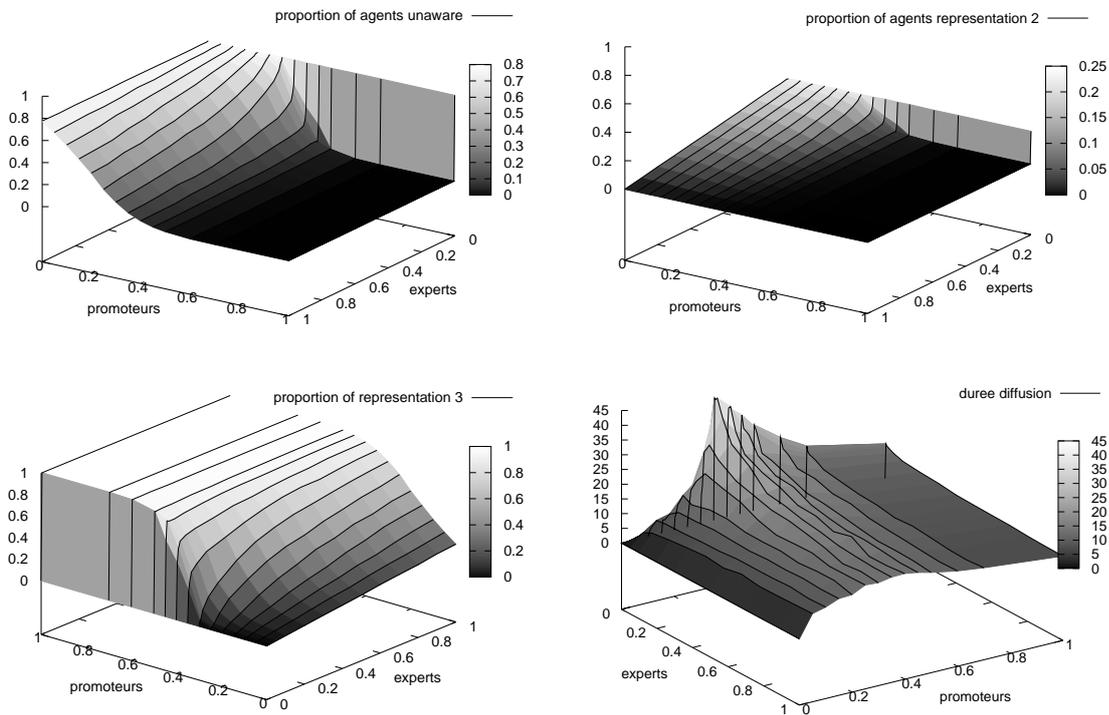


FIG. 7.6: Proportion des agents qui détiennent chaque représentation à la fin de la simulation, en fonction de la proportion de promoteurs  $p^{\text{promoteurs}}$  et d'experts  $p^{\text{experts}}$  créés lors de l'initialisation de la simulation. La représentation R1 (*en haut à gauche*) correspond aux agents sans information, la représentation R2 (*en haut à droite*) les agents qui ont uniquement l'information transmise par la publicité. La représentation R3 (*en bas à gauche*) correspond à la compréhension complète de l'information. La dernière figure (*en bas à droite*) décrit la durée de diffusion d'information jusqu'à la stabilisation.

chute brutale sur le graphique de R3 (ou l'augmentation brutale sur R1), correspond à une très petite proportion d'experts (avec ces paramètres, une proportion d'experts supérieure à 0.05 garantit l'existence de cascades).

**A proportion d'experts identique**, si le nombre de promoteurs est petit, peu d'agents ont envie de transmettre l'information, quelle que soit leur compréhension de l'information. Par contre, *une petite augmentation du nombre de promoteurs augmente de façon importante le nombre de personnes touchées par l'information*. La courbe 7.6 fait apparaître un seuil épidémique net, qui dépend légèrement de la proportion d'experts, mais principalement de la densité du réseau social; nous revenons au problème de percolation dans le réseau d'interactions identifié précédemment dans les modèles épidémiques. Ainsi, étant donnés nos paramètres, le point d'inflexion de la courbe de diffusion se situe à  $p^{\text{promoteurs}} \sim 0.3$ .

Le temps de diffusion, dépeint sur la figure 7.6 (*en bas à droite*), demeure relativement stable. Comme dans le cas purement épidémique, il augmente quand le nombre de sources d'information est suffisant pour qu'il y ait percolation, et suffisamment faible pour que le nombre de cascades soit limité.

### Interprétation pour l'institution

Si le nombre de promoteurs est suffisant, et que ces promoteurs sont interconnectés, la proportion de personnes aptes à comprendre immédiatement le message publicitaire  $p^{experts}$  a peu d'importance. Cette proportion doit toutefois être suffisante pour que les individus à la fois aptes à comprendre le message et motivés dans sa transmission soient suffisamment nombreux. Il existe donc deux seuils lors de la diffusion d'un message institutionnel qui nécessite une croyance préalable pour être compris : le premier seuil, bas, correspond à un nombre minimal d'individus capables de comprendre l'intérêt de l'innovation, tandis que le second porte sur le nombre d'individus motivés à transmettre cette information.

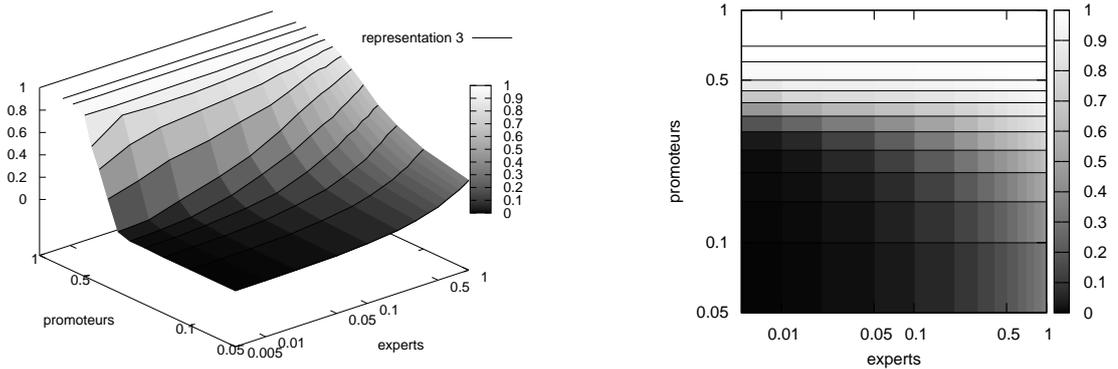


FIG. 7.7: Proportion d'agents ayant récupéré l'information complète dans l'espace  $(p^{expert}, p^{promoteurs})$ , présenté sur des échelles logarithmiques.

Nous avons déjà discuté de la faible proportion de promoteurs existant probablement dans la population. Or, dans cet espace de paramètres  $p^{promoteurs} \in [0 : 0.4]$ , le modèle devient très sensible à la proportion d'agents capables de comprendre l'information  $p^{experts}$ . Cet espace est affiché avec plus de détails en utilisant des échelles logarithmiques (figure 7.7). Il apparaît alors clairement qu'en dessous de 10% de promoteurs dans la population (valeur très optimiste pour un produit quotidien), la proportion d'individus capables de comprendre l'information institutionnelle joue un rôle essentiel dans la diffusion, et doit atteindre au moins la moitié de la population pour obtenir un résultat satisfaisant. Cette observation est conforme à la réalité du *marketing mix*, dans lequel on cherche à concevoir des messages compréhensibles par toute l'audience. Cela signifie aussi, comme observé dans la réalité, qu'un message mal compris par la population se propagera très faiblement. De ce point de vue, le modèle de communication semble donc plausible.

### 7.2.3 Recherche d'information

#### Scénario et paramétrage

paramètre	valeur
<b>segments</b> segments proportion de chaque segment	$\mathcal{S} = \{promoteurs, experts, neutres\}$ $p^{promoteurs} \in [0, 1], p^{experts} \in [0, 1]$ (non exclusifs)
<b>comportement de communication</b> fonction d'émission proactive d'information pour les promoteurs fonction de recherche d'information pour les agents curieux	$f^{proactivite}(RA_o^{a,t}) = (1000sons \in RA_o^{a,t})$ $f^{curiosite}(RA_o^{a,t}) = (trendy \in RA_o^{a,t})$

TAB. 7.4: Paramètres utilisés pour analyser la dynamique du modèle avec compréhension de l'information et recherche d'information. Seuls les paramètres modifiés par rapport au tableau 7.2 sont représentés.

Nous avons vu que les descriptions comportementales développées pour le *mix marketing* et la diffusion d'innovation mentionnent tous la recherche active d'information, recherche motivée par les premières informations reçues. Pour étudier l'impact de cette recherche d'information, nous ajoutons à la population des agents dits curieux, qui recherchent de l'information à propos de tous les objets qui semblent "trendy". Ce segment d'*agents curieux* est en proportion  $p^{curieux} \in [0 : 1]$  dans la population. Leur fonction de recherche d'information  $f^{curiosite} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$  est définie par simple présence du concept "trendy" dans la représentation activée :  $\forall a \in \mathcal{A}^{curieux}$ ,  $f^{curiosite}(RA_o^{a,t}) = (trendy \in RA_o^{a,t})$ . Pour les agents non curieux, cette fonction est simplement  $f^{curiosite}(RA_o^{a,t}) = faux$ . Ces paramètres sont résumés en tableau 7.17.

#### Exemple de simulation avec recherche d'information

La figure 7.8 présente un exemple représentatif de simulation avec recherche d'information. Les courbes d'interaction comprennent toujours le total des interactions interpersonnelles, mais distinguent maintenant les interactions dues à la proactivité, à la recherche d'information, ou à la rencontre d'un agent en état proactif avec un agent qui recherchait de l'information. L'évolution des représentations est décrite dans la figure du bas. Hormis la proportion d'agents recherchant de l'information (10%), les paramètres utilisés pour cette simulation sont les mêmes qu'en figure 7.5 (page 149), ce qui nous permet de comparer les proportions de représentations avec et sans recherche d'information.

Avec les mêmes paramètres  $p^{promoteurs}$  et  $p^{experts}$ , la proportion d'agents détenant la représentation R3 demeurerait inférieure à celle de la représentation R1. Ici, avec seulement 10% d'agents en recherche d'information, cette proportion devient largement majoritaire. En effet, la recherche d'information joue plusieurs rôles. Si un agent curieux  $A_1$

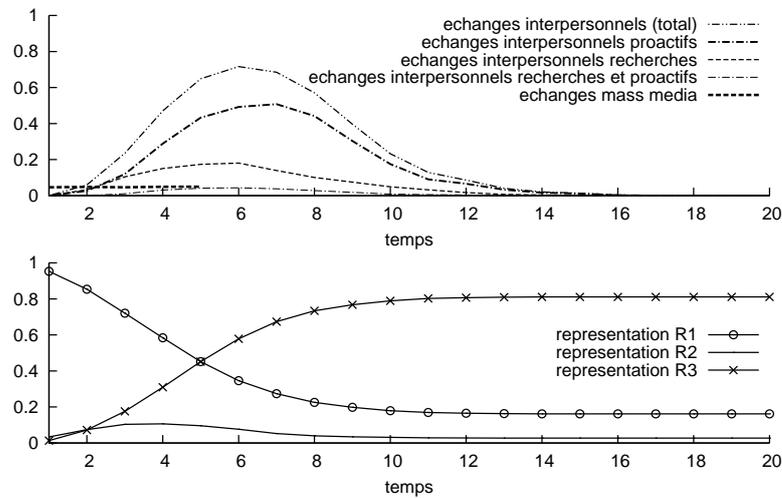


FIG. 7.8: Exemple représentatif de simulation de diffusion d'information avec recherche d'information, avec  $p^{\text{promoteurs}} = 0.3$ ,  $p^{\text{experts}} = 0.3$  et  $p^{\text{curieux}} = 0.1$ . Les échanges d'informations différencient les interactions proactives et recherchées (*en haut*). Les représentations sociales apparaissant dans le modèle (*en bas*) ont un contenu identique à celles présentées sur la figure 7.5.

qui possède R2 (publicité) rencontre un agent expert  $A_2$  qui possède R1 (aucune information), cet  $A_1$  récupère l'information experte et détient maintenant la représentation R3. De plus, son interlocuteur  $A_2$  connaît maintenant le produit (échange bidirectionnel d'information), et connaît donc lui-même R3. Dans ce cas de figure, *la recherche d'information permet de récupérer de l'information d'un agent inactif mais possédant l'information*. De plus, *la recherche d'information provoque également la transmission d'information*. Dans le second cas de figure, l'agent curieux  $A_1$  détenant R2 rencontre un autre agent curieux  $A_2$  possédant R1 (aucune information). L'agent  $A_1$  ne récupère aucune information ; par contre,  $A_2$  connaît maintenant R1, et trouvera éventuellement l'information R3 par un autre agent. Si  $A_2$  est un agent promoteur, il retransmettra ensuite l'information à ses voisins. Ici encore, la recherche d'information permet d'informer un autre agent.

La recherche d'information a donc un double rôle dans la diffusion d'information : elle permet de récupérer de l'information et d'en transmettre. Dans cette illustration, nous avons vu qu'elle modifie sensiblement l'état de croyance final. Comme va nous le démontrer l'exploration de l'espace des paramètres, la recherche d'information modifie les conditions de diffusion des croyances.

### Dynamique dans l'espace des paramètres

L'exploration de l'espace des paramètres du modèle sans recherche d'information correspondait au cas particulier de  $p^{\text{curieux}} = 0$ . La figure 7.9 représente différents cas avec  $p^{\text{curieux}} = (0.05, 0.1, 0.2, 0.5)$ . Elle peut être comparée aux résultats obtenus sans

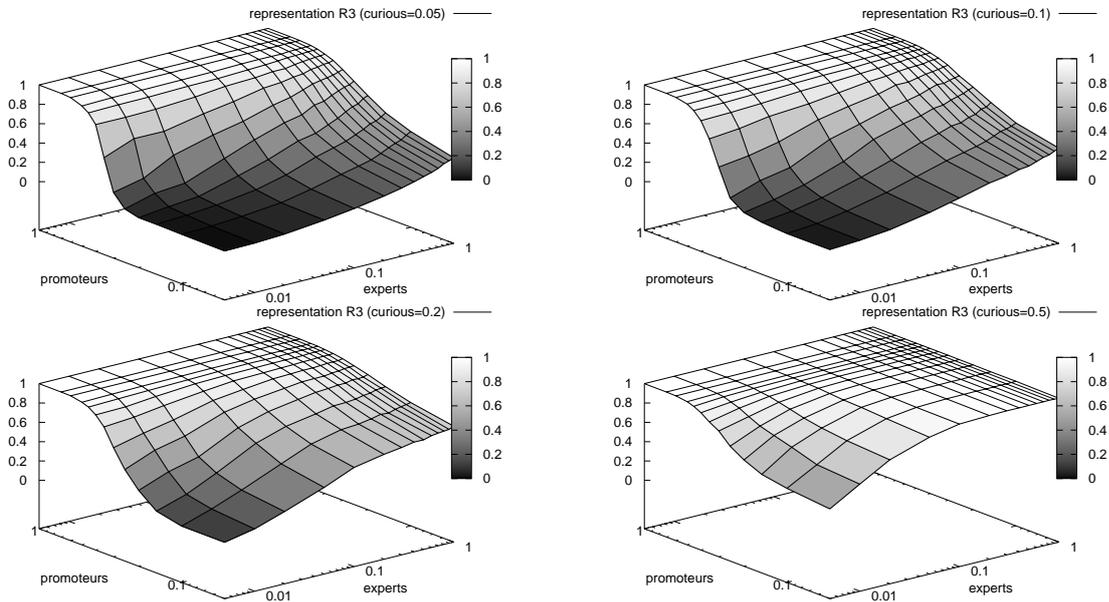


FIG. 7.9: Proportion d'agents détenant la représentation R3 à la fin de la simulation avec recherche d'information, dans l'espace  $(p^{experts}, p^{promoteur})$ , pour  $p^{curieux} = 0.05$  (en haut à gauche),  $p^{curieux} = 0.1$  (en haut à droite),  $p^{curieux} = 0.2$  (en bas à gauche) et  $p^{curieux} = 0.5$  (en bas à droite).

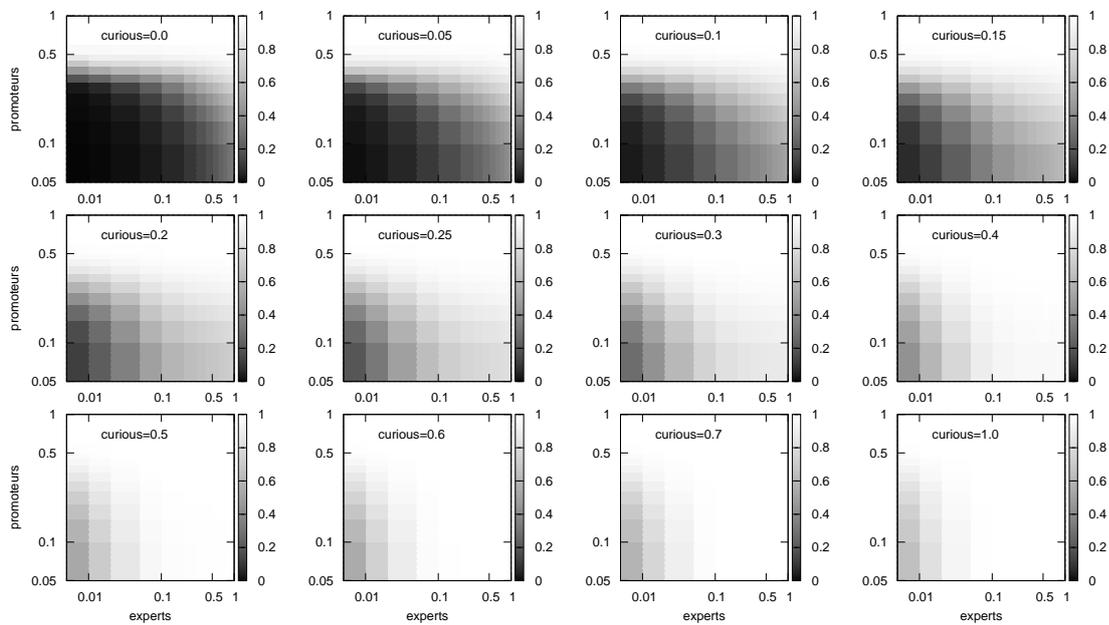


FIG. 7.10: Proportion d'agents détenant la représentation R3 à la fin de la simulation avec recherche d'information, dans l'espace  $(p^{experts}, p^{promoteur}, p^{curieux})$ .

recherche d'information présentés précédemment en figure 7.6 (page 150). L'espace qui nous préoccupe se situant dans les petites valeurs de  $p^{experts}$  et  $p^{promoteur}$ , ces graphiques sont présentés sur des échelles logarithmiques. On constate immédiatement que la recherche d'information conduit à une diffusion d'information plus importante pour  $p^{experts}$  et  $p^{promoteur}$  identiques. La figure 7.10 représente de façon extensive les résultats obtenus dans l'ensemble de l'espace  $p^{curieux} \in [0 : 1]$ .

Dans l'espace  $p^{curieux} < 0.2$ , la recherche d'information facilite légèrement la diffusion, sans toutefois outrepasser les seuils sur  $p^{experts}$  et  $p^{promoteur}$ . Par contre, dans l'espace  $p^{curieux} \geq 0.2$  (deux rangées du bas sur la figure 7.10), ces seuils de diffusion sont fortement diminués. Ainsi, avec 10% d'experts dans la population et 10% de curieux, l'information atteindra plus de 50% de la population quel que soit le nombre de promoteurs ( $p^{promoteur} > 0.05$ ). Si la publicité est bien conçue ( $p^{experts} = 1$ ), avec seulement 5% de promoteurs, 70% de la population peut être atteinte. *La recherche d'information réduit ainsi considérablement les contraintes sur le nombre de promoteurs qui doivent être présents dans la population pour atteindre une large diffusion.*

### Interprétation pour l'institution

Si la proportion de personnes  $p^{promoteurs}$  qui seront suffisamment intéressées par une innovation pour la promouvoir est généralement faible, la proportion de personnes  $p^{curieux}$  qui recherchent de façon plus ou moins active (parfois, simplement en en discutant comme d'un sujet de conversation banal) de l'information sur une innovation semble potentiellement plus importante. Contrairement à la transmission proactive d'information qui engage la responsabilité de l'émetteur, la recherche d'information peut prendre place dans les conversations courantes (dans une conversation du type "tu as entendu parler de ... ? Il paraît que..."). Or, l'effet de seuil provoqué par  $p^{curieux}$  est relativement bas. Une proportion de 5% ou 10% d'individus curieux dans la population pour une innovation, sans être atteinte pour toutes les innovations, ne semble pas déraisonnable. A la lumière de ces résultats, il apparaît qu'une institution qui désirerait contrôler la propagation de ses informations doit évaluer la proportion d'individus rendus curieux par l'information institutionnelle.

## 7.2.4 Apports de l'exploration du modèle de communication

### Sensibilité aux paramètres

La figure 7.11 résume la sensibilité de la dynamique d'information aux paramètres observée dans cette série d'expérimentations. Par paramétrage, les proportions de promoteurs et de curieux décrivent l'émission proactive d'information et la recherche motivée d'information. De même, comme les experts sont configurés avec des croyances préalables, la compréhension du message institutionnel est décrite dans le modèle. La masse critique (ou seuil de diffusion d'information) dépend des proportions d'individus comprenant l'information, ainsi que des proportions d'individus recherchant ou émettant de l'information. Par ailleurs, le choix et le paramétrage du générateur de réseau d'interaction impacte par nature les propriétés de ce réseau. Nous avons constaté

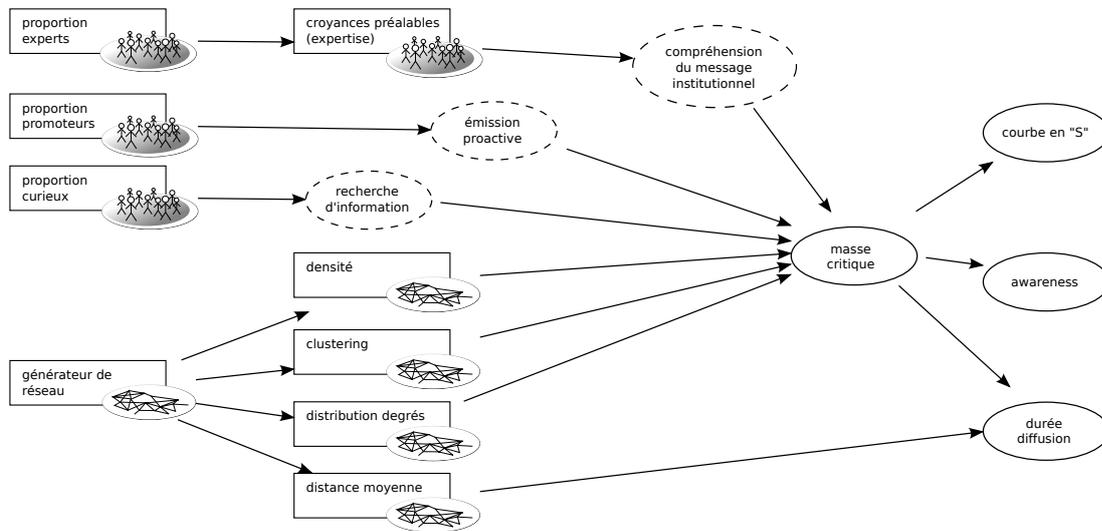


FIG. 7.11: Représentation schématique de la sensibilité du modèle aux différents paramètres testés (représentés par des rectangles). Les cercles continus représentent des indicateurs ou des faits stylisés. Les cercles pointillés correspondent à des faits stylisés.

que la densité, le *clustering* et la distribution des degrés de connectivité dans la population ont un impact fort sur la masse critique. Si le seuil de diffusion est atteint, la diffusion sera portée par la communication interpersonnelle, et fera apparaître une courbe de connaissance de l'innovation en forme de "S". La proportion d'individus connaissant l'innovation (*awareness*), ou détenant l'une des représentations sociales, dépend également de l'atteinte de cette masse critique. Nous avons également constaté que la durée de diffusion dépend de la facilité avec laquelle l'information se transmet dans la population. La distance moyenne entre deux individus impacte également la durée de diffusion, puisqu'elle détermine le nombre de pas qui séparent deux individus. Ce facteur n'impacte pas notablement la masse critique ; ce constat est peut-être dû au fait que les générateurs sélectionnés conservent une distance moyenne stable quel que soit leur paramétrage.

### Confirmation de nos choix de modélisation

La sensibilité de la dynamique d'information à tous les paramètres étudiés dans cette partie prouve que la représentation de ces paramètres était pertinente. En particulier, la recherche d'information joue un rôle crucial dans la dynamique d'information. Nous avons vu que cette recherche d'information ne joue pas un rôle similaire à l'émission proactive. Par conséquent, *on ne peut pas prétendre représenter la dynamique de communication à propos d'objets sociaux en général, et d'innovations en particulier, sans représenter la recherche d'information.*

### Une diffusion purement interpersonnelle est peu probable

En explorant un modèle de communication *générique*, il est impossible de comparer les paramètres à des valeurs précises mesurées sur le terrain. Il demeure toutefois possible de déterminer des ordres de grandeur plausibles pour ces paramètres.

La proportion d'individus promoteurs d'une innovation dépend naturellement des caractéristiques de cette innovation. On parle davantage d'une innovation qui contribue au prestige social. Certaines innovations visibles - observables - constituent également en elle-mêmes des recommandations. A l'inverse, les innovations tabous ne se prêtent pas à la recommandation en public. Il est donc possible que cette proportion de promoteurs soit quasi complète ou nulle. Toutefois, dans la plupart des cas, seule une proportion limitée sera promotrice. Par exemple, recycler ses déchets, utiliser des ampoules à basse consommation d'énergie, ou encore utiliser un moyen de contraception au Kenya sont des comportements ou des choix que l'on peut difficilement communiquer à ses collègues de travail. Si l'on considère l'ensemble de la population, dans la plupart des cas de produits ou d'innovations, il est probable qu'au mieux 10% de la population promeut une innovation. Cette proportion de promoteurs étant cruciale dans la dynamique d'information, il est essentiel de la quantifier précisément par des études de terrain.

La proportion d'individus cherchant de l'information à propos d'un produit ou d'une innovation peut être plus élevée. La recherche d'information n'engage pas par rapport à l'interlocuteur ; on peut d'ailleurs trouver de nombreuses façons de poser des questions sur une innovation tabou, en plaisantant par exemple. Toutefois, les simulations indiquent que la proportion de curieux facilite la communication à condition que le nombre de promoteurs soit suffisant. Or, cette proportion de promoteurs est probablement faible dans la plupart des cas. La dynamique d'information sera donc très sensible à de faibles variations du nombre de curieux.

Si l'on accepte des grandeurs plausibles pour les proportions de promoteurs et de curieux, on doit conclure que *la plupart des cas de diffusion d'information se situent dans la zone de transition, ou en dessous de la masse critique qui permet l'extension de l'information à toute la population*. Ce constat est parfaitement compatible avec la réalité : il est rare que l'information sur un produit se diffuse spontanément dans toute la population. Seuls des sujets qui se prêtent à une large discussion (éléments consensuels qui permettent de lier ou maintenir la discussion au quotidien, comme les éléments marquants de l'actualité) sont relayés par un nombre de personnes suffisant pour atteindre la masse critique. A première vue, ce constat semble opposé aux observations et aux espoirs du marketing viral, qui vise à obtenir une promotion de produits uniquement par communication interpersonnelle.

En réalité, cette différence entre les célèbres exemples du marketing viral et les interprétations d'expérimentation permet de réaliser que *les cas d'école du marke-*

*ting viral ne sont pas des cas de diffusion d'information interpersonnelle classiques.* Le célèbre exemple de la diffusion du service de messagerie Hotmail se base sur un message publicitaire ajouté automatiquement à chaque courriel, c'est-à-dire sans que l'utilisateur n'ait à être motivé pour promouvoir le produit, auquel cas tous les utilisateurs deviennent promoteurs. Dans tous les cas de diffusion par courrier électronique, il faut également noter que le réseau d'interactions est beaucoup plus dense que le réseau des interactions en face à face, s'affranchit des probabilités de rencontre directe, et permet à un individu d'envoyer un message à des dizaines d'interlocuteurs simultanément. Ces cas ne correspondent pas réellement à du bouche à oreille; ils ne peuvent donc pas être rapportés à la communication interpersonnelle, et ne devraient pas être cités en exemple de cas de bouche à oreille. Notons que ces cas particuliers demeurent reproductibles dans notre modèle en utilisant les proportions de promoteurs et la densité de réseaux sociaux convenables.

### Sensibilité aux paramètres et limites de la modélisation

*Chacun des paramètres auxquels le modèle se révèle sensible requiert une collecte d'information précise pour utiliser ce modèle de façon descriptive.* Ainsi, les proportions d'individus qui rechercheront ou émettront de l'information doivent être mesurées avec précision (au dixième de pour-cent à ce stade de l'analyse). Nous avons aussi constaté que l'impact de la structure d'interactions est extrêmement important, un changement de cette structure pouvant conduire à une diffusion de l'information totale ou au contraire extrêmement limitée. *La descriptivité de la dynamique d'information est donc conditionnée par la descriptivité de ce réseau d'interactions.* En particulier, le taux de clustering dans les réseaux réels, ainsi que le degré de connectivité moyen des individus, doivent être mesurés sur le terrain.

Etant donnée la sensibilité du modèle à ces divers paramètres, une analyse quantitative des résultats a un intérêt très limité. Par exemple, le calcul de seuils de diffusion précis a peu de sens si l'on ne possède pas de structure d'interactions descriptive. C'est pourquoi nous n'avons pas développé d'analyse précise de ces seuils dans cette partie, et nous limiterons à une analyse qualitative de la dynamique du modèle dans les parties suivantes.

## 7.3 Adoption et segments

### Objectif et scénario

#### Comprendre l'impact des paramètres sur la segmentation

Afin d'analyser une population d'adoptants potentiels ou de consommateurs, on se repose classiquement sur une segmentation de la population. Chaque segment regroupe des adoptants potentiels (ou des consommateurs) partageant des caractéristiques socio-démographiques, des motivations, des capacités, ou encore des attitudes similaires envers l'innovation. Rogers a proposé une segmentation générale des adoptants décomposée en innovateurs, adoptants précoces, majorité précoce, majorité tardive et retardataires. Pour Rogers, ces segments se différencient par leurs caractéristiques de communication et leurs contraintes d'adoption (budget, peurs, etc.). Les caractéristiques de ces segments sont rassemblées dans le tableau 7.5. Cette segmentation est devenue une référence largement citée dans la littérature de diffusion d'innovation ou marketing (par ex. [Engel *et al.*, 1995b] ou [Lendrevie *et al.*, 2006]). A la différence des segmentations développées par les entreprises, les segments de Rogers sont supposés adopter *successivement*, les uns après les autres ; il mentionne ainsi que “la majorité tardive adopte les nouvelles idées *juste après* l'individu moyen d'un système social”, ou que “les retardataires *sont les derniers* à adopter une innovation” [Rogers, 2003, p. 284] (emphase ajoutée par nos soins).

Le but de cette série d'expérimentations est double. D'une part, nous examinerons *comment les différents paramètres liés à la communication et aux croyances influencent l'apparition de segments* qui adoptent plus ou moins tôt pendant la diffusion, ce qui constituera un apport pour l'étude de n'importe quelle autre segmentation. D'autre part, nous pourrons *déterminer l'impact relatif des différents facteurs proposés par Rogers pour segmenter sa population*, et déterminer si certains jouent un rôle plus important que d'autres. Evidemment, on pourrait faire apparaître simplement des segments dans la population en ajoutant artificiellement un délai d'adoption propre à chaque segment, ce qui ferait inévitablement apparaître des segments adoptant séquentiellement l'innovation. Nous chercherons plutôt à déterminer l'influence des paramètres de communication et de croyance représentés dans le modèle sur la base des observations de Rogers lui-même. Les phénomènes descriptibles dans le modèle étant nombreux, nous étudierons progressivement les différentes possibilités et leur impact sur la segmentation émergente.

#### Paramètres de support

Dans cette série d'expérimentations, nous prendrons en compte le support des croyances que nous avons jusqu'ici délaissé. Nous utiliserons les **niveaux de support qualitatifs** suivants :  $\Sigma = \{\sigma^{publicite}, \sigma^{oui-dire}, \sigma^{avis}, \sigma^{xp-indirecte}, \sigma^{xp-directe}\}$  (ensemble ordonné).  $\sigma^{publicite}$  représente le niveau de crédibilité accordée à la publicité,  $\sigma^{oui-dire}$  correspond à une information entendue quelque part sans pouvoir se remémorer la source précise ;  $\sigma^{avis}$  décrit la crédibilité accordée à une information

<b>segment</b>	innovateurs ( <i>innovators</i> )	adoptants précoces ( <i>early adopters</i> )	majorité précoce ( <i>early majority</i> )	majorité tardive ( <i>late majority</i> )	retardataires ( <i>laggards</i> )
<b>trait ca-</b>	aventureux	respect	délibérer	sceptiques	traditionnels
<b>proportion</b>	2.5%	13.5%	34%	34%	16%
<b>délai d'adoption</b>	0.4 ans	0.55 ans	1.14 ans	2.34 ans	4.65 ans
<b>communication</b>	cliques d'innovateurs indépendantes de la situation géographique	leaders d'opinion sollicités par les autres segments, position centrale dans les réseaux de communication	interagit fréquemment avec ses pairs, crée un pont entre les adoptants précoces et la majorité tardive	quasiment isolés, interagissent avec d'autres individus traditionnalistes	
<b>adoption</b>	aventureux, sans contrainte, dispose des connaissances techniques pour évaluer lui-même l'innovation	décisions pour conserver son rôle social	attentives	pression nécessité sociale,	orientation vers les solutions passées, scepticisme envers les agents de changement et la nouveauté en général, aversion au risque causée par de faibles ressources

TAB. 7.5: Caractéristiques des segments décrits par Rogers [Rogers, 2003, pp 282-285]

crédibilité reçue	crédibilité perçue
$\sigma^{publicite}$	$\sigma^{publicite}$
$\sigma^{oui-dire}$	$\sigma^{oui-dire}$
$\sigma^{avis}$	$\sigma^{oui-dire}$
$\sigma^{xp-indirecte}$	$\sigma^{avis}$
$\sigma^{xp-directe}$	$\sigma^{xp-indirecte}$

	support de l'ancienne croyance			
	$\sigma^{publicite}$	$\sigma^{oui-dire}$	$\sigma^{avis}$	$\sigma^{xp-indirecte}$
support de la nouvelle information	0.9 (2)	0.369 (10)	0.206 (20)	0.109 (40)
	1.0 (1)	0.9 (2)	0.601 (5)	0.369 (10)
	1.0 (1)	1.0 (1)	0.9 (2)	0.601 (5)
	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	0.9 (2)
	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)
	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)
	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	0.9 (2)
	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	0.109 (20)
	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	0.9 (2)

TAB. 7.6: Filtrage de support définissant le support subjectivement perçu pour une nouvelle information.

TAB. 7.7: Probabilité de révision d'une croyance contradictoire  $p^{rev}(\sigma^{old}, \sigma^{new}) : \Sigma, \Sigma \rightarrow [0, 1]$  en fonction du support de l'ancienne croyance  $\sigma^{old}$  par et de la crédibilité perçue  $\sigma^{new}$ . Entre parenthèses, le nombre de réceptions d'information nécessaires pour que la croyance ait 99% de chances d'être révisée.

dont la source est clairement identifiée et estimée fiable (avis de la presse, d'un ami, etc.).  $\sigma^{avis}$  est toutefois surpassé par  $\sigma^{xp-indirecte}$  et  $\sigma^{xp-directe}$ , qui correspondent respectivement à un avis appuyé par l'expérience indirecte ("Un ami, qui a testé le produit, m'a dit que...") et l'expérience directe ("ayant testé l'innovation, je peux dire que..."). Ces niveaux qualitatifs sont choisis car ils apparaissent naturellement pendant les entretiens avec les consommateurs et dans les conversations courantes, ce qui facilite grandement leur collecte.

Le **filtrage des niveaux de crédibilité** est paramétré d'après la table 7.6. Si un agent reçoit une information relatée par l'émetteur comme une expérience directe ("*J'ai testé l'innovation, je peux dire que...*",  $\sigma^{xp-directe}$ ), le support perçu est une expérience indirecte ("un ami, qui a testé le produit, m'a dit que...",  $\sigma^{xp-indirecte}$ ). De même, une expérience indirecte est perçue comme un avis simple, et un avis simple comme de l'ouï-dire. Par contre, si un individu reçoit une information dont l'émetteur signale qu'elle provient de la publicité ("*ils disent que*",  $\sigma^{publicite}$ ) ou sans source clairement déterminée ("*on dit que*"  $\sigma^{oui-dire}$ ), ce niveau de crédibilité est subjectivement perçu comme inchangé.

Les **probabilités de révision de croyances contradictoires** sont définies en table 7.7. Comme expliqué précédemment, ces probabilités sont déterminées par le choix d'un nombre plausible de réceptions d'information nécessaires pour obtenir une probabilité de révision supérieure à 99% ; nous réutilisons la formule :  $p^{rev} \geq 1 - e^{-\frac{\ln(0.01)}{n}}$ . La révision est certaine quand  $\sigma^{new} \succ \sigma^{old}$ . Pour  $\sigma^{new} = \sigma^{old}$ , nous décrivons une inertie, c'est-à-dire qu'il faut en moyenne deux réceptions d'information pour réviser une croyance. Enfin, pour  $\sigma^{new} \prec \sigma^{old}$ , les probabilités sont adaptées au cas par cas, de façon à représenter les différences de révision en fonction des sources. Par exemple, nous considérons que la probabilité de réviser une expérience directe est plus faible que la probabilité de révision d'un avis impersonnel par de l'ouï-dire. Faute de données quantitatives, ces probabilités permettent de représenter qualitativement les différences de révision liées aux niveaux de supports.

### Adoption représentée dans le modèle

Nous étendons l'exemple de l'iPod proposé précédemment, en décrivant cette fois l'adoption par les agents, en utilisant les propositions développées précédemment. Cette adoption est supposée indépendante de tout facteur contextuel ou économique ; si la fonction d'adoption  $f^{adopt} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$  renvoie *vrai*, l'innovation est immédiatement adoptée. Cette description correspond davantage à ce qu'on pourrait qualifier dans la réalité d'*adoption psychologique* - l'individu évalue positivement l'innovation, décide de l'acheter/l'utiliser et s'apprête à l'appliquer aussitôt que possible, par exemple dès qu'il disposera d'un budget suffisant - que d'une adoption réelle avec achat, mise en oeuvre et utilisation.

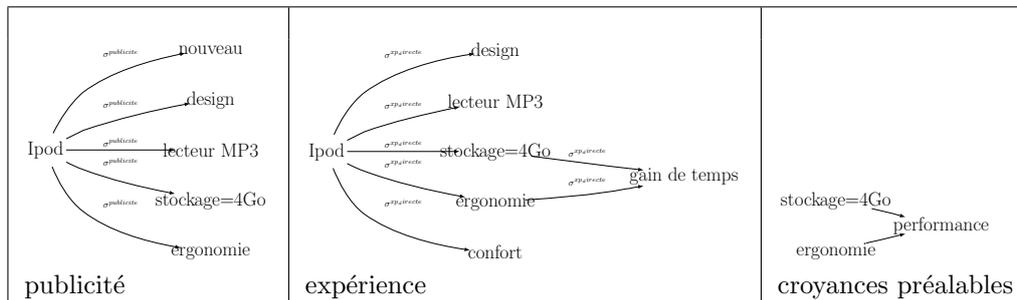


FIG. 7.12: Informations exogènes introduites dans le système social. La publicité est envoyée avec un support  $\sigma^{publicite}$  et l'expérience avec le support  $\sigma^{experience}$ . Les croyances préalables sont introduites avec le support  $\sigma^{xp.directe}$ .

### Information exogène

En plus de la publicité, nous représentons maintenant un canal expérience, pour lequel l'exposition est nulle avant adoption et  $exp^{xp} \in [0, 1]$  sinon. Les informations transmises par ces canaux sont décrites en figure 7.12.

#### 7.3.1 Différenciation de segments par les croyances et motivations

Le **segment des innovateurs** est supposé disposer de connaissances qui permettent à ses membres d'évaluer l'information par eux-mêmes, en reliant les attributs de l'innovation avec un attribut subjectif de performance. Ces croyances sont définies en figure 7.12; on constate que ces croyances leur permettent d'évaluer les qualités de l'innovation. Les innovateurs recherchent de l'information sur tout ce qui est nouveau, parlent proactivement tous les nouveaux produits, et adoptent une innovation pour son seul attribut de nouveauté. Etant donnée cette configuration, les innovateurs constituent pour nous l'ensemble des agents qui adopteront toujours (tout ce qui est nouveau et performant) et feront toujours connaître l'innovation.

Les **adoptants précoces** recherchent également de l'information sur toutes les nouveautés, et disposent comme les innovateurs des croyances expertes présentées en figure 7.12. Par contre, ils adoptent une innovation si elle semble performante. Afin de conserver leur statut social, ils émettent de l'information uniquement si l'innovation est performante. La **majorité précoce** recherche de l'information sur les nouveaux produits, mais ne dispose pas des croyances expertes lui permettant d'inférer la valeur de l'innovation du message publicitaire. Elle adopte uniquement un produit performant, et émet de l'information en découvrant avec l'expérience que le produit permet de gagner du temps. La **majorité tardive** recherche et émet de l'information si une innovation permet de gagner du temps, et adopte pour la même raison. Les **retardataires**, quand à eux, ne recherchent pas d'information. Néanmoins, s'ils apprennent que le produit permet de gagner du temps, ils l'adoptent. Ces motivations sont utilisées pour paramétrer le comportement communicationnel de chaque segment.

segments	$\sigma_{decision}^{min}$	poids des concepts dans l'adoption $w : \mathcal{C} \mapsto \mathbb{R}$		
		"nouveau"	"performance"	"gain de temps"
innovateurs	$\sigma^{publicite}$	1.0	0	0
adoptants précoces	$\sigma^{publicite}$	0	1.0	0
majorité précoce	$\sigma^{publicite}$	0	1.0	0
majorité tardive	$\sigma^{publicite}$	0	0	1.0
retardataires	$\sigma^{publicite}$	0	0	1.0

TAB. 7.8: Paramètres de la fonction d'adoption de chaque segment :  $\sigma_{decision}^{min}$  la crédibilité nécessaire d'un concept pour que sa présence soit prise en compte, et poids des motivations associées à chaque concept présent et crédible.

segment	$\sigma_{proactif}^{min}$	$f^{proactif} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$	$f^{recherche} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$
innovateurs	$\sigma^{publicite}$	"nouveau" $\in RA_o^{a,t}$	"nouveau" $\in RA_o^{a,t}$
adoptants précoces	$\sigma^{publicite}$	"performance" $\in RA_o^{a,t}$	"nouveau" $\in RA_o^{a,t}$
majorité précoce	$\sigma^{publicite}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$
majorité tardive	$\sigma^{publicite}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$
retardataires	$\sigma^{publicite}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$

TAB. 7.9: Paramètres des fonctions de recherche et d'émission d'information de chaque segment.

Le tableau 7.8 présente les **paramètres de la fonction d'adoption**  $f^{adoption} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$  pour chaque segment. Rappelons que l'adoption prend en compte uniquement les concepts de la représentation activés avec au moins la crédibilité  $\sigma_{decision}^{min}$ , paramètre que nous négligeons pour l'instant. L'agent adopte si la somme des poids de chaque concept  $w : \mathcal{C} \mapsto \mathbb{R}$  atteint 1. Le tableau 7.9 détaille les paramètres de la **fonction de recherche d'information et d'émission proactive d'information**. La fonction de recherche d'information  $f^{recherche} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$  détermine les concepts à propos desquels les agents d'un segment recherchent de l'information, jusqu'à ce que la crédibilité des concepts utilisés pour l'évaluation atteignent  $\sigma_{decision}^{min}$ . La fonction d'émission proactive d'information  $f^{proactif} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$  détermine les concepts qui motivent un individu à parler proactivement d'un objet ; ces concepts doivent toutefois être activés avec au moins la crédibilité  $\sigma_{proactif}^{min}$ .

Avec ces paramètres, innovateurs et adoptants précoces disposent des mêmes croyances et peuvent adopter dès réception de l'information institutionnelle. La majorité précoce devrait adopter ensuite, en recevant l'information nécessaire par les segments précédents. La majorité tardive et les retardataires ne peuvent adopter que sur la base d'informations provenant de l'expérience, et devraient donc adopter après tous les autres segments. Cette séquence d'adoption, volontairement décrite par le paramétrage des motivations de chaque segment, correspond à celui décrit par Rogers, et devrait donc contribuer à l'apparition de segments, voire faire apparaître des segments adoptant séquentiellement.

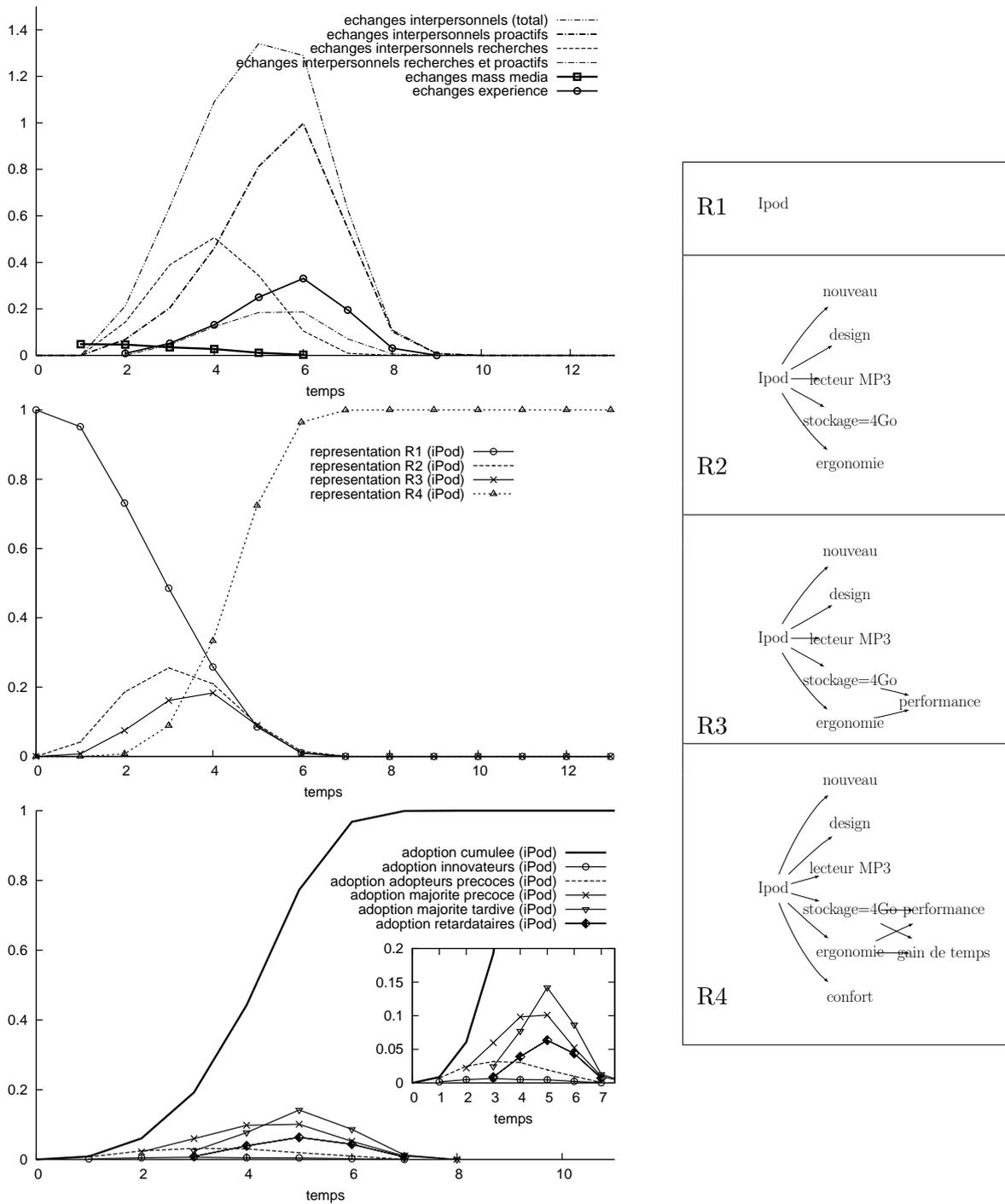


FIG. 7.13: Exemple représentatif de diffusion d'innovation (iPod) en distinguant les segments par leurs niveaux de croyances et leurs motivations : (en haut) courbes d'interaction, (au milieu) courbes de représentations sociales et (en bas) adoption des différents segments. Les représentations sociales apparaissant pendant le diffusion sont présentées à droite.

### Exemple de simulation

La figure 7.13 présente un exemple représentatif de simulation avec ce paramétrage. La figure du haut représente les échanges d'information efficaces dans la population. On constate que l'efficacité de la publicité décroît avec le temps, et que les échanges d'information au départ sont essentiellement provoqués par recherche d'information, tandis que la proactivité domine ensuite les échanges. Les représentations sociales détectées dans la population (figure 7.13 (*au milieu*)) sont naturellement plus nombreuses, puisque nous avons représenté des croyances expertes, la publicité et l'expérience. La courbe R1, qui correspond à l'absence de connaissance de l'innovation (*unawareness*), décroît rapidement dans la population. La représentation R2, qui apparaît lors de la réception d'information par la publicité, croît lentement ; en effet, dès qu'un agent appartenant au segment innovateur ou majorité précoce reçoit cette information, il l'unit avec ses croyances expertes, détenant et propageant ainsi la représentation R3. La recherche d'information est provoquée par la réception de cette représentation R3 par la majorité précoce. Au fil des adoptions, cette représentation disparaît au profit de la représentation R4 correspondant à l'information récupérée avec l'expérience.

segment	décollage	adoption massive	fin
innovateurs	0	3	7
adoptants précoces	1	3	7
majorité précoce	2	5	4.5
majorité tardive	3	5	8
retardataires	3	5	7

TAB. 7.10: Description quantitative des courbes d'adoption instantanée de chaque segment correspondant à la simulation présentée en figure 7.13.

La figure 7.13 (*en bas*) décrit l'adoption instantanée de chaque segment, ainsi que la courbe en "S" de l'adoption cumulée. Trois repères principaux permettent de comparer l'adoption instantanée par différents segments. Le premier est le *décollage*, c'est-à-dire le premier pas de temps à partir duquel les premiers individus du segment commencent à adopter. L'*adoption massive* correspond au maximum de la courbe d'adoption instantanée, et indique à quel moment la plupart des agents d'un segment disposent des conditions suffisantes pour adopter. La *fin d'adoption* correspond au moment auquel il n'y a plus d'adoption instantanée pour un segment. La table 7.13 décrit ces indicateurs pour un ensemble de simulations avec les mêmes paramètres qu'en figure 7.13. Évidemment, cette quantification a peu de sens sur une unique simulation. Aussi, si nous présentons les résultats de simulation d'une unique simulation représentative (ce qui permet de visualiser les aléas dûs à un réseau social), ces indicateurs sont une moyenne observée sur une cinquantaine de simulations.

La description des segments par Rogers laisse supposer que le décollage de chaque segment a lieu séquentiellement, ainsi que les adoptions massives ; on s'attend également

à ce que la fin de l'adoption de chaque segment ait lieu avant l'adoption massive des segments suivants ; il y a peu de sens à observer des innovateurs adoptant après la majorité précoce ou tardive. Dans cet exemple présenté en figure 7.13, le décollage de chaque segment suit l'ordre attendu, bien qu'à faible distance. Les innovateurs adoptent dès connaissance de l'innovation, suivis par les adoptants précoces qui attendent une validation des informations publicitaires par un retour d'expérience. Par contre, la majorité précoce, qui n'est intéressée que par une information disponible par retour d'expérience, adopte un pas de temps plus tard. Viennent ensuite la majorité tardive et les retardataires, qui adoptent après un pas de temps supplémentaire. Contrairement à nos attentes, l'adoption massive des deux premiers segments (décollage et adoption massive) ont lieu en même temps, de même que l'adoption massive des majorités précoces et tardives et que les retardataires. De plus, la fin d'adoption de chaque segment est globalement identique, certains innovateurs adoptant après l'adoption massive de la majorité tardive, ce qui est peu compatible avec la définition même de ce qu'est un innovateur.

## Conclusions

Cette expérimentation nous permet de vérifier que *les croyances et motivations conduisant à l'adoption peuvent contribuer à l'apparition de segments, et influencent essentiellement les premières adoptions de chaque segment*. Par contre, ces croyances et motivations ne permettent pas de définir à eux seuls des segments dont les adoptions massives et fin d'adoption sont clairement distinctes. Etant données les informations simples définies dans cette expérimentation, nous n'avons pas pu décrire les différences d'adoption des segments innovateurs et adoptants précoces, ni des majorité tardive et des retardataires. Toutefois, nous ne prétendons pas décrire les différences d'adoption par la seule distinction des croyances et motivations ; nous avons également constaté le rôle central de la crédibilité des informations.

### 7.3.2 Différenciation de segments par le support des croyances

#### Objectif et paramètres

Pour Rogers, la crédibilité des informations détenues par un adoptant potentiel est un facteur explicatif de l'adoption ou du rejet de l'information. Dans sa description des segments, il présente notamment les innovateurs comme capables d'évaluer par eux-mêmes l'information, tandis que la majorité tardive attend un retour d'expérience interpersonnel. Il est évident que le paramétrage de l'adoption à l'aide du paramètre  $\sigma_{decision}^{min}$  influencera l'adoption immédiate à la réception de la publicité, ou interdira l'adoption avant réception d'information provenant d'interactions interpersonnelles. Dans la présente expérimentation, nous cherchons à déterminer si ce paramètre de crédibilité peut être utilisé pour différencier les segments.

Nous prenons maintenant en compte le support des croyances dans les fonctions comportementales des agents. Conformément aux observations de Rogers, nous modifions les fonctions comportementales en tenant compte des niveaux de crédibilité, comme

segments	$\sigma_{decision}^{min}$	poids des concepts dans l'adoption $w : \mathcal{C} \mapsto \mathbb{R}$		
		"nouveau"	"performance"	"gain de temps"
innovateurs	$\sigma_{publicite}$	1.0	0	0
adoptants précoces	$\sigma_{oui-dire}$	0	1.0	0
majorité précoce	$\sigma_{avis}$	0	1.0	0
majorité tardive	$\sigma_{xp-indirecte}$	0	0	1.0
retardataires	$\sigma_{xp-indirecte}$	0	0	1.0

TAB. 7.11: Paramètres de la fonction d'adoption de chaque segment :  $\sigma_{decision}^{min}$  la crédibilité nécessaire d'un concept pour que sa présence soit prise en compte, et poids des motivations associées à chaque concept présent et crédible.

segment	$\sigma_{proactif}^{min}$	$f^{proactif} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$	$f^{recherche} : RA_o^{a,t} \mapsto \mathbb{B}$
innovateurs	$\sigma_{publicite}$	"nouveau" $\in RA_o^{a,t}$	"nouveau" $\in RA_o^{a,t}$
adoptants précoces	$\sigma_{avis}$	"performance" $\in RA_o^{a,t}$	"nouveau" $\in RA_o^{a,t}$
majorité précoce	$\sigma_{xp-indirecte}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$
majorité tardive	$\sigma_{xp-directe}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$
retardataires	$\sigma_{xp-directe}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$	"gain de temps" $\in RA_o^{a,t}$

TAB. 7.12: Paramètres des fonctions de recherche et d'émission d'information de chaque segment.

cela est visible sur les tableaux 7.11 et 7.12. Ainsi, les **innovateurs** ont confiance en leur propre jugement sur l'innovation. Ils s'estiment capables de discerner par eux-mêmes la véracité des informations reçues, quelle que soit la source d'information. Le seuil nécessaire à la prise en compte d'une croyance pour l'évaluation est donc minimal ( $\sigma_{decision}^{min} = \sigma_{publicite}$ ), ce qui signifie que toute croyance est jugée suffisante pour évaluer l'innovation. Enthousiastes pour toutes les innovations, ils en parlent dès qu'ils en ont connaissance :  $\sigma_{proactif}^{min} = \sigma_{publicite}$ . Comme cela apparaît dans les paramètres, les autres segments sont paramétrés à l'avenant, conformément aux observations de Rogers.

### Simulation et conclusions

La figure 7.14 présente les courbes d'adoption avec ces paramètres. L'évolution des représentations sociales, ainsi que les échanges d'information, sont qualitativement similaires à ceux de la précédente simulation. On notera que comparativement à la simulation précédente, le délai d'adoption de la population est significativement allongé ; ce constat est dû au fait que le segment de la majorité précoce adopte plus tardivement, ce qui retarde l'adoption des autres segments. Cette fois, on constate (tableau 7.13) que les premières adoptions des adoptants précoces n'ont plus lieu au même moment que celles des innovateurs. La courbe d'adoption de la majorité précoce est légèrement décalée par rapport à celle de la majorité tardive. Par contre, ce principe ne nous a pas permis de distinguer les retardataires de la majorité tardive. En effet, quand suffisamment d'information transite dans le système social, les niveaux d'information  $\sigma_{avis}$  et  $\sigma_{xp-indirecte}$  utilisés pour différencier ces segments sont tous deux présents dans la population.

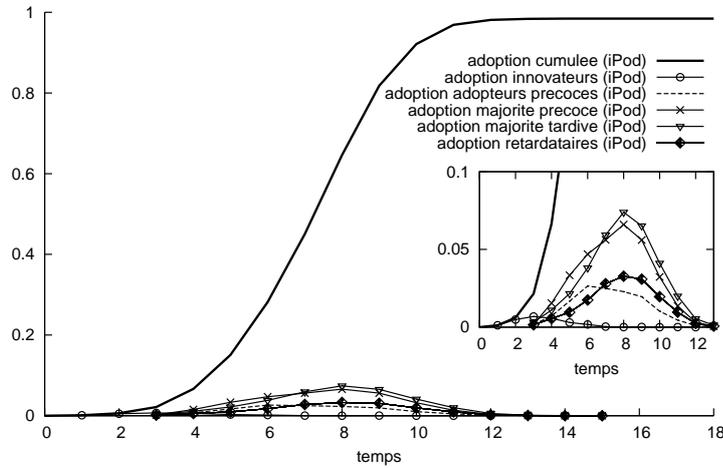


FIG. 7.14: Simulation représentative tenant compte de la crédibilité de l'information dans les fonctions comportementales.

segment	décollage	adoption massive	fin
innovateurs	0	3	7
adoptants précoces	3	6	12
majorité précoce	3	8	12
majorité tardive	3	8	13
retardataires	3	8	15

TAB. 7.13: Description quantitative des courbes d'adoption instantanée de chaque segment pour la figure 7.14

Ces simulations nous indiquent que la crédibilité des croyances permet de discriminer les décollages et adoption massive des segments d'adoptants (ici, les innovateurs et les adoptants précoces). Toutefois, cette crédibilité ne permet pas de différencier ces segments de façon significative dans le temps. Les courbes d'adoption instantanée de chaque segment demeurent fortement intriquées, démontrant que l'adoption de ces segments n'est pas entièrement déterminée par la crédibilité.

### 7.3.3 Différenciation de segments par les croyances préalables et la persuasion

#### Principe et paramètres

Pour Rogers, une innovation peut être incompatible avec les croyances préalables : certains segments possèdent des croyances solidement ancrées dans leur esprit, qui s'oppose à toute perception positive de l'innovation. Ces croyances peuvent être des peurs, des partis pris, des constats issus d'expériences précédentes, ou plus simplement une aversion générale envers la nouveauté (*cf* description des innovateurs de Rogers). Pour Rogers, ces croyances préalables *ralentissent l'adoption*, puisqu'un individu doit recevoir plusieurs informations indépendantes pour être persuadé et réviser ces croyances,

voire *empêcher l'adoption*. Ainsi, le principe “les grandes familles sont riches” des habitants Luo empêchait l'adoption de la pilule contraceptive. Logiquement, la présence de telles croyances devrait participer à la différenciation de segments.

Ces croyances préalables peuvent être décrites dans le modèle par l'introduction d'un nouveau niveau de support ayant une faible probabilité de révision, et l'utilisation d'ensembles d'exclusions pour définir les croyances incompatibles entre elles. Afin de comprendre l'impact de la probabilité de révision utilisée en paramètre, nous décrivons deux niveaux de support  $\sigma^{prealable}$  et  $\sigma^{prealable\_fort}$ , la première étant révisée plus facilement que la seconde (tableau 7.14). Notons que la publicité est considérée comme une information partisane sans aucune crédibilité, et ne peut pas participer à la révision des croyances préalables. Celles-ci, quand elles sont reçues par un interlocuteur, seront perçues comme un avis et non comme une expérience, l'interlocuteur étant supposé conscient qu'il s'agit d'une croyance générale et non d'une expérience directe (voir tableau 7.15).

La majorité tardive et les retardataires sont initialisés avec la croyance préalable définie en figure 7.12 (*droite*); ils estiment donc que par principe, un lecteur MP3 est difficile à utiliser et mène à une perte de temps. Ces croyances ont un support  $\sigma^{prealable}$  pour la majorité tardive et  $\sigma^{prealable\_fort}$  pour les retardataires. Les croyances incompatibles sont  $\Theta = \{\{\text{gain de temps, perte de temps}\}\}$ . La perte de temps constitue un poids négatif pour l'adoption de ces segments, mais aussi pour la majorité précoce; les pondérations d'adoption sont donc modifiées comme présenté en tableau 7.16.

### Simulation

La figure 7.15 présente un exemple représentatif de simulation avec ces paramètres. On constate que de nombreuses représentations sociales apparaissent pendant la simulation, dues aux différentes combinaisons de la publicité, des croyances expertes, de l'expérience et des peurs représentées. La représentation R1 correspond à l'*unawareness* et R7 à la perception positive complète de l'iPod. Les représentations R6 et R8 sont des exemples de métissage de croyances entre croyances préalables négatives liées à la technologie et information institutionnelle. Cette fois, le segment de la majorité tardive est nettement distingué de la majorité précoce, puisque ce segment nécessite maintenant plusieurs réceptions d'information pour oublier ses inquiétudes et se laisser persuader par les autres. Le segment des retardataires est également différencié de la majorité tardive par une résistance plus importante de ses croyances préalables. Une série de tests nous a toutefois démontré que la résistance des croyances des retardataires doit être très importante pour la distinguer du segment précédent; en effet, ce segment reçoit de nombreuses informations des segments précédents. En pratique, cette résistance permet de décaler faiblement l'adoption massive, mais surtout le temps de décollage de l'adoption du segment. Ces simulations nous prouvent à la fois que *les croyances préalables permettent de différencier les segments*, mais également que *le paramétrage de la résistance des croyances permet dans une certaine mesure, pour de mêmes motivations, de différencier des segments*.

	$\sigma_{publique}$	$\sigma_{oui-dire}$	$\sigma_{avis}$	$\sigma_{prealable}$	$\sigma_{prealable-fort}$	$\sigma_{xp-indirecte}$	$\sigma_{xp-directe}$
$\sigma_{publique}$	0.9 (2)	0.369 (10)	0.206 (20)	0 (-)	0 (-)	0.109 (40)	0.109 (40)
$\sigma_{oui-dire}$	1.0 (1)	0.9 (2)	0.601 (5)	0.045 (100)	0 (-)	0.369 (10)	0.109 (40)
$\sigma_{avis}$	1.0 (1)	1.0 (1)	0.9 (2)	0.109 (100)	0.045 (100)	0.601 (5)	0.109 (40)
$\sigma_{xp-indirecte}$	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	0.109 (100)	0.109 (40)	0.9 (2)	0.109 (20)
$\sigma_{xp-directe}$	1.0 (1)	1.0 (1)	1.0 (1)	0.9 (2)	0.9 (2)	1.0 (1)	0.9 (2)

TAB. 7.14: probabilité de révision d'une croyance avec support  $\sigma^{old}$  (*en haut*) par une information de crédibilité perçue  $\sigma^{new}$  (*à gauche*). Entre parenthèses, le nombre de réceptions d'information nécessaires pour que la révision ait 99% de chances d'être révisée.

crédibilité reçue	crédibilité perçue
$\sigma_{publique}$	$\sigma_{publique}$
$\sigma_{oui-dire}$	$\sigma_{oui-dire}$
$\sigma_{avis}$	$\sigma_{oui-dire}$
$\sigma_{background}$	$\sigma_{avis}$
$\sigma_{prealable}$	$\sigma_{avis}$
$\sigma_{prealable-fort}$	$\sigma_{avis}$
$\sigma_{xp-indirecte}$	$\sigma_{avis}$
$\sigma_{xp-directe}$	$\sigma_{xp-indirecte}$

TAB. 7.15: Filtrage de support lors de la réception des messages ; décrit la croyance qui sera subjectivement perçue et utilisée pour la révision des croyances (à droite) pour une croyance étant donnée la crédibilité reçue dans le message (à gauche).

segments	$\sigma_{decision}^{min}$	poids des concepts dans l'adoption $w : \mathcal{C} \mapsto \mathbb{R}$			
		"nouveau"	"performance"	"gain de temps"	"perte de temps"
innovateurs	$\sigma_{publique}$	1.0	0	0	0
adoptants précoces	$\sigma_{oui-dire}$	0	1.0	0	0
majorité précoce	$\sigma_{avis}$	0	1.0	0	-1.0
majorité tardive	$\sigma_{xp-indirecte}$	0	0	1.0	-1.0
retardataires	$\sigma_{xp-indirecte}$	0	0	1.0	-1.0

TAB. 7.16: Paramètres de la fonction d'adoption de chaque segment :  $\sigma_{decision}^{min}$  la crédibilité nécessaire d'un concept pour que sa présence soit prise en compte, et poids des motivations associées à chaque concept présent et crédible.

paramètre	valeur
<b>population</b> taille de la population agents exogènes	$ \mathcal{A}^{adopt}  = 50000$ $\mathcal{A}^{exo} = (publicite, experience)$
<b>segments</b> segments proportion de chaque segment	$\mathcal{S} = \{\text{innovateurs, adoptants precoces, majorite precoce, majorite tardive, retardataires}\}$ conforme à la table 7.5
<b>croyances</b> concepts représentés objets sociaux ensembles d'exclusion niveaux de support probabilité de révision perception subjective	$\mathcal{C} = \{\text{iPod, 4Go, 1000sons, nouveau, design, lecteur MP3, ergonomie, gain de temps, confort}\}$ $\mathcal{O} = \{iPod\}$ $\Theta = \{\{\text{gain de temps, perte de temps}\}\}$ $\Sigma = \{\sigma^{publicite}, \sigma^{oui-dire}, \sigma^{avis}, \sigma^{xp.indirecte}, \sigma^{xp.directe}\}$ voir table 7.14 voir table 7.15
<b>informations exogènes</b> messages envoyés par la publicité et l'expérience probabilité d'exposition à la publicité probabilité d'exposition à l'expérience durée de la campagne publicitaire	voir figure 7.12 $p^{pub} = 0.05$ (homogène) $p^{experience} = 1$ (si le récepteur a adopté) 5 pas de temps
<b>structure des interactions interpersonnelles</b> structure des interactions probabilité d'interaction interpersonnelle	générateur de Watts-Strogatz ou Barabasi-Albert uniforme et systématique : $p^{interact} = 1$
<b>comportement de communication</b> temps de proactivité temps de recherche d'information fonction d'émission proactive d'information fonction de recherche d'information	$d^{proactif} = 1$ $d^{recherche} = 1$ voir table 7.12 voir table 7.11

TAB. 7.17: Paramètres utilisés pour simuler l'adoption de l'iPod par des segments distincts.

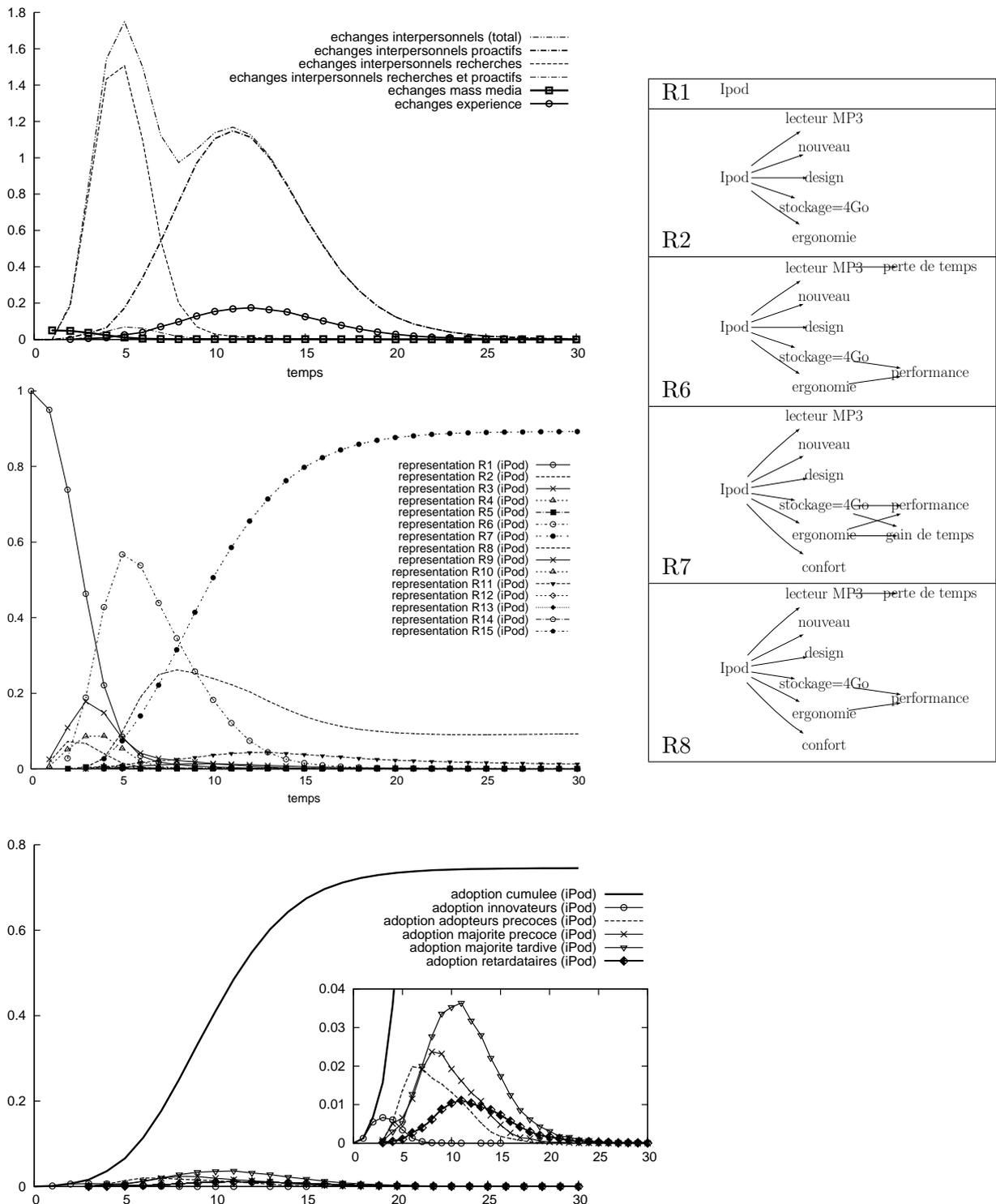


FIG. 7.15: Exemple représentatif de simulation de diffusion d'innovation en représentant des croyances négatives envers la technologie. Les principales représentations sociales apparaissant pendant la simulation sont présentées à droite.

Notons que la représentation R8, négative et empêchant l'adoption de l'innovation, demeure présente à environ 10% de la population. La représentation R11, également négative, est plus faiblement représentée à 5%. Ces quantités cumulées révèlent une perception négative de l'innovation pour environ 15% de la population, qui explique la plus faible diffusion de l'innovation que dans les expériences précédentes (moins de 80% d'adoption). Notons également qu'avec ces paramètres, la diffusion de l'innovation est sensiblement plus lente.

De façon surprenante, la représentation R6 dépasse son maximum attendu : seuls la majorité tardive et les retardataires sont initialisés avec ces croyances préalables, représentant 50% de la population, tandis que la représentation R6 atteint 67% de la population. Cet effet inattendu est provoqué par la récupération de l'information des majorité tardive et retardataires par les segments précédents. Ainsi, *les individus qui ont une croyance négative adoptent eux-mêmes plus lentement, mais influencent également les autres avec des croyances négatives*. Il s'agit ici d'un bouche à oreille négatif, qui n'est pas totalement compensé par le retour d'expérience positif avec le produit. Dans la simulation présentée en figure 7.15, les croyances préalables sont subjectivement perçues par les autres agents comme des avis interpersonnels simples ( $\sigma^{avis}$ ), qui seront facilement révisés. D'autres simulations avec des niveaux de crédibilité perçus plus forts ( $\sigma^{xp\_indirecte}$ ) ou plus faibles ( $\sigma^{oui-dire}$ ) ne montrent pas de différence significative dans la dynamique d'adoption.

### Apports

*Les croyances préalables participent à la distinction de segments ; elles peuvent déterminer l'adoption ou la non-adoption d'une innovation. Toutefois, ces paramètres ne permettent pas de décrire l'apparition d'une adoption séquentielle des segments. La probabilité de révision des croyances, si elle provoque une adoption plus tardive d'un segment quand elle est faible, ne permet pas de distinguer clairement plusieurs segments entre eux ; le modèle s'avère donc peu sensible à une différence dans une probabilité de révision faible.*

Cette expérimentation démontre que *le modèle peut être paramétré pour représenter des croyances préalables empêchant, ou ralentissant, l'adoption d'une innovation*. Nous avons modélisé ici la présence de croyances préalables dont la crédibilité est paramétrée de telle façon que ces croyances sont difficiles à réviser. Cette description tient en réalité compte de la pression informationnelle de l'entourage social des agents. D'une certaine façon, le modèle s'assimile alors à un modèle à seuil, le seuil étant ici la probabilité de révision des individus - à la différence notable de la récupération ou émission d'information motivée, sans influence systématique de l'entourage.

### 7.3.4 Proportions de promoteurs et curieux

#### Paramètres

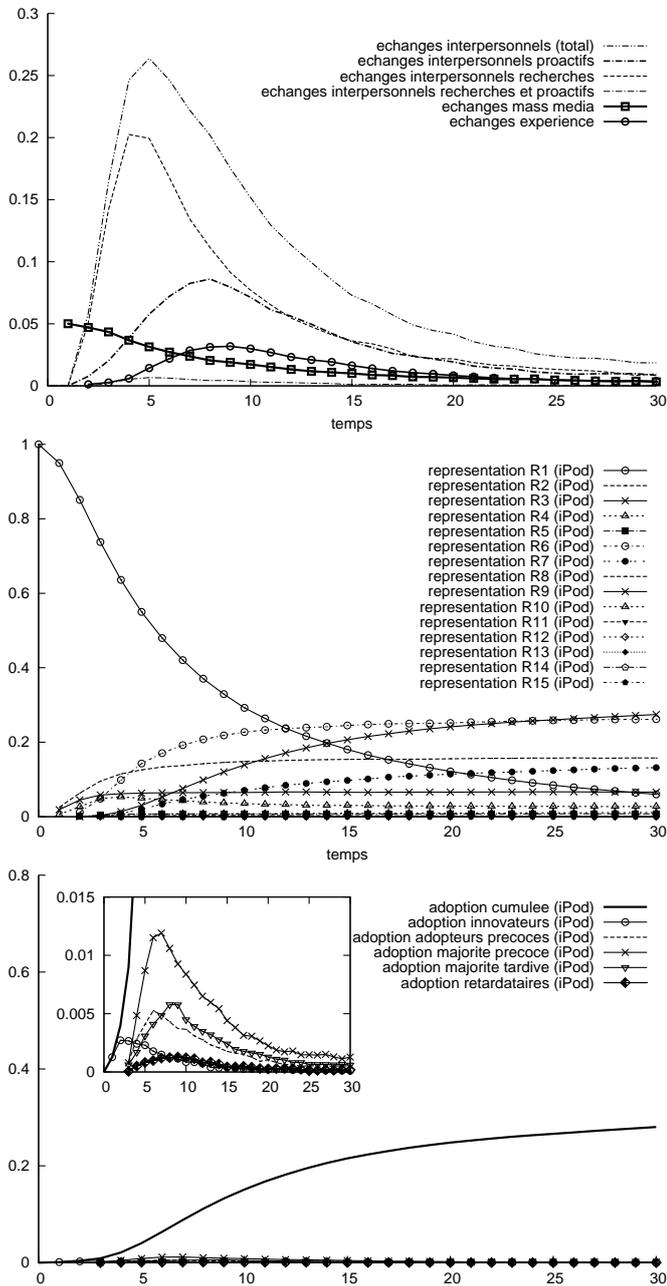
Jusque maintenant, nous avons supposé que tous les agents de chaque segment émettent proactivement de l'information sur un objet ou recherchent de l'information pour cet objet. Cela correspond au modèle manichéen de communication systématique, avec une proportion de promoteurs et de curieux égale à 1. Nous étudions ici la dynamique d'adoption dans le cas où chaque segment contient une proportion plus ou moins importante d'individus promoteurs et curieux. Nous commençons par un paramétrage inspiré des observations de Rogers sur les différents segments. Ainsi, la plupart des innovateurs sont curieux et recherchent de l'information sur les nouveautés, tandis que les retardataires sont assez peu curieux et moins communicatifs sur des sujets qui les intéressent peu. Les niveaux de crédibilité utilisés dans les fonctions comportementales de recherche et d'émission d'information sont identiques à celles des expériences précédentes, ainsi que les croyances préalables.

#### Simulation : effet de seuil

La figure 7.16 propose un exemple de simulation compatible avec les observations qualitatives de Rogers (voir paramètres sur cette figure). On observe que le temps de diffusion est plus long, car moins d'adoptants potentiels reçoivent l'information suffisante pour l'adoption. En particulier, les segments qui avaient des croyances préalables opposées à l'adoption (majorité tardive et retardataires) ne reçoivent pas assez d'information pour réviser leurs propres croyances. Le taux d'adoption est donc plus faible. Contrairement à ce que nous observions par exemple en figure 7.15, un grand nombre de représentations sociales coexistent, sans polarisation sur l'une de ces représentations, car les interactions interpersonnelles ne sont plus assez nombreuses pour conduire à la diffusion et à la révision des croyances. La courbe d'adoption cumulée est maintenant très progressive ; au départ, les interactions interpersonnelles provoquent des cascades d'information de taille limitée, puis seules des cascades locales provoquées par la publicité apparaissent. En d'autres termes, il n'y a plus percolation dans la population, le nombre d'individus recherchant ou émettant l'information n'étant plus suffisamment nombreux.

La dynamique de ce modèle dans cet espace de paramètres peut être interprétée comme le modèle épidémique avec recherche d'information décrit précédemment (7.2.3 page 152). La proportion globale d'agents proactifs et curieux, cumulée pour tous les segments, détermine l'atteinte ou non d'un seuil épidémique. Trois cas sont possibles :

- Cette figure 7.16 présente un **cas de transition** : il n'y a pas percolation dans le graphe, l'adoption dans la population est partielle, les cascades d'information demeurent limitées et l'adoption à long terme est portée par la publicité. Néanmoins, le nombre d'agents communiquant est suffisamment important pour qu'il existe quelques cascades, avec une brève diffusion exponentielle pendant les premiers pas de temps. L'adoption instantanée de chaque segment conserve une



	<b>promoteurs</b>	<b>curieux</b>
innovateurs	0.8	0.8
adoptants précoces	0.5	0.5
majorité précoce	0.2	0.2
majorité tardive	0.05	0.05
retardataires	0.01	0.01

FIG. 7.16: Exemple représentatif de diffusion d'innovation avec des agents promoteurs et curieux plus ou moins nombreux pour chaque segment.

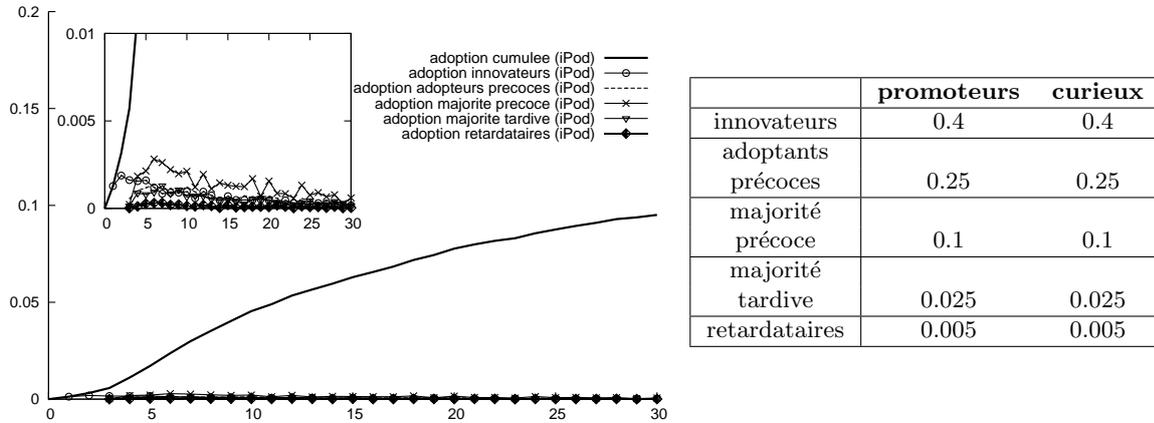


FIG. 7.17: Exemple représentatif de diffusion d'innovation avec des agents promoteurs et curieux plus ou moins nombreux pour chaque segment, ces proportions étant moitié moindres que celles de la figure 7.16

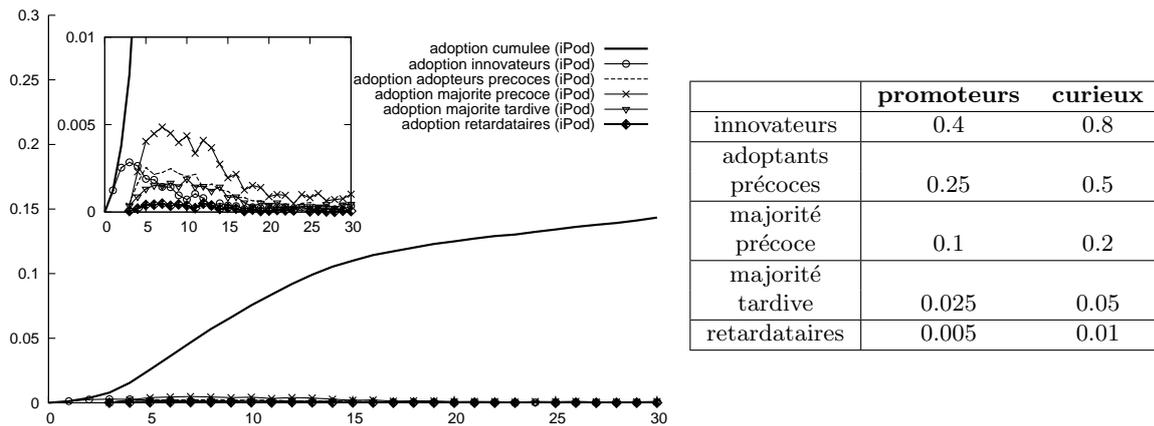


FIG. 7.18: Exemple représentatif de diffusion d'innovation avec moitié moins d'agents promoteurs que d'agents curieux.

apparence identique, mais chacune de ces courbes décroît très lentement, car des agents de chaque segment sont atteints tardivement par l'information.

- La figure 7.17 dépeint un cas de diffusion **en dessous du seuil de diffusion**. Il n'existe quasiment pas de croissance exponentielle de la courbe d'adoption cumulée. Les adoptants initialisés avec des croyances négatives n'adoptent pas, faute de recevoir l'information suffisante pour compenser leurs inquiétudes. Le nombre d'individus-relais dans la population est insuffisant pour autoriser l'apparition de cascades d'information. Aucune segmentation n'est identifiable sur les courbes d'adoption instantanées.
- **Au dessus du seuil** de diffusion, on observe une large diffusion similaire à celle présentée précédemment en figure 7.15 : diffusion exponentielle au départ et proportion d'adoptants élevée.

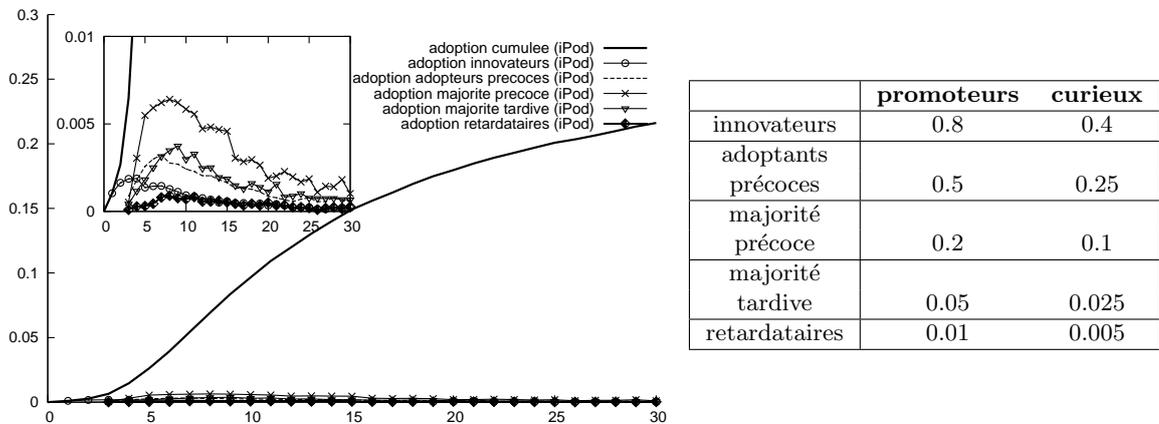


FIG. 7.19: Exemple représentatif de diffusion d'innovation avec moitié moins d'agents curieux que d'agents promoteurs.

### Simulation : segmentation et activité communicationnelle

Les expérimentations menées avec des proportions différentes de promoteurs et de curieux pour chaque segment conduisent à des résultats prévisibles. Quand un segment B requiert une information qui peut être émise seulement par un ou plusieurs segments A, les recherches et émissions d'information jouent des rôles similaires. D'une part, l'augmentation (ou la diminution) de la proportion de promoteurs dans A augmente (respectivement diminue) la vitesse et la proportion d'adoptants dans B. D'autre part, l'augmentation (resp. diminution) de la proportion de curieux dans B augmente (respectivement diminue) vitesse et proportion d'adoptants dans B. La recherche d'information dans B permet donc de compenser l'absence d'émission proactive d'information chez A. Cette observation générique doit être raffinée en fonction des motivations de chaque segment ; un segment B qui chercherait de l'information pour un attribut donné de l'innovation pour lequel A ne parle pas proactivement ne peut trouver d'information que par recherche. En variant les proportions de promoteurs et curieux de chaque segment, il est possible de retarder légèrement l'adoption massive d'un segment dans le cas où ce segment requiert une information envoyée par les segments précédents.

### Simulation : impact de la durée de recherche et d'émission

Nous avons constaté en (7.2.3) que la recherche et l'émission proactive d'information jouaient des rôles différents dans la diffusion de croyance : la curiosité avait alors été identifiée comme une force plus puissante que l'émission proactive d'information. Afin d'illustrer cette différence dans cette étude de segmentation, nous réutilisons l'expérimentation de la figure 7.16, et comparons les résultats avec moitié moins de promoteurs (figure 7.18) ou moitié moins de curieux (figure 7.19), la proportion de curieux et promoteurs pour chaque segment demeurant identique. De façon générale, on observe que *la diffusion est plus rapide et plus complète avec moins de curieux qu'avec moins de promoteurs*. Cette différence de dynamique avec nos observations préliminaires s'explique principalement par la prise en compte de la crédibilité des

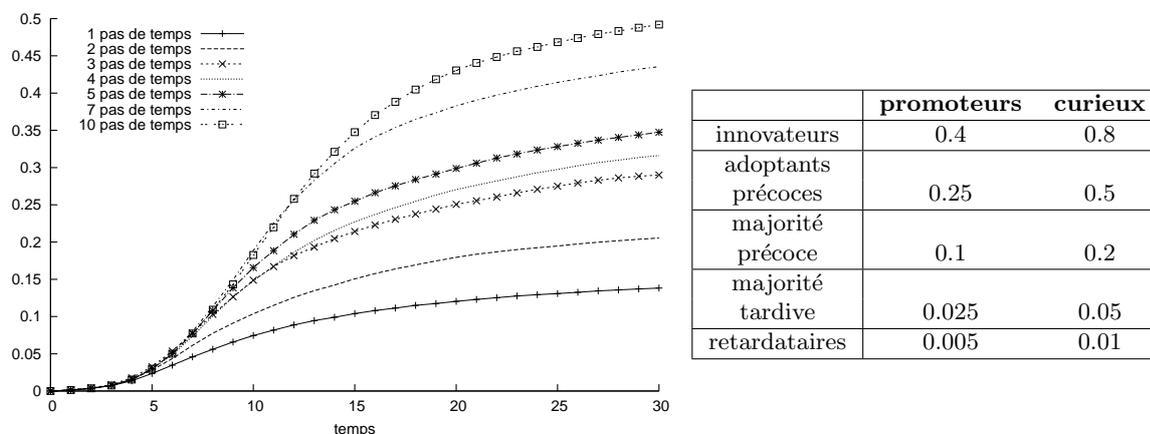


FIG. 7.20: Adoption cumulée pour tous les segments dans le temps, avec différentes durées de recherche d'information, pour une durée de proactivité de 1 et les proportions de curieux et promoteurs indiquées à droite.

croyances. Supposons un agent A qui attend une crédibilité élevée pour adopter. En cherchant de l'information, l'agent A a une faible chance d'interroger un voisin B qui dispose déjà de l'information avec cette crédibilité. Au contraire, l'émission proactive d'information se fait généralement quand l'individu B dispose d'une expérience avec le produit, auquel cas l'agent A recevra immédiatement l'information avec le support de croyances nécessaire et suffisant pour adopter. Plus précisément, si nous considérons que la recherche et la durée d'information sont toutes deux d'un pas de temps, la recherche d'information est moins efficace que l'émission proactive d'information pour conduire à l'adoption.

Cette nuance nous conduit à l'examen d'un paramètre que nous avons jusque maintenant délaissé : les durées de recherche d'information et d'émission d'information, qui définissent pendant combien de temps un objet social demeure saillant. Pour l'instant, nous supposons qu'un individu qui émet de l'information sur le produit le fait pendant 1 pas de temps (une semaine). Par contre, il est probable que la recherche d'information dure plusieurs semaines. La figure 7.20 présente plusieurs courbes d'adoption pour des valeurs différentes de durée de recherche d'information. On constate qu'une recherche d'information plus longue permet de récupérer plus sûrement des informations d'un voisin, puisque ce voisin adoptera peut-être l'innovation pendant cette période de recherche. Quand la durée de recherche d'information est supérieure à 3, la recherche d'information devient aussi efficace que la simulation avec moitié moins de curieux. A l'issue de ces expérimentations, il apparaît donc que *la recherche d'information peut jouer un rôle aussi important ou plus important que l'émission proactive d'information si la durée de recherche d'information est suffisamment longue.*

### Apports

Ces simulations prouvent que les proportions de curieux et de promoteurs propres à chaque segment peuvent participer à l'apparition de segments dans la population, cette différenciation demeurant néanmoins assez peu marquée, influençant la vitesse d'adoption de chaque segment et non le premier pas de temps d'adoption. Ces proportions modifient également le seuil de diffusion du système social. La prise en compte des durées de recherche et d'émission d'information doit cette fois être prise en compte, et devrait donc être collectée sur le terrain, afin de disposer d'un ordre de grandeur plausible pour le paramétrage. Notons que la probabilité d'interactions interpersonnelle influence également le seuil de diffusion. Cette probabilité augmente aussi la sensibilité de la dynamique aux durées de recherche et d'émission d'information ; en effet, si une interaction entre deux agents est moins probable, l'augmentation de la durée de saillance d'un objet offre davantage d'opportunités d'échanges entre ces agents.

#### 7.3.5 Effet des autres paramètres

##### Taille de la population

La taille de la population n'a pas d'impact notable sur les simulations. Bien sûr, quand la population est plus grande, les courbes sont plus lisses, les effets locaux tels que la rencontre d'une cascade d'information avec un nouveau cluster étant compensés par d'autres phénomènes locaux inverses. Il existe également un seuil minimum de population (ici, au moins 500 agents) qui permet de générer la population hétérogène en représentant toutes les combinaisons possibles d'agents sur le réseau d'interaction (agents innovateurs apparaissant aléatoirement à côté de retardataires, de majorités tardives ou précoces, etc.). L'absence de modification profonde de dynamique liée à la taille de la population est due à l'absence de sensibilité des propriétés de la structure d'interactions (distance moyenne entre deux agents, densité, etc.) et à la taille de population.

##### Exposition aux canaux de masse

L'exposition aux canaux de masse est dite différente par Rogers pour les différents segments. Etant donné notre modèle, la réception d'un message par un canal de masse permet essentiellement d'attirer la curiosité d'un adoptant/consommateur et de provoquer la recherche d'information. Rappelons que par paramétrage, la publicité peut tenir deux rôles. (i) Pour les segments qui se contentent du contenu et de la crédibilité de la publicité pour adopter, la publicité permet de *faire adopter et créer une source d'information*, et potentiellement de faire apparaître une cascade informationnelle. Pour ces segments, la publicité permet donc de faire adopter plus ou moins rapidement chaque segment, ce qui se traduit concrètement par une adoption massive plus précoce quand l'exposition augmente. (ii) Par contre, pour les segments qui exigent un contenu et/ou une crédibilité différents de la publicité, la publicité ne peut pas provoquer d'adoption immédiate, et permet uniquement de *provoquer une recherche d'information*. Cette recherche d'information est susceptible de pallier une trop faible proportion d'agents

promoteurs dans les segments qui adoptent plus tôt, ce qui se traduit également par une adoption massive plus précoce du segment. En aucun cas l'exposition ne peut modifier le premier pas de temps auquel un segment commence à adopter.

L'influence du paramètre d'exposition d'un segment à un canal de masse dépend de l'atteinte, ou non, de la masse critique qui permet la propagation d'information par la seule communication interpersonnelle :

- au dessus du seuil épidémique, c'est-à-dire s'il existe une proportion d'agents promoteurs et curieux suffisamment importante pour que l'information se propage par la communication interpersonnelle dans toute la population, la probabilité d'exposition d'un segment à la communication de masse a peu d'importance ; l'awareness et l'obtention d'une information dont la crédibilité et le contenu permettent l'adoption sont assurées par la communication interpersonnelle. L'exposition des segments autres que les innovateurs ou majorité précoce, dont la proportion détermine l'information interpersonnelle disponible au départ, est donc sans importance.
- dans la zone de transition, dans laquelle une propagation d'information interpersonnelle permet à une majorité de la population d'adopter sans permettre une adoption totale, l'exposition à la publicité d'un segment permet de modifier la vitesse d'adoption du segment ainsi que la proportion d'agents qui adopteront finalement. La présence de publicité permet alors de *faciliter la communication interpersonnelle*.
- en dessous de la zone de transition, dans laquelle seules des cascades informationnelles extrêmement limitées apparaissent, la communication interpersonnelle étant insuffisante pour provoquer une adoption massive. Dans ce cas, la diffusion de l'innovation est essentiellement portée par la publicité ; *l'exposition détermine alors la vitesse d'adoption et la proportion d'adoptants*.

### 7.3.6 Discussion sur la segmentation

#### Résumé des simulations

Nous avons paramétré le comportement communicationnel et les croyances de nos agents en nous basant sur les facteurs discriminants proposés par Rogers pour chacun de ses segments. Nous avons successivement étudié l'adoption instantanée de chacun des segments en les différenciant par les motivations (7.3.1), les attentes de support (7.3.2), les croyances préalables impliquant une persuasion (7.3.3) et les proportions d'agents promoteurs et curieux propres à chaque segment (7.3.4). D'autres paramètres tels que l'exposition aux canaux de masse ont également été étudiés (7.3.5).

Nous avons constaté que *chacun de ces facteurs participe à la différenciation des périodes d'adoption des segments dans le temps*, que ce soit en modifiant le pas de temps du décollage, le maximum d'adoption massive et/ou la fin de l'adoption.

Néanmoins, *aucune combinaison de ces facteurs ne permet de faire apparaître une adoption séquentielle des segments* ; en testant différentes combinaisons, nous avons uniquement pu distinguer nettement les innovateurs des autres segments. De façon plus inattendue, nous avons même constaté que si le modèle n'est pas paramétré de façon à atteindre la masse critique d'adoptants, les segments sont totalement intriqués. L'impossibilité de reproduire l'adoption séquentielle décrite par Rogers à l'aide des facteurs discriminants qu'il propose appelle évidemment à une réflexion sur cette segmentation.

### Comparaison avec la réalité

Le cas de la simulation de l'iPod est un cas extrêmement stylisé, qui ne vise pas à reproduire un phénomène réel. On peut néanmoins être surpris du faible taux d'adoption observé avec des paramètres comportementaux optimistes au regard de la réalité (proportion de promoteurs et de curieux, interaction systématique, adoption immédiate, retour d'expérience positif). Ce résultat est dû au nombre très faible de contacts entre les agents, qui sont dans ces expérimentations liés en moyenne à 4 voisins. Dans la réalité, la connectivité est beaucoup plus élevée (au moins plusieurs dizaines de rencontres pour un produit comme l'iPod). Cette différence avec la réalité explique l'importante différence de dynamique. Ici encore, nous constatons le rôle important du réseau d'interaction dans les résultats finaux.

### Discussion sur la segmentation de Rogers

Les segments de Rogers sont des idéalizations [Rogers, 2003, p. 282] basées sur des observations réelles, qui semblent pertinents et sont considérés comme tels dans la littérature. Toutefois, l'importance relative de ces facteurs discriminant ces segments n'est pas identifiée par Rogers. Par simulation, nous avons constaté que *les facteurs liés à la communication et aux croyances définis par Rogers participent à la différenciation de segments*, puisqu'ils permettent en pratique de distinguer des segments. Par contre, l'impossibilité de reproduire une adoption réellement séquentielle des segments prouve que *ces facteurs de communication ne permettent pas, à eux seuls, de discriminer des segments*. Ce constat ouvre plusieurs possibilités pour l'interprétation de la segmentation de Rogers.

L'interprétation la plus conciliante avec Rogers est que les segments sont probablement différenciés par les autres facteurs qu'il énonce et que nous n'avons pas pris en compte. La *position sur le réseau d'interactions* semble influencer grandement le moment auquel un individu adopte ; la preuve en est l'adoption d'innovateurs après la majorité, alors que tous les paramètres leur autorisent une adoption dès les premiers instants de la diffusion. Dans nos simulations, un agent d'un segment peut être lié à des voisins appartenant à n'importe quel segment (par

exemple, des innovateurs liés à des retardataires). Mais même en supprimant cette possibilité, la distance entre un innovateur et un retardataire demeurera faible, conformément aux observations sociologiques sur la distance moyenne  $M$  entre les individus [Milgram, 1967, Kochen, 1989, Wasserman et Faust, 1994a]. Même en respectant cette contrainte, les premiers retardataires adopteront donc l'innovation seulement après  $M$  pas de temps. Ce facteur, ajouté aux autres paramètres, aura donc un impact très limité sur la différenciation des segments.

Rogers mentionne également des *contraintes sur l'adoption différentes pour les segments*, les retardataires disposant de ressources limitées qui ne leur permettent pas d'adopter rapidement. Rogers illustre sa segmentation avec des délais d'adoption qui s'échelonnent de quelques mois à quelques années, observés sur un cas particulier de diffusion d'innovation. Un tel délai d'adoption ne peut pas s'expliquer uniquement par l'obtention d'informations au contenu ou à la crédibilité donnée, ni par la persuasion. Il est probable que certains adoptants sont favorables à l'innovation sans pouvoir l'adopter immédiatement, devant attendre longtemps la disponibilité d'un budget ou simplement le temps nécessaire. Une telle adoption doit être décrite dans un modèle de diffusion d'innovation par l'introduction d'un paramètre explicite de délai d'adoption propre à chaque segment. En d'autres termes, *les facteurs décrits par Rogers, liés aux croyances et à la communication, ne sont pas suffisants pour expliquer les délais d'adoption, ce qui explique l'impossibilité de décrire une adoption séquentielle sans prendre en compte d'autres paramètres non détaillés par Rogers.*

On peut également considérer que *les segments de Rogers ignorent des facteurs exogènes qui participent à l'apparition de cette segmentation* ; elle est présentée en quelques lignes synthétiques, et ne prétend pas à l'exhaustivité. Parmi les facteurs non énoncés par Rogers, on pourrait souligner *l'évolution de l'innovation elle-même dans le temps*. Dans les premiers mois, un produit est généralement coûteux, puis son prix baisse, le rendant peu à peu accessible à davantage d'individus. C'est le cas également pour d'autres innovations, comme la pilule contraceptive qui a été améliorée avec le temps pour réduire ses effets secondaires. On considère aussi généralement que l'adoption d'une innovation se fait par choix libre ; or, dans de nombreux cas de diffusion - en particulier pour les produits - l'adoption n'est pas un choix mais une contrainte, une innovation suffisamment répandue faisant disparaître les alternatives du marché. Il est donc possible que *les segments apparaissent par des contraintes sur l'adoption propres à chaque segment, qui ne sont satisfaites que par une lente évolution de l'innovation elle-même.*

En réalité, quelles que soient les contraintes d'adoption d'un segment, il existera toujours quelques agents qui seront exposés à des segments adoptant plus tôt, qui leur fourniront rapidement l'information et la persuasion nécessaire à l'adoption. Seule une combinaison complexe de paramètres permettrait de différencier nette-

ment les retardataires : attente d'une information qui ne serait perçue que par la majorité tardive, opposée à une croyance préalable très difficile à réviser. Une telle combinaison de paramètres semble assez irréaliste. L'impossibilité de décrire un début d'adoption tardif pour un segment tel que les retardataires n'est donc pas due à une limitation du modèle, mais à une invraisemblance dans la notion d'adoption séquentielle des segments. Il faut reconnaître que Rogers ne détaille pas précisément comment ses segments ont été identifiés sur des données de terrain. Si les facteurs explicatifs d'adoption plus ou moins tardive (existence de croyances préalables contradictoires ou compréhension de l'information institutionnelle) ont été identifiés dans de nombreuses études indépendantes, l'adoption séquentielle n'a été quantifiée (à notre connaissance) que par Rogers lui-même. Les segments semblent davantage distingués par l'adoption de l'individu dans le temps que par les autres paramètres - la dénomination même des segments fait référence à la séquence d'adoption, et non à d'autres paramètres du segment. *Il est donc possible que l'image de segments adoptant séquentiellement soit purement fausse*, correspondant à une idéalisation excessive basée sur une segmentation *a posteriori* de la population, ou à une présentation simplifiée de la réalité visant à faciliter la communication d'observations plus complexes.

## 7.4 Illustration de la descriptivité de CoBAN

### 7.4.1 Marketing évènementiel

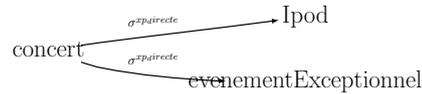


FIG. 7.21: Information introduite dans la population sur l'évènement “concert” lié à l'iPod.

Supposons que la diffusion d'iPod se fasse avec les paramètres proposés pour l'expérimentation (7.3.3), c'est-à-dire des proportions différentes de curieux et promoteurs, des contraintes d'adoption propres à chaque segment, des croyances préalables opposées à l'adoption et la perception positive de l'innovation par l'expérience. Avec ces paramètres, nous avons observé une adoption d'environ 30% de la population. Quasiment toute la population connaît l'existence de l'innovation (courbe R1 de la figure 7.16). Toutefois, de nombreuses perceptions positives ou négatives de l'iPod subsistent dans la population, la communication interpersonnelle étant insuffisante pour faire converger ces représentations éparses vers une unique représentation. Pourtant, l'expérience avec l'iPod est positive; si suffisamment de consommateurs étaient promoteurs ou curieux, le bouche à oreille propagerait une image positive de l'innovation et l'innovation serait largement adoptée.

Afin de faire parler d'un produit, la solution couramment utilisée est de faire parler d'un objet social relatif à l'innovation. Il peut s'agir d'une publicité amusante qui devient elle-même objet social (pratique de marketing viral), ou de créer un évènement lié à l'innovation (marketing évènementiel) : rassemblement sportif, concerts, exposition, etc. L'idée est que la proportion de consommateurs propageant cet évènement est plus importante que celle de promoteurs du produit lui-même. La description de cette stratégie dans CoBAN est simple. Nous ajoutons l'objet social “concert” qui représente un évènement exceptionnel. L'information sur l'évènement (figure 7.21) est transmise par l'agent publicité pendant l'unique pas de temps 30, chaque agent ayant une probabilité  $exp^{publicite} = 0.05$  de le recevoir. Supposons qu'un quart des adoptants potentiels discute proactivement des objets sociaux rattachés au concept “évènement exceptionnel”, indépendamment de leur segment.

Un exemple de simulation est présenté en figure 7.22. Au pas de temps 30, l'information sur l'évènement est envoyée dans la population. Les interactions interpersonnelles diffusent l'information sur l'évènement. L'information sur le concert se diffuse dans la population, s'associant avec les représentations de l'iPod présentes dans la population. A partir de ce moment, quand un individu parle de l'évènement, il échange également ses croyances sur l'iPod. On observe donc une évolution des représentations

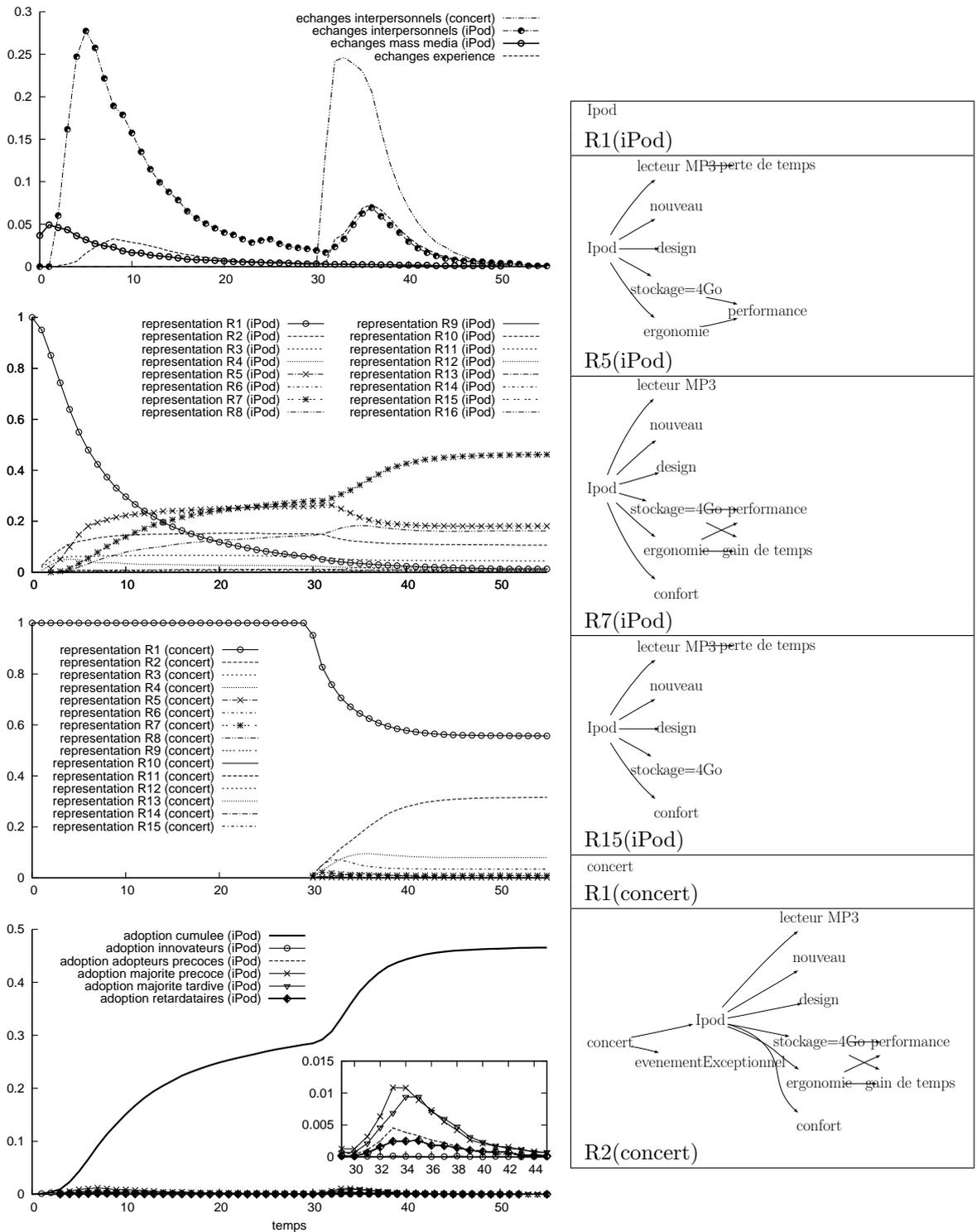


FIG. 7.22: Impact d'une campagne de marketing évènementiel sur les croyances sur une innovation et son adoption. L'information sur l'évènement - illustré ici par un concert - est émise au pas de temps 30.

sociales de l'iPod ; la représentation R7 (perception positive) remplace progressivement la représentation R5 (négative). Cette évolution dans l'image subjective de l'iPod conduit d'ailleurs à des adoptions de chaque segment.

*Le modèle CoBAN permet donc de décrire simplement la diffusion du marketing événementiel, et plus largement la diffusion de croyances sur des objets sociaux liés.* Pour qu'un événement provoque un gain d'information sur une innovation, il est nécessaire que la proportion des individus parlant de cet événement soit plus importante que celle portant sur l'innovation elle-même, ou au moins qu'il s'agisse d'individus différents. Dans un cas réel de diffusion, il est rare qu'un unique objet social provoque la communication sur une innovation. En étudiant les discussions sur la contraception au Kenya, on identifie bien sûr la pilule contraceptive elle-même, le besoin de contraception, la catégorie des moyens contraceptifs, ainsi que les anecdotes réelles ou imaginaires des expériences d'adoptants sur l'innovation. Le processus de modélisation attire notre attention sur la *nécessité d'observer non seulement les communications liées à l'innovation elle-même, mais aussi les discussions sur des objets sociaux liés.* En particulier, lors de la collecte d'information, un questionnaire ne devrait pas se focaliser uniquement sur les interlocuteurs sur la pilule contraceptive, mais tous les objets sociaux auxquels sont potentiellement rattachées des croyances intervenant dans la perception et l'adoption de l'innovation. Dans l'exemple du Kenya, une analyse rigoureuse nécessiterait de questionner les sujets sur les discussions à propos de la contraception, de la pilule contraceptive, et de leur perception des grandes et petites familles.

Notons qu'avec une proportion de 25% de promoteurs pour cette information, et sur un réseau d'interaction de Watts Strogatz de degré moyen 8, le seuil épidémique devrait être atteint et toute la population touchée par cette information. Or, la proportion d'individus possédant une information sur l'évènement est seulement de 55% dans cette simulation. Cette différence importante est due à la définition de seuils de crédibilité requis pour transmettre des informations (*cf* paramétrage segmentation). En pratique, l'information reçue avec une forte crédibilité possédée par A est transmise à un autre agent B qui la perçoit avec une plus faible probabilité ; B la transmet à C qui perçoit une crédibilité encore inférieure, etc. *La propagation purement épidémique d'information est donc bien affectée par la présence dans la population d'individus qui ne relaient que des informations qu'ils considèrent comme suffisamment crédibles*, ce qui conduit concrètement à une élévation du seuil épidémique.

Ces simulations font également apparaître l'inconvénient de l'un de nos choix de modélisation : la transmission de tout lien lors de la communication provoque la diffusion systématique de l'information que possède un sujet sur l'iPod s'il parle du concert lié. En pratique, cette association serait seulement probable, mais non certaine. Afin de décrire réellement de telles pratiques de marketing événementiel, il faudrait donc prendre en compte un paramètre de saillance des liens qui interviendrait dans la probabilité de transmission, ou non, d'un lien.

## 7.4.2 Diffusion d'innovations interdépendantes

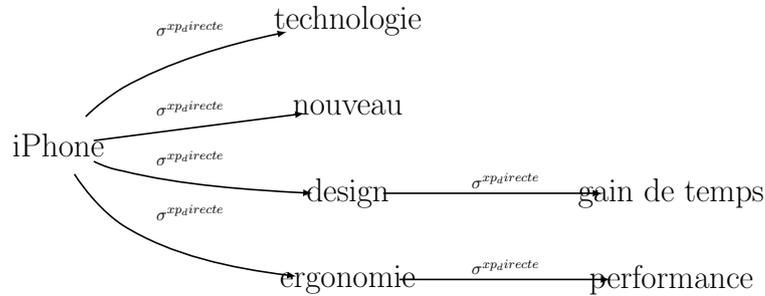


FIG. 7.23: Publicité envoyée à partir du temps 30 pour l'iPhone.

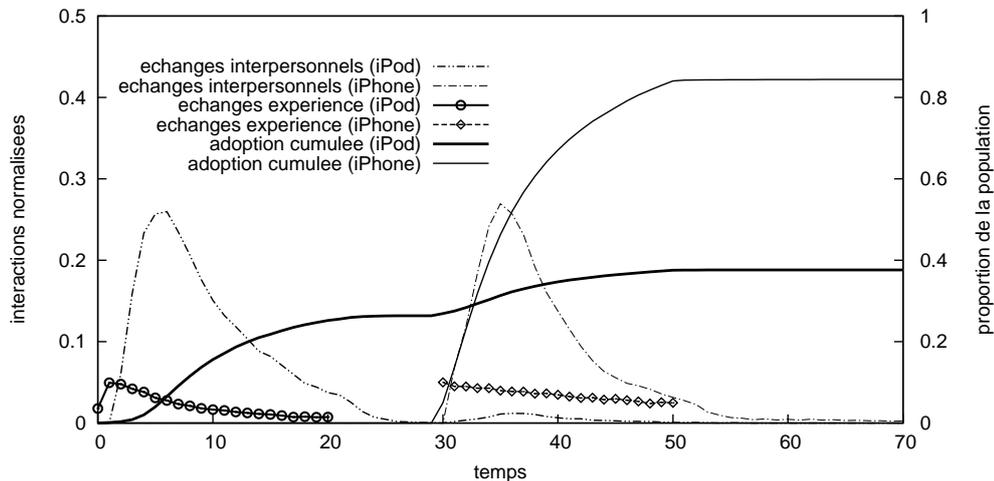


FIG. 7.24: Exemple de diffusion d'innovations liées.

On sait que la dynamique de diffusion d'innovations interdépendantes (ou liées) est différente de la diffusion d'une innovation indépendante. Pour Rogers, cette diffusion est plus rapide, car la seconde innovation profite du terrain déjà préparé par la première, les croyances préalables partagées entre les innovations ayant déjà été révisées. Pour Rogers, ces cas de diffusion ne sont pas suffisamment étudiés dans les modèles actuels. La description d'un tel cas de diffusion dans CoBAN est très simple. Supposons qu'après la diffusion de l'iPod, l'entreprise mette sur le marché un autre appareil technologique, par exemple un téléphone innovant tel que l'iPhone (l'exemple est à nouveau extrêmement stylisé). Tous les paramètres demeurent identiques, le produit étant supposé être adopté pour ses performances et par le gain de temps apporté par son ergonomie. Au pas de temps 30, on diffuse la publicité sur cette seconde innovation, iPhone, dont le contenu est visible en figure 7.23.

La figure 7.24 présente un exemple représentatif de simulation avec ces paramètres. Alors que les deux innovations sont adoptées sur des critères strictement identiques, la diffusion de l'iPhone est beaucoup plus rapide que celle de l'iPod. En effet, une part des résistances liées aux croyances préalables ou au manque d'information ont déjà été supprimée par la première diffusion. On note d'ailleurs une interaction réciproque, la diffusion de l'iPhone provoquant des discussions sur l'iPod et provoquant quelques adoptions, qui est conforme avec des analyses de terrain [Wozniak, 1984].

Cette expérience présente l'un des apports de la représentation associative des croyances dans un modèle de diffusion d'innovations : chacune des innovations présentes dans un système social influence les croyances de cette population et - dans le cas ou de mêmes croyances participent à l'évaluation d'une innovation - modifient sa perception subjective et son adoption.

## 7.5 Discussion sur les expérimentations avec le modèle CoBAN

### 7.5.1 Descriptivité du modèle

Comme nous l'avions supposé, la représentation explicite de croyances dans un modèle de diffusion d'innovations élargit le spectre des phénomènes réels qui peuvent être décrits. Les faits stylisés avec lesquels le modèle est compatible sont présentés dans le tableau 7.18 ; ces faits stylisés sont satisfaits soit par construction du modèle, soit comme conséquence des processus décrits dans le modèle. La **représentation des croyances sous forme de réseaux associatifs** permettent de décrire l'échec de diffusion d'innovations par incompréhension du message institutionnel ou la modification de la dynamique de diffusion d'innovations interdépendantes. La prise en compte de **niveaux qualitatifs de crédibilité**, et la révision probabiliste associée, permet de décrire relativement simplement l'existence de croyances préalables et la résistance que créent ces croyances préalables. **La communication générique sur des objets sociaux**, associée au principe associatif, permet également de décrire le marketing événementiel, le marketing viral, et de façon générale la communication sur l'innovation provoquée par des objets sociaux liés. La construction sociale de la réalité apparaît naturellement dans la population ; si les interactions interpersonnelles sont suffisamment nombreuses, la population converge vers une même représentation sociale de la réalité. Cette représentation peut être fautive si les paramètres de communication ne favorisent pas la propagation d'informations issues de l'expérience.

Certains phénomènes apparaissent dans le modèle sans avoir été identifiés dans la littérature ni que nous ayons cherché à les décrire ; ces phénomènes découlent de la définition des comportements et des interactions interpersonnelles. Par exemple, la proactivité des agents dépend de la compréhension ou de l'incompréhension d'un message (7.2.2). Les adoptants potentiels ayant des a priori négatifs sur une innovation les

fait stylisé	description dans CoBAN
l'incompréhension de l'information institutionnelle peut expliquer l'échec de la diffusion	l'évaluation de l'innovation se base sur des concepts qui ne peuvent être activés qu'en possédant à la fois l'information institutionnelle et des croyances préalables (voir 7.2.2 et 7.3.1)
les croyances préalables peuvent ralentir ou empêcher l'adoption de l'innovation	ensembles d'exclusion, agents initialisés avec des croyances préalables, probabilité de révision du support des croyances faible (voir 7.3.3)
les agents recherchent de l'information sur la base d'une information limitée, généralement envoyée par l'institution, qui attire leur attention	concepts utilisés dans la fonction comportementale de recherche d'information (7.2.3), crédibilité attendue avant d'évaluer une innovation (7.3.1), et représentation de différents degrés de croyance à l'aide des réseaux associatifs
la perception subjective de l'innovation est construite socialement par les échanges interpersonnels	apparaît naturellement par l'effet conjugué des communications interpersonnelles de l'expérience, des messages institutionnels et des croyances préalables (7.3)
l'innovation est évaluée sur une perception subjective, parfois fausse, de l'innovation	apparaît naturellement par la construction sociale de l'innovation
un adoptant passe par différents états (awareness, recherche d'information, adoption)	apparaît naturellement par la construction sociale de l'innovation
il existe un seuil ou une masse critique qui conduit à l'adoption d'une grande partie de la population	dépend de la structure d'interaction, de proportion d'agents promoteurs et curieux (7.2.3), ainsi que des paramètres de segment (7.3)
on peut analyser la population comme différents segments aux motivations et comportements distincts	par paramétrage de fonctions comportementales (7.3)
les segments de Rogers adoptent séquentiellement	<i>remis en cause</i> par l'analyse de la simulation (7.3)
la publicité fait rarement adopter directement, mais attire l'attention d'adoptants et les pousse à rechercher de l'information	apparaît naturellement dans la population par la faible crédibilité de l'information institutionnelle et le niveau de crédibilité requis par les agents pour l'évaluation d'une innovation.

TAB. 7.18: Faits stylisés et leur description dans le modèle CoBAN.

transmettent aux autres adoptants (7.3.3). La diffusion d'une innovation liée peut modifier la perception et l'adoption d'une innovation plus ancienne (7.4.2). Avec le recul, ces phénomènes non prévus semblent parfaitement plausibles.

Nous n'avons pas présenté l'ensemble des phénomènes descriptibles dans le modèle, certains effets étant évidents. Le *manque de crédibilité d'une source* empêchera toute

révision des croyances, et provoquera une adoption lente ou inexistante (cas typique de la diffusion de la pilule contraceptive au Kenya). *L'incompréhension du message institutionnel* par toute une population empêchera toute adoption (exemple de la diffusion de l'ébouillantage de l'eau à Los Molinas). Une innovation pour laquelle les durées de recherche et d'émission d'information sont très longues, avec des probabilités d'interaction faibles, se diffusera en plusieurs centaines de pas de temps, comme cela apparaît dans des cas réels. Avec un modèle d'adoption plus complet, on peut décomposer des segments adoptant séquentiellement ; si ce modèle décrit un choix, on peut étudier la polarisation de la population vers l'une ou l'autre des solutions. *L'influence normative* se traduit simplement par la motivation à s'intégrer à un groupe social, et la croyance que d'autres individus possèdent l'innovation.

Le champ des phénomènes descriptibles est très vaste dans ce modèle, démontrant l'intérêt d'un modèle de représentation des croyances et de communication plus réaliste. Toutefois, en l'état, l'analyse par simulation de ces phénomènes a peu de sens, puisque les résultats dépendront principalement des valeurs de paramètres pour lesquels nous manquons d'observations de terrain.

### 7.5.2 Satisfaction des objectifs

objectif	résultat
Déterminer si une représentation plus détaillée des croyances permet de décrire des phénomènes supplémentaires dans la diffusion d'innovations	<b>vérifié</b> (voir tableau 7.18)
Comprendre l'impact de la recherche d'information sur la diffusion d'information	impact très important, la recherche d'information ne peut pas être ignorée dans les analyses de bouche à oreille ni les modèles de communication ( <i>cf</i> 7.2.3)
Générer de la connaissance pour les domaines cibles (marketing, diffusion d'innovations)	<b>réalisé</b> : remise en cause de la segmentation séquentielle de Rogers, discussion sur le potentiel du marketing viral
Améliorer l'utilité du modèle en incluant des variables décisionnelles et en décrivant des stratégies communicationnelles	les phénomènes peuvent être décrits, mais la précision des paramètres est insuffisante pour rendre le modèle utile avant des études de terrain
Apporter des informations par simulation sur la diffusion d'innovations	remise en question des facteurs distinguant les segments de Rogers et leur existence réelle ( <i>cf</i> 7.3.6)
Comprendre les informations à collecter pour étudier et simuler un phénomène réel	indications fournies par les résultats de simulation

TAB. 7.19: Satisfaction des objectifs

Nous avons successivement étudié l'impact des paramètres du modèle CoBAN sur la dynamique d'adoption. Notons qu'avec ce modèle, il devient difficile de travailler en abstraction pure, et que l'élaboration de scénarios réalistes devient indispensable, même pour une utilisation analogique du modèle. En premier lieu, nous constatons que chacun de ces paramètres a une influence importante sur le modèle ; notre décision de les inclure dans le modèle semble donc pertinente. Le niveau de sensibilité à chacun des paramètres détermine la priorité et la précision avec laquelle ces paramètres devraient être quantifiés sur le terrain. De façon générale, le modèle nous a permis de satisfaire la plupart des objectifs que nous avons posé (tableau 7.19).

Certaines de ces simulations ont mené à des constats utiles pour les domaines de la diffusion d'innovations et le marketing. Nous avons ainsi noté que la plupart des cas de diffusions se situent probablement en dessous du seuil épidémique, et conclu qu'il est improbable que l'information sur un produit se propage de façon purement interpersonnelle dans toute la population (7.2.4). Les attentes du marketing viral, qui cherche à diffuser des produits par la seule communication interpersonnelle, nous semble difficile à atteindre dans le cadre des discussions face à face. Nous avons également déterminé que les paramètres des agents peuvent faire apparaître des segments dans la population. Toutefois, l'adoption séquentielle des segments de Rogers ne peut pas être expliquée uniquement par les paramètres de communication, et constitue probablement une idéalisation excessive reprise à tort par les ouvrages marketing.

Les résultats de simulation conduisent également à des constats importants sur les paramètres que l'on ne peut pas négliger lorsque l'on modélise la communication. Le bouche à oreille a un impact important et différent de l'émission proactive d'information ; tout modèle descriptif de diffusion d'innovations, ou de n'importe quel phénomène social basé des communications interpersonnelles, doit prendre en compte cette recherche d'information. Ce résultat prouve que la simplification de "l'information comme une épidémie" constitue, comme le disait Geroski, une prison pour l'esprit qui conduit à une mauvaise analyse d'un phénomène réel. Le marketing viral peut être analysé comme une épidémie s'il s'agit de la transmission d'un message publicitaire, d'une vidéo sur Internet, ou d'un événement. Par contre, le bouche à oreille *n'est pas* une épidémie pure. Dans une plus faible mesure, nos simulations tenant compte de la crédibilité des messages indiquent aussi que les cascades informationnelles sont probablement plus courtes que ce que nous supposons ; il est probable que tous les individus ne propagent pas une information reçue avec une trop faible probabilité. Il pourrait être utile de tenir compte de ces phénomènes pour les analyses de marketing viral.

Faute d'information provenant de cas de diffusions réels, il serait inutile de tirer des conclusions plus approfondies des simulations. Ces paramètres ont été conçus de façon à posséder une signification réelle et à être collectable sur le terrain ; on peut ainsi observer la durée de saillance d'un objet, mesurer les croyances préalables ou déterminer par entretien ou questionnaire les motivations . Certains paramètres ou choix de modélisation relèvent davantage de la psychologie cognitive que de la simula-

tion, et nécessiteraient une collaboration pluridisciplinaire. C'est le cas des probabilités de révision des croyances ou de l'extraction des croyances possédées par l'agent. Mais surtout, l'un des paramètres ne peut pas être en l'état collecté depuis le terrain pour de grandes populations; il s'agit bien sûr du réseau d'interactions, qui détermine le seuil de diffusion d'information et le moment auquel un agent ou un segment d'agents adopteront. L'impact de cette structure est plus important que celui de tout autre paramètre comportemental. *Faute d'un réseau d'interactions descriptif, toute collecte d'information demeurera vaine, et toute prévision de diffusion ou d'échec sera non fiable.*

## Chapitre 8

# Générer des grands réseaux d'interactions descriptifs

### 8.1 Modéliser les réseaux d'interaction

Nous avons constaté une très forte sensibilité de notre modèle à la structure d'interactions. Cette sensibilité est observée dans de nombreux modèles orientés agents. La conséquence, pour notre travail comme pour la simulation sociale en général, est que la plupart des modèles ne peuvent être estimés descriptifs sans une structure d'interactions réaliste.

Quand la modélisation porte sur une petite population, la collecte extensive des informations est possible. Toutefois, la plupart du temps, on s'intéresse à de grandes populations, à l'échelle d'une région ou d'un pays. C'est le cas en diffusion d'innovations, mais aussi en économie ou en dynamique d'opinions. Faute de pouvoir collecter des données précises, on utilise couramment des générateurs de réseaux supposés décrire des réseaux d'interaction plausibles. La plupart des modélisateurs sont conscients des limites descriptives de ces générateurs, mais les utilisent par défaut, faute de meilleure solution. Dans les modèles visant à la descriptivité, les modélisateurs doivent finalement développer manuellement des structures ad-hoc [Deffuant, 2001].

Nous reprenons l'étude de cette problématique à ses racines. La description d'un réseau d'interactions est un processus de modélisation, qui doit être abordé comme tel. Il est d'abord nécessaire de définir clairement l'objet de la modélisation ; le terme de "réseau social" recouvre des notions très différentes. Dans notre cas, nous nous intéressons à la structure des interactions, même s'il peut être nécessaire de tenir compte de ces relations sociales durables pour décrire les interactions. L'absence de données sur la structure des interactions est considérée comme l'obstacle majeur à la description des interactions. Les générateurs actuels se basent donc sur quelques statistiques effectuées sur des réseaux disponibles. Nous verrons que ces données sont insuffisantes, et que leur validité même est discutable. Par contre, les sciences sociales ont apporté des informations très intéressantes sur les processus qui font apparaître les liens eux-mêmes.

De plus, une étude approfondie des données disponibles révèle l'existence de données statistiques éparses et d'observations qualitatives. Ces données, associées aux processus de création de liens convenables, constituent une façon intéressante de contraindre la génération de réseaux. Certains des générateurs existants apportent d'ailleurs des éclairages instructifs sur les processus de génération utilisables.

Le client-type du générateur de réseau est un modélisateur qui cherche à simuler une dynamique sociale sur un réseau relativement réaliste, s'intéresse à une population de grande taille, ce qui lui interdit toute collecte de données extensive. La génération du réseau n'est pas son objet d'étude, mais est uniquement utilisée comme un outil. Il est probable qu'il dispose de données qualitatives ou statistiques diverses. Dans un premier temps, il est donc nécessaire de lui fournir une méthodologie et un formalisme permettant de codifier les statistiques éparses et les observations qualitatives sous une forme unique et cohérente. Nous proposons une formalisation basée sur des réseaux Bayésiens, ainsi qu'un générateur utilisant ces paramètres pour générer des réseaux plus réalistes. Nous illustrerons cette méthodologie en modélisant la structure des interactions sur les produits contraceptifs au Kenya, qui décrira la structure familiale, ainsi que les interactions plus superficielles entre voisins. Les propriétés statistiques des réseaux générés sont compatibles avec les observations à grande échelle ; mais surtout, la structure décrit les attributs des agents et leurs relations précises avec leur famille, leurs voisins et leurs collègues. La même méthodologie peut être utilisée pour générer des réseaux adaptés à des problématiques et des populations différentes.

A ce stade, le premier objectif du processus de modélisation des réseaux sociaux est de **proposer un générateur de grands réseaux sociaux descriptif des structures réelles.**

## 8.2 Objet d'étude : que représente le réseau ?

Il est devenu classique de représenter les interactions dans un modèle basé agents (MBA) par un réseau, nommé par habitude "réseau social". Ce terme de réseau social provient des recherches en sociologie. Toutefois, l'objet étudié - le réseau - diffère sensiblement entre différents domaines de recherche. Avant toute autre chose, nous devons définir clairement ce que nous souhaitons représenter par le réseau, ce qui passe par la définition de ce que représente un lien de ce réseau. Or, l'intervention de différentes communautés de recherche a conduit à plusieurs perceptions du même terme de "réseau social".

### 8.2.1 Sciences sociales : des relations sociales

En sciences sociales, plus précisément dans l'approche de *Social Networks Analysis* (SNA) (par ex [Wasserman et Faust, 1994a] [Robins *et al.*, 2001]) - *un lien représente une relation sociale durable entre deux individus*. On envisage aussi un lien social comme une opportunité d'échange de services [Wasserman et Faust, 1994b]. Cette définition

laisse une large place à l'interprétation. Dans la pratique, la signification d'un lien est définie par le protocole de collecte de données. Il peut s'agir de l'existence d'une relation de confiance ("à qui prêtez-vous vos clés en cas d'absence?"), de support affectif ("à qui parlez-vous d'un problème personnel?"), de menus services ("à quoi pourriez-vous demander de relever votre courrier?"), d'aide financière ("à qui pourriez-vous emprunter de l'argent?") ou matérielle ("qui vous prêterait une voiture en cas de besoin?"). Ainsi, dans la célèbre étude sur les liens forts et faibles de Granovetter (*strong and weak ties*), un lien est la possibilité de demander des informations sur des propositions d'emploi ou une cooptation pour un travail [Granovetter, 1973]. On peut également interroger les sujets sur leur perception de la relation sociale, sans définir plus précisément à quoi elle correspond ; c'est ce que l'on fait dans des groupes d'étudiants, en demandant de repérer dans un listing les noms des "amis" ou des "simples copains". Dans d'autres expériences, on considère qu'un lien social représente simplement le fait de connaître l'autre ; c'est le cas dans l'expérience du petit monde (*small world*) de Milgram, dans laquelle on doit connaître le nom et le prénom de l'interlocuteur [Milgram, 1967]<sup>1</sup>. On considère souvent un lien familial comme un lien social, bien qu'il ne se traduise pas toujours par une relation de confiance ni la possibilité de demander un service.

On le voit, la définition de ce qu'est un lien social est loin d'être triviale. Il n'existe pas une unique définition consensuelle du concept de "réseau social". La conceptualisation des relations entre humains sous forme de liens entre des noeuds a été introduite par les travaux sociométriques de Moreno, dans les années 1930, comme un *outil de représentation et d'analyse* d'une réalité humaine complexe. Le "réseau social" est en réalité une métaphore, une construction d'un observateur qui permet d'étudier des relations sociales. En fonction de la définition utilisée, ce que l'on dénomme réseau social a des propriétés très différentes.

### 8.2.2 Physique : des réseaux abstraits

Récemment, dans les années 1990, des physiciens se sont penchés sur l'étude des réseaux, en étudiant leurs propriétés par des outils statistiques. Ils ont repris le terme populaire de réseau social dans un sens beaucoup plus faible, en tant que "réseau" plutôt que "réseau social". Les recherches de ces physiciens ne traitent pas de liens sociaux mais des propriétés statistiques de ces réseaux, et des mécanismes par lesquels ces propriétés apparaissent<sup>2</sup>. La définition de ce qu'est un réseau social a été plus ou moins explicitement étendue à toute interaction entre individus ou organisations : siéger ensemble dans un conseil d'administration d'entreprise, corédaction ou cocitation d'articles scientifiques. D'ailleurs, les analyses statistiques des réseaux sociaux sont

<sup>1</sup>En réalité, et bien que ce facteur soit souvent ignoré, l'expérience de Milgram nécessite également que l'on puisse demander à l'interlocuteur le service de transmettre un courrier.

<sup>2</sup>L'opposition entre "physiciens" et "sciences sociales" est naturellement excessive, les sciences sociales ayant elles-mêmes développé très tôt des analyses statistiques de leurs réseaux [Carrington *et al.*, 2005]. Toutefois, ces analyses portaient sur des réseaux de taille réduite. Les chercheurs en sciences humaines eux-mêmes perçoivent l'intervention d'une autre communauté de recherche dans leur domaine, comme le prouve le titre humoristique de l'article "*the invasion of the physics*" [Bonacich, 2004].

comparées à d'autres réseaux aussi différents que des grilles d'électricité, des réseaux de neurones ou des réseaux informatiques (voir par ex. [Albert et Barabási, 2002]).

Cette approche s'est révélée riche en enseignements. Des algorithmes génératifs de réseaux, que nous étudierons plus en détail en 8.3, ont été développés pour expliquer comment certaines propriétés statistiques des graphes peuvent émerger des processus de formation de ces réseaux. Involontairement, ces travaux ont également contribué à décorrélérer le terme "réseau social" de sa réalité sociologique initiale.

### 8.2.3 Simulation individu-centrée : des réseaux d'interactions

#### Liens sociaux conduisant à des interactions

*En simulation individu-centrée, le réseau est utilisé pour décrire les interactions au sein de la population. L'existence et la fréquence d'interactions entre deux individus dépend souvent de l'existence d'une relation sociale durable entre ces deux individus.* Par exemple, les membres d'un couple interagissent généralement quotidiennement. De plus, ces liens sociaux sont fréquemment associés à une crédibilité et une influence normative plus forte, tels les parents sur leurs enfants ou l'influence réciproque de deux conjoints. *Les relations sociales stables et leur type doivent donc être prises en compte dans l'analyse et la modélisation de la diffusion d'innovations.* Ce constat général justifie (plus ou moins consciemment) l'analogie entre réseau d'interactions et réseau social. Assimiler réseau social et réseau d'interactions constitue tout de même une simplification importante de la réalité.

#### Liens sociaux sans interaction

Tout d'abord, *il peut exister un lien social durable sans interactions fréquentes.* De nombreux adultes ont peu d'interactions avec leurs parents (en France : [INSEE, 2008]). Les travaux de Granovetter indiquent que les liens sociaux faibles conduisent à des interactions rares ayant néanmoins un impact important [Granovetter, 1983]. Dans le cas de la diffusion d'innovations, deux femmes Luo peuvent échanger fréquemment, mais ne jamais évoquer la pilule contraceptive, de même que deux collègues échangeront rarement sur le tri sélectif des déchets. Les études sur le consommateur [Engel *et al.*, 1995b] prouvent que chaque type de relation sociale conduit ou non à des recommandations ou à des prescriptifs efficaces. Ainsi, de nombreuses publicités ciblent les enfants pour les pousser à demander l'achat d'un produit à leurs parents (céréales, jouets, vêtements de marque, etc.). Ces mêmes enfants incitent à adopter de nouvelles technologies et aident leurs parents à les utiliser, comme cela est le cas pour l'informatique ou l'utilisation d'Internet. Seuls le lien "enfant/parent" conduit à ce pouvoir prescriptif. De même, dans une étude de terrain sur le bouche à oreille, Carl a constaté de fortes disparités dans la fréquence d'échanges sur des produits en fonction du type de relation qui unit deux individus (amitié, famille proche, éloignée, collègue, voisins...), et du média utilisé pour communiquer (face à face, messagerie instantanée, courriel, etc.) [Carl, 2006b].

Cette fréquence dépend aussi des caractéristiques des deux individus : des amis vivant à distance discutent moins de produits que s'ils se rencontraient chaque semaine autour d'un repas. Les connaissances d'un individu sur son accointance détermine aussi la nature des interactions qu'il provoquera ; un jeune européen parlera peu de ses jeux vidéos à ses grands-parents, mais davantage à ses camarades d'école. Pour résumer, *la fréquence d'interactions entre deux individus liés par une relation sociale durable dépend de la nature de cette relation sociale, de la nature de l'influence interpersonnelle étudiée et des caractéristiques de chaque individu.*

### **Interactions sans liens sociaux**

Par ailleurs, *il existe des interactions en dehors de tout relationnel stable.* Deux collègues peuvent se rencontrer quotidiennement pour déjeuner sans pour autant développer de relation amicale. Ce lien relationnel ne sera pas nécessairement décrit comme un lien social durable, bien que les individus discutent chaque jour. C'est aussi le cas de voisins, qui discutent statistiquement chaque mois sans toujours se connaître réellement (pour la France : [INSEE, 2008, Héran, 1987]). Une anecdote rapportée par Bloom [Bloom, 1995] nous rappelle d'ailleurs que la communication n'est pas seulement verbale. Au début des années 1980, un groupe d'architectes a créé dans de nouveaux immeubles de grandes terrasses isolées de la rue, afin d'offrir aux habitants des lieux de contemplation paisibles. A leur grande surprise, ces terrasses ne furent pas utilisées ; les habitants leur préférèrent des murets ou des marches à proximité des trottoirs bondés. Les êtres humains, semble-t-il, ont un désir irrésistible d'observer leurs semblables. Or, la vision constitue un vecteur de communication puissant, particulièrement en diffusion d'innovations. Dans la campagne publicitaire sur l'iPod, Apple a associé les écouteurs blancs du baladeur MP3 au produit ; par la suite, en se promenant dans la rue, un individu pouvait détecter immédiatement l'adoption de l'iPod par d'autres consommateurs. Cette observation joue également un rôle important dans les modes vestimentaires. Un contact visuel furtif peut d'ailleurs provoquer un échange d'information plus détaillé. Un sujet nous a expliqué qu'en trois mois, trois inconnus rencontrés sur des parkings de supermarchés lui ont posé des questions sur sa voiture à motorisation hybride. Or, le nombre d'interactions visuelles est considérablement plus élevé que les rencontres avec des individus connus. Il conduit aussi à des interactions plus cosmopolites (un cadre supérieur peut rencontrer toutes les catégories socio-professionnelles dans le métro parisien). Surtout, la vision est indépendante de toute relation sociale durable, prouvant que *de très nombreuses interactions peuvent exister en dehors des liens sociaux.*

### **Interactions stables ou spécialement créées ?**

On doit également se demander si le phénomène social que l'on modélise repose sur les interactions déjà existantes, ou si de nouvelles interactions sont provoquées de façon extraordinaire. Ainsi, deux agriculteurs peuvent connaître leur existence mutuelle, interagir rarement, mais se rendre spontanément chez leur collègue pour demander des informations sur une innovation ; en modélisant la diffusion d'innovation agricoles, le réseau

d'interactions ne peut pas nécessairement être considéré comme stable [Deffuant, 2001, p. 104]. Les agents de changement sont souvent contactés spécialement pour l'occasion, comme quand une femme Luo se rend à un groupe de discussion sur le planning familial. Dans les études de Granovetter, des liens avec de vagues connaissances sont réactivées pour rechercher un travail [Granovetter, 1983]. *La structure des interactions décrite pour un phénomène social donné n'est pas systématiquement la même que les interactions existant en temps normal* ; il s'agit d'une simplification qui ne peut être acceptée qu'au cas par cas. Par exemple, le bouche à oreille s'intègre souvent dans les conversations quotidiennes, tandis que la recherche active d'information crée de nouvelles interactions ou réactive des interactions sociales faibles. Le réseau social est une construction qui diffère de la structure des interactions ; *si la structure des relations sociales durables est par définition stable dans le temps, la structure des interactions peut varier pendant, et à cause, d'un phénomène social donné*. Peut-être devrait-on cesser de réfléchir à un hypothétique réseau d'interactions, et considérer que les interactions sont activées - voire construites - par un individu en fonction de ses motivations du moment [Kant, 2008].

#### 8.2.4 Étudier le réseau d'interactions : relations sociales et interactions

Notre objectif, dans un modèle orienté agents, est bien de décrire les interactions et non les relations sociales. L'ensemble de ces observations prouve que l'on ne peut pas, sauf cas particulier mûrement réfléchi, assimiler directement la structure des interactions à la structure des relations sociales durables. L'utilisation du terme "réseau social" n'est pas seulement maladroite, mais s'avère dangereuse en ce qu'elle efface les différences réelles entre liens sociaux et interactions. Toutefois, les relations sociales durables demeurent fortement corrélées à la fréquence et à la nature des interactions ; Il semble donc pertinent de *décrire à la fois les relations sociales durables et la structure des interactions*. Ainsi, l'utilisateur pourra décrire des interactions interpersonnelles spécifiques aux relations durables (prescription, confiance, possibilité de parler de sujets intimes, etc.) et des interactions plus superficielles.

### 8.3 Observations et modèles existants

Chacune des approches présentées précédemment a dégagé des observations générales sur les réseaux, et a développé des modèles permettant de les reproduire ou de les expliquer. Nous retiendrons ici leurs principaux apports, ainsi que les principaux éléments qui ont supporté notre raisonnement.

#### 8.3.1 Propriétés générales des réseaux

L'observation fondatrice du concept de réseau social est l'existence d'une structure stable des interactions ou relations sociales [Wasserman et Faust, 1994a]. C'est

ce constat qui a conduit à l'abandon du principe de rencontre aléatoire entre agents qui fut longtemps utilisé en simulation individu-centrée [Amblard et Phan, 2006]. Les réseaux aléatoires constituèrent longtemps la réponse à cette observation. Le principe est de considérer l'existence d'un lien entre deux individus comme une variable aléatoire  $L^{a_1, a_2}$  prenant la valeur 1 si un lien existe. En considérant que chaque lien a une probabilité  $p$  d'exister, cad  $p(L^{a_1, a_2} = 1) = p$ , on génère un réseau d'interactions stables au sein d'une population. Erdős et Renyi ont étudié théoriquement les propriétés statistiques de ces réseaux [Erdős et Rényi, 1959]. Ces réseaux ER ont longtemps constitué le seul modèle de graphes sociaux à grande échelle ; en tant que tels, ils ont été utilisés en simulation orientée agents pour décrire la structure des interactions. Ces travaux ont également introduit la notion de ce que nous appellerons un *générateur de graphe*, c'est-à-dire un algorithme  $\mathcal{G}$  qui pour un ensemble de paramètres donnés crée un graphe qui vise à être compatible avec des observations de terrain. Pour les réseaux ER, les paramètres sont simples : probabilité  $p$  et taille de la population.

Dans un réseau quelconque, le nombre de liens pouvant exister est grand (pour  $n$  noeuds, il peut exister  $\frac{n(n-1)}{2}$  liens dans un graphe non dirigé). Or, la *densité* - définie par le rapport entre le nombre de liens existants et ceux qui pourraient exister - s'avère faible dans les réseaux sociaux (voir [Albert et Barabási, 2002] pour des exemples). Notons que cette valeur dépend naturellement de la collecte du réseau social ; le réseau des interactions par vision est vraisemblablement plus dense que le réseau des relations sociales durables. Les réseaux ER, ou les maillages réguliers, sont parfaitement compatibles avec cette observation.

Dans un réseau social, on observe des *cliques* ou *clusters*, c'est-à-dire des groupes dans lesquels les membres sont fortement interconnectés. Les clusters correspondent par exemple à des équipes dans des entreprises, ou des groupes d'amis, dans lesquels tout le monde connaît tout le monde (ou presque). Rogers a observé l'existence de clusters à l'échelle de villages entre lesquels les interactions sont faibles. Il existe de nombreuses mesures statistiques visant à quantifier le un taux de *clustering*. Nous retiendrons la plus simple, qui quantifie le nombre de liens A-C existant pour tout triplet d'agents A,B,C, avec A-B et B-C liés. La simulation basée agents a utilisé le principe des automates cellulaires, dans lesquels la structure des interactions est un maillage régulier. Dans un maillage, contrairement aux réseaux aléatoires, le taux de *clustering* est important.

### 8.3.2 Etude des grands graphes

#### générateur de Watts-Strogatz

Une expérience célèbre de Stanley Milgram laisse supposer que la distance moyenne entre deux individus pris au hasard dans une population est courte [Milgram, 1967, Dodds *et al.*, 2003]. Or, si les réseaux aléatoires font apparaître une courte distance moyenne, leur taux de clustering est beaucoup plus faible que celui des réseaux réels. Inversement, un maillage régulier a un clustering élevé, mais une longue distance moyenne.

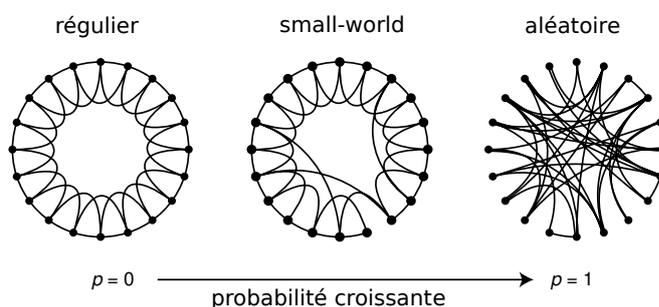


FIG. 8.1: Illustration du mécanisme de *rewiring* de l'algorithme de Watts et Strogatz (depuis [Watts et Strogatz, 1998])

L'observation de nombreux autres réseaux naturels et artificiels, tels que les réseaux de neurones ou les grilles électriques, révèle le même phénomène. Comment un réseau quelconque peut-il exhiber simultanément ces deux propriétés, ou en quelque sorte se situer entre ces deux extrêmes ? En posant le problème de cette façon, Watts et Strogatz ont proposé un algorithme simple générant des réseaux au clustering élevé caractérisés par une courte distance moyenne [Watts et Strogatz, 1998].

On commence par générer un maillage régulier, dans lequel le clustering est nécessairement élevé et la distance moyenne très longue. Puis, on déconnecte chaque lien avec une probabilité de *rewiring*  $p^{\text{rewiring}}$ , et on le reconnecte à un autre noeud choisi au hasard. Si la probabilité est très faible, on conserve une structure très proche d'un maillage régulier. Si la probabilité est proche de 1, tous les liens sont reconnectés, et l'on obtient un réseau aléatoire de ER (figure 8.1). Par contre, entre ces deux valeurs extrêmes, on obtient un réseau avec un clustering élevé, mais dans lequel les liens reconnectés au hasard jouent le rôle de "raccourcis" (*shortcuts*) qui diminuent la distance moyenne. Dans cette *phase de transition*, on obtient donc un clustering élevé et une faible distance moyenne compatible avec les observations de terrain. Les paramètres du générateur sont la taille de la population, le voisinage utilisé pour générer le maillage initial, et la probabilité de *rewiring*.

Le générateur WS a attiré une attention considérable, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cet algorithme explique comment une courte distance moyenne peut exister dans n'importe quel réseau : la création aléatoire d'un nombre suffisant de raccourcis suffit à faire apparaître ce phénomène. Si l'expérience de Milgram sur le "petit monde" était contestable [Kleinfeld, 2002, Watts *et al.*, 2002, Adamic et Adar, 2005], cette explication rend crédible l'existence d'un court chemin dans les réseaux sociaux. Ensuite, ce générateur permettait d'obtenir des réseaux compatibles avec ces deux caractéristiques, approchant les grandeurs statistiques observées sur des réseaux réels [Albert et Barabási, 2002]. De nombreuses simulations ont donc été conduites pour comprendre l'impact de ces caractéristiques sur les dynamiques épidémiques (par ex. [Kleinberg, 2002, Zanette, 2002]). Les réseaux WS sont d'ailleurs couramment utilisés en simulation orientée agents. Enfin, les travaux de Watts et Strogatz ont ouvert une

nouvelle ère d'analyse des réseaux [Latapy *et al.*, 2008], qui explore les propriétés communes à de grands réseaux réels de nature très diverse.

Tout en reconnaissant les apports du générateur WS, il est important de souligner que ce modèle n'est pas descriptif de réseaux d'interaction réels. Tout d'abord, il a été développé sur la base de données réelles à la représentativité discutable. Si l'on exclut tous les réseaux qui ne sont aucunement "sociaux" (grilles d'électricité, réseaux de neurones, Web, etc.), on constate que les réseaux décrivant des relations entre humains sont rares et non identifiables à des réseaux relationnels réels : co-citation d'articles scientifiques : co-citations d'articles scientifiques [Newman, 2001b, Newman, 2001a], membres des conseils d'administration des grandes entreprises américaines [Newman *et al.*, 2001], contacts sexuels [Liljeros *et al.*, 2001]. Les études de réseaux d'interactions réelles sont rares - à notre connaissance, la seule étude à grande échelle d'interactions est l'étude d'Aiello *et al.*, qui étudient les contacts téléphoniques [Aiello *et al.*, 2000]. Par ailleurs, ce générateur reproduit seulement les propriétés statistiques de clustering et de distance moyenne. De nombreux autres algorithmes conduisent au même résultat. La structure d'interactions réelles peut donc, tout en exhibant ces propriétés statistiques, être très différente dans la réalité.

### **générateur de Barabasi-Albert**

Chaque noeud d'un graphe est connecté à un nombre donné de voisins ; cette quantité est appelée *degré de connectivité*  $k$ . Dans le cas d'un graphe dirigé, on peut distinguer les degrés de connectivité pour les liens entrants et sortants. A l'échelle du graphe, on peut quantifier le degré moyen  $\langle k \rangle$ . En fonction de la sémantique du réseau décrit, ces degrés peuvent varier de quelques unités à plusieurs centaines, voire milliers de contacts. L'étude statistique de réseaux sociaux, et d'autres réseaux réels, fait apparaître une disparité dans la répartition des degrés de connectivité. Cette répartition semble être en loi de puissance inverse, c'est-à-dire que la plupart des individus sont faiblement connectés, alors que quelques-uns ont un degré de connectivité très élevé. Ce constat a été dressé pour les réseaux d'acteurs, les coauteurs d'articles, les directeurs d'entreprises ou les réseaux de contact sexuel (données visibles dans [Albert et Barabási, 2002]).

Or, les générateurs ER et WS font apparaître une répartition des degrés en loi de poisson et non en loi de puissance. Pour expliquer l'apparition de cette répartition de degrés, Barabasi et Albert ont proposé le principe d'*attachement préférentiel* [Barabási et Albert, 1999]. Cette fois, le réseau se construit de façon dynamique, en ajoutant progressivement les noeuds au réseau. Chaque noeud ajouté se connecte avec une probabilité supérieure à un noeud qui a déjà une connectivité élevée. Ce principe trouve un écho dans les processus réels de création de nombreux types de réseau. Un nouvel employé se greffe à une structure hiérarchique, et se connecte inévitablement à un responsable d'équipe qui a déjà une connectivité élevée. Un nouvel arrivant dans un groupe social créera probablement un lien avec l'individu le plus charismatique, qui possède donc déjà de nombreuses relations sociales. Une

nouvelle page internet référence probablement un site internet au contenu intéressant, donc déjà fortement référencée. La structure émergente contient des concentrateurs (“hubs”), qui en terme de réseaux sociaux correspondent à des individus qui côtoient plusieurs groupes sociaux. Ce modèle a été rapporté à de nombreux réseaux réels [Albert et Barabási, 2002]. Le réseau résultant exhibe à la fois un clustering élevé, une densité faible, un court chemin moyen et une répartition des degrés en loi de puissance. Il est souvent utilisé en simulation orientée agents pour tester la sensibilité du modèle à l'existence de “hubs” dans la population. Nous avons nous-mêmes utilisé ce principe (7.2.1), et constaté que la dynamique supportée par un réseau avec hubs est sensiblement différente des simulations sur réseaux WS.

On peut dresser pour le générateur BA le même constat que pour celui de WS. Il s'agit d'un modèle qui démontre qu'un principe explicatif est plausible, et qui permet d'approcher les grandeurs statistiques de nombreux réseaux réels. Toutefois, il n'est pas prouvé que les réseaux d'interaction ou relationnels soient tous compatibles avec une répartition des degrés en loi de puissance. Ce modèle est donc analogique, mais n'est pas descriptif.

### Réseaux bipartites

Dans de nombreux cas, il est possible de distinguer deux classes de noeuds différentes dans un réseau : les individus d'une part, et une affiliation d'une autre. Par exemple, les acteurs jouant ensemble sont affiliés à des films. Les membres de conseil d'administration sont réunis par ce conseil d'administration. La *projection* permet de ramener un réseau bipartite à un réseau non bipartite [Newman *et al.*, 2002]. Dans le cas le plus simple, des liens sont créés entre tous les individus liés à de mêmes affiliations. La projection fait apparaître naturellement un clustering important et une courte distance moyenne. En fonction du paramétrage, les degrés de connectivité peuvent être en loi de puissance, la connectivité des noeuds peut varier, etc. Les réseaux bipartites ont été utilisés pour étudier de nombreux réseaux (voir par ex. [Latapy *et al.*, 2008, p. 37]), prouvant une excellente aptitude à la description de grands graphes.

Nous retiendrons essentiellement le *principe de création de liens entre des agents ayant une affiliation commune*. La projection constitue un principe génératif qui intègre les facteurs explicatifs de l'existence de liens entre des noeuds d'un graphe (les affiliations) ; ainsi, c'est *parce que* deux chercheurs appartiennent à une même équipe qu'ils sont amenés à publier ensemble. Il est intéressant de noter que ce principe s'est avéré efficace pour décrire des réseaux réels. Le concept de réseau bipartite est très vaste [Guillaume et Latapy, 2004] : on peut l'utiliser non seulement pour les affiliations institutionnelles (écoles, entreprises, associations), mais aussi pour d'autres points communs entre les agents tels que la proximité géographique ou sociale. D'autre part, comme nous l'avons vu, les données sont plus facilement disponibles pour les affiliations que pour les liens eux-mêmes.

Remarquons également que les générateurs de réseaux basés sur une structure bipartite font évoluer la notion de générateur de grands graphes, passant des générateurs très simples (réseaux aléatoires, WS, BA) à des modèles à la descriptivité supérieure dont le paramétrage est nécessairement plus complexe.

### 8.3.3 Processus de sélection sociale

En étudiant de petits groupes, les chercheurs en SNA se sont d'abord intéressés aux processus de sélection sociale, c'est-à-dire "*les processus par lesquels les individus structurent consciemment ou inconsciemment leur réseau sur la base des attributs des autres individus*" [Leenders, 1997]. Ils ont observé que *les individus tendent à créer des liens sociaux avec des individus aux caractéristiques similaires* ; c'est le principe d'homophilie [McPherson *et al.*, 2001]. Les amis sont généralement de la même classe d'âge, du même sexe et de la même catégorie socio-professionnelle. Les élèves d'une classe créent des liens parce qu'ils partagent des valeurs, des goûts ou des intérêts similaires (style musical, vestimentaire, etc.). Ce principe a été modélisé à l'aide de *réseaux aléatoires avec attributs*. L'existence d'un lien entre deux individus est considérée comme une variable aléatoire  $L^{a_1, a_2}$  qui prend la valeur 1 si le lien existe. Cette existence est formalisée comme une probabilité dépendant des attributs *Att* des individus :  $p(L^{a_1, a_2} = 1 | Att(a_1), Att(a_2))$ .

Les études révélaient un phénomène de transitivité. Le dicton "les amis de mes amis sont mes amis" résume intuitivement ce qu'est la transitivité. D'une part, *la transitivité est un processus qui conduit à l'apparition de liens sociaux* ; si A connaît B et B connaît C, alors il est probable que A et C se rencontrent et créent des liens (plus probable que s'ils ne partageaient pas l'accointance B). D'autre part, la transitivité est *une quantification statistique* qui évalue la proportion de liens A-C existant dans un réseau social pour tout groupe A,B,C dans lequel existent les liens A-B et B-C. Or, les réseaux aléatoires avec attributs considéraient les liens comme indépendants. Les réseaux aléatoires markoviens [Frank et Strauss, 1986] suppriment cette indépendance, en autorisant la dépendance de deux dyades qui partagent un noeud en commun :  $p(L^{a_1, a_2} = 1 | L^{a_1, a_3}, L^{a_3, a_2})$ .

Les modèles développés dans ce courant de recherche sont conçus pour être descriptifs de réseaux sociaux réels. Ils prennent aussi en compte les caractéristiques des agents. Contrairement à nos objectifs, ils ne peuvent néanmoins être appliqués qu'à de petits réseaux.

### 8.3.4 Les données négligées : Statistiques éparses et observations qualitatives

Les recherches actuelles décrivant les réseaux sociaux s'arrêtent aux observations citées plus haut. Cette limite de connaissance des réseaux constitue le facteur qui empêche de créer des réseaux plus descriptifs. Pourtant, lorsque nous étudions un phénomène social, de nombreuses données supplémentaires apparaissent.

Reprenons l'exemple de la diffusion de la pilule contraceptive dans la région Luo du Kenya, décrite en introduction (3 p. 33). Cet exemple nous place dans le cas du modélisateur qui souhaite simuler une dynamique collective à l'échelle d'une région ou d'un pays, sans avoir l'opportunité de lancer une collecte de données à grande échelle. Nous nous reportons donc uniquement aux données secondaires (voir p. 23) disponibles sur cet exemple.

### Caractéristiques des individus

Household population by age, sex, and residence									
Percent distribution of the de facto household population by five-year age groups, according to sex and residence, Kenya 2003									
Age	Urban			Rural			Total		
	Male	Female	Total	Male	Female	Total	Male	Female	Total
<5	14.6	13.9	14.2	16.6	16.1	16.4	16.2	15.7	15.9
5-9	10.9	11.2	11.0	15.7	14.7	15.2	14.7	14.0	14.4
10-14	9.6	10.4	10.0	16.3	14.4	15.4	15.0	13.6	14.3
15-19	9.2	11.2	10.2	12.0	10.3	11.1	11.4	10.5	10.9
20-24	12.5	15.1	13.8	7.8	8.2	8.0	8.7	9.5	9.1
25-29	11.9	11.2	11.5	5.8	6.9	6.4	7.0	7.8	7.4
30-34	8.6	8.3	8.5	5.1	5.6	5.3	5.8	6.2	6.0
35-39	7.0	6.0	6.5	4.0	4.6	4.3	4.6	4.9	4.7
40-44	4.9	4.4	4.6	3.9	4.5	4.2	4.1	4.4	4.3
45-49	3.7	2.9	3.3	2.6	2.9	2.8	2.9	2.9	2.9
50-54	2.9	2.3	2.6	2.5	3.3	2.9	2.6	3.1	2.9
55-59	1.9	1.3	1.6	2.1	2.4	2.2	2.0	2.2	2.1
60-64	1.0	0.9	1.0	1.7	1.8	1.8	1.6	1.6	1.6
65-69	0.6	0.3	0.4	1.2	1.3	1.2	1.0	1.1	1.1
70-74	0.4	0.2	0.3	1.1	1.3	1.2	1.0	1.1	1.0
75-79	0.1	0.3	0.2	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6
80+	0.2	0.1	0.2	0.8	0.9	0.9	0.7	0.8	0.7
Don't know/missing	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Number	3,663	3,680	7,344	14,627	15,157	29,784	18,291	18,837	37,128

TAB. 8.1: Exemple de statistiques disponibles sur les attributs des individus au niveau national : population kenyanne par âge, sexe et résidence - extrait de [KDHS, 2003a, p. 14]

Les informations les plus accessibles sont les caractéristiques - ou attributs - des individus. La plupart des pays mettent en place un recensement national régulier. En France, la collecte, l'analyse et la publication de ces données est prise en charge par l'INSEE<sup>3</sup>. Au Kenya, le recensement est publié sous la forme de la *Kenyan Demographic and Health Survey* (KDHS) [KDHS, 2003c, KDHS, 2003b, KDHS, 2003a]. Ces recensements fournissent systématiquement la pyramide d'âge (proportion d'individus de chaque sexe), les caractéristiques socio-démographiques des individus (emploi et catégorie d'emploi, situation maritale, enfants, budget, etc.) ainsi que des informations sur la répartition résidentielle de la population. Chaque recensement est adapté en fonction des problématiques propres au pays. Ainsi, la KDHS contient à partir de 2003 des

<sup>3</sup>Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

questions sur le planning familial, le VIH et les violences conjugales. Pour des raisons évidentes de confidentialité, mais aussi de manipulabilité des données, les résultats des recensements ne sont jamais disponibles de façon extensive ; des études synthétiques sont publiées chaque année avec une récapitulation des résultats. Les données sont souvent présentées sous forme de tableaux à double ou triple entrée. Par exemple, le tableau 8.1 représente la proportion d'habitants de chaque âge dans la population kenyenne en fonction du sexe et de la résidence. Le recensement constitue une base statistique fiable (collecte rigoureuse, représentative, et redressée) pour connaître et décrire les caractéristiques de la population.

### Liens sociaux

Children ever born and living															
Percent distribution of all women and currently married women by number of children ever born, and mean number of children ever born and mean number of living children, according to age group, Kenya 2003															
Age	Number of children ever born										Total	Number of women	Mean number of children ever born	Mean number of living children	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9					10+
ALL WOMEN															
15-19	81.5	14.7	3.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1,856	0.23	0.21
20-24	32.7	31.1	22.1	10.9	2.8	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1,691	1.21	1.09
25-29	10.6	17.9	20.5	22.5	16.3	7.3	3.2	1.0	0.3	0.1	0.2	100.0	1,382	2.60	2.32
30-34	3.8	8.5	16.7	17.7	17.5	13.0	11.1	6.0	3.8	1.1	0.8	100.0	1,086	3.88	3.48
35-39	2.8	3.7	8.9	13.2	15.0	15.9	13.4	11.1	8.3	3.5	4.2	100.0	871	5.01	4.34
40-44	1.9	3.1	4.4	11.9	13.5	15.6	12.4	11.5	9.2	7.5	9.0	100.0	788	5.72	5.07
45-49	2.7	2.8	4.6	6.9	7.9	11.8	12.9	11.0	13.9	8.6	17.1	100.0	521	6.52	5.53
Total	28.1	14.8	12.7	11.5	9.0	6.9	5.5	4.0	3.2	1.8	2.5	100.0	8,195	2.75	2.43
CURRENTLY MARRIED WOMEN															
15-19	34.7	46.4	16.8	1.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	333	0.86	0.80
20-24	10.7	33.5	32.6	17.7	4.9	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	965	1.75	1.57
25-29	4.0	13.3	22.6	26.3	19.2	9.2	3.5	1.1	0.4	0.2	0.2	100.0	1,056	2.96	2.65
30-34	2.0	6.5	15.3	18.8	18.3	13.7	12.2	6.9	4.3	1.1	1.0	100.0	873	4.11	3.70
35-39	1.0	2.7	7.8	12.6	15.6	16.1	13.2	12.5	10.0	3.6	5.0	100.0	691	5.31	4.62
40-44	1.5	1.7	3.3	11.0	13.6	16.1	12.6	11.9	10.2	8.0	10.2	100.0	614	5.97	5.30
45-49	2.8	0.6	3.7	6.4	6.7	13.1	11.6	11.0	14.5	10.2	19.5	100.0	388	6.87	5.86
Total	6.2	14.3	16.9	16.2	12.7	9.8	7.3	5.6	4.7	2.5	3.7	100.0	4,919	3.80	3.36

TAB. 8.2: Exemple de statistiques disponibles sur la dépendance attributs/liens sociaux : Nombre d'enfants mis au monde par tranche d'âge et statut matrimonial - extrait de [KDHS, 2003a, p. 82]

Evidemment, on ne connaît pas les liens existant dans une grande population. Néanmoins, on possède quelques informations sur ces liens, qui sont négligées dans les études actuelles. Prenons l'exemple de la structure familiale dans un pays. Cette structure familiale a un impact fort sur de nombreux phénomènes sociaux, puisque les liens familiaux conduisent à des interactions fréquentes et à une influence normative reconnue. Pour le Kenya, l'étude KDHS fournit les statistiques du nombre d'enfants d'une femme en fonction de son âge et de son statut marital (lien de filiation) (tableau 8.2). On connaît également des contraintes d'âge sur les liens matrimoniaux par le recensement ou des études sociologiques complémentaires [Mburugu et Adams, 2004] ; au Kenya, les femmes se marient tôt, à partir de 15 ans.

La polygamie est autorisée ; les hommes se marient plus tard (environ 25 ans), et prennent plus tard une seconde ou un troisième femme s'ils en ont les moyens financiers. Des données similaires sur la structure de la famille sont disponibles pour la France et la plupart des pays (par exemple, âge du premier enfant étant donné le niveau d'études [Robert-Bobée *et al.*, 2006], ou critères de choix du conjoint en fonction de l'emploi, de l'âge et du statut social [Vanderschelden, 2006]). Ces données indirectes peuvent généralement être considérées comme fiables.

Les liens autres que la famille sont moins bien connus. On sait au moins qualitativement que les amitiés se nouent la plupart du temps entre individus du même sexe ayant un âge proche. Les collègues partagent nécessairement le même travail, donc souvent la même zone géographique. Ces observations sont qualitatives, et approximatives, mais peuvent être mesurées plus précisément sur le terrain. On sait aussi que les amitiés provoquent des rencontres plus fréquentes s'il y a proximité géographique.

### Affiliations

School attendance									
Percentage of the de facto household population age 6-24 years currently attending school, by age, sex, and residence, Kenya 2003									
Age	Male			Female			Total		
	Urban	Rural	Total	Urban	Rural	Total	Urban	Rural	Total
6-10	89.7	89.3	89.4	93.3	88.4	89.2	91.6	88.9	89.3
11-15	91.7	90.2	90.4	82.5	89.4	88.3	87.0	89.8	89.4
6-15	90.6	89.7	89.9	88.3	88.9	88.8	89.4	89.3	89.3
16-20	35.5	55.1	51.3	23.0	41.5	36.9	28.6	48.5	44.1
21-24	13.6	9.4	10.6	4.8	3.4	3.8	8.7	6.2	6.9

Note: Table includes children attending kindergarten/pre-school.

TAB. 8.3: Exemple de statistiques disponibles sur les affiliations des individus : Scolarisation au Kenya - extrait de [KDHS, 2003a, p. 43]

L'étude des enquêtes de recensements de plusieurs pays révèle que des informations sont souvent disponibles pour une partie des affiliations. Par exemple, le taux d'emploi de la population étant donné le genre, le niveau d'éducation et la catégorie socio-professionnelle peut être considéré comme une donnée décrivant les conditions d'affiliation d'un individu à un travail étant données ses caractéristiques. De même, des statistiques sur la scolarisation des jeunes, ou au contraire leur travail [Valdelièvre, 2001], sont disponibles. Nous nommerons affiliations ces caractéristiques, institutions ou activités qui provoquent la rencontre de plusieurs individus. En France, l'INSEE a publié plusieurs études sur la participation aux associations [Febvre et Muller, 2004] [Febvre et Muller, 2003] [Prouteau et Wolff, 2005], souvent rapportée aux caractéristiques socio-démographiques des individus (par

exemple, participation aux associations en fonction de l'âge, de la catégorie socio-professionnelle et du type d'habitat [Prouteau et Wolff, 2002]). Au Kenya, on dispose par exemple des statistiques de scolarisation des enfants (tableau 8.3).

On dispose également d'informations sur les affiliations elles-mêmes. Par exemple, pour l'école en France, on connaît la typologie des établissements scolaires ([INSEE, 2007a] [INSEE, 2007b] [Thaurel-Richard et Thomas, 2006]). Des statistiques sont aussi disponibles sur la taille et le nombre d'entreprises ou de clubs sportifs par région. Au Kenya, les études de terrain indiquent qualitativement que les femmes se retrouvent autour du moulin à grain, près de la rivière pour aller puiser l'eau, ou encore au marché. Dans la région Nyanza du Kenya, nous apprenons la situation géographique des principaux marchés, ce qui nous permet de déterminer dans quel marché se retrouvent les habitants des villages. Pour l'éducation en France, on sait que les jeunes entre 12 et 17 ans sont scolarisés dans des collèges en fonction de leur zone géographique ; qu'ils rencontreront dans ce collège des jeunes de la même tranche d'âge et de la même zone géographique ; et nous connaissons la taille de cet établissement, ce qui signifie que les jeunes seront regroupés dans des collèges distincts entre lesquels les interactions seront faibles.

### Interactions

Tout comme les liens relationnels, les interactions sont extrêmement difficiles à collecter. En France, quelques études ont été menées dans l'enquête "Rencontres" publiée par l'INSEE ; cette enquête nous fournit des statistiques sur la fréquence d'interactions provoquées par un type de relation sociale donnée : fréquence de rencontre des adultes avec leurs parents (avec ou sans éloignement géographique), fréquence des repas avec des voisins ou des collègues.

Les interactions sociales jouant un rôle central dans le processus de diffusion d'innovations, les sociologues qui travaillent sur le terrain enquêtent sur ces interactions, et en révèlent une partie dans leurs publications. Ces travaux peuvent porter de façon générale sur les interactions sur l'innovation elle-même, afin de déterminer avec qui les adoptants potentiels discutent, ainsi que le contenu et l'impact de ces discussions. Les articles de Watkins fournissent ce type d'observations qualitatives [Watkins *et al.*, 1995a], [Rutenberg et Watkins, 1997], [Watkins, 2000]. D'autres chercheurs étudient explicitement l'impact du réseau social sur la diffusion de l'innovation, avec des méthodes quantitatives [Kohler *et al.*, 2001], [Behrman *et al.*, 2002]). Dans certains cas, les notes de terrain constituent également des mines d'information, telles celles publiées par Watkins [Watkins *et al.*, 1995b]. On y apprend quand et où les interactions se produisent en général, mais aussi quelles relations supportent les interactions sur la contraception.

On apprend ainsi que les discussions prennent souvent place pendant le travail, autour du moulin à grain ou encore avant l'office à l'église. Les déplacements se faisant

généralement à pied, les gens se rencontrent sur le même chemin et bavardent en marchant. De façon générale, les femmes discutent avec les femmes, les hommes avec les hommes. Cela est d'abord dû à la forte différenciation entre les activités des hommes et des femmes. Les femmes se retrouvent en allant chercher de l'eau, en pilant le riz, en travaillant aux champs. Au marché, les femmes se regroupent dans la zone des fruits et légumes, tandis que les hommes vendent leurs propres produits de leur côté. Même sur les plages, hommes et femmes se retrouvent dans des zones distinctes. Les femmes discutent assez librement contraception avec d'autres femmes de leur tranche d'âge, ou avec leur mère. Elles préfèrent éviter d'aborder ce sujet polémique polémique, les hommes ayant assez peu l'habitude de se laisser contredire par leurs femmes dans cette culture - 45% des femmes interrogées estiment que leur époux peut légitimement les battre si elles le contredisent [KDHS, 2003a, p. 45]. Par contre, elles abordent parfois cette problématique avec le frère de leur mari, ce qui constitue une façon indirecte de détecter l'avis de leur mari avant un contact plus direct.

### 8.3.5 Résumé

#### Générateurs existants

Les générateurs existants ne répondent pas aux attentes de la simulation sociale. Les générateurs de grands réseaux sont conçus à la base comme des modèles explicatifs, qui démontrent d'un mécanisme donné (attachement préférentiel, création de raccourcis) fait apparaître une propriété observée sur des réseaux divers. Ils ne peuvent en aucun cas être dits descriptifs de réseaux réels. Les modèles de petits groupes s'avèrent descriptifs, mais ne peuvent pas être étendus facilement à de plus grands réseaux. En réalité, ces modèles nous seront surtout utiles par les concepts de modélisation et de génération qu'ils introduisent ; l'interprétation - nécessairement subjective - de ces apports est résumée dans la table 8.4.

#### Données disponibles

Nous avons réalisé ici un tour d'horizon des informations secondaires disponibles sur les réseaux d'interaction ou les réseaux sociaux. Les informations sur les processus de sélection sociale nous enseignent les facteurs explicatifs de la présence de liens. Les observations statistiques ne constituent pas une contrainte suffisante dans notre cas ; on peut trouver une infinité de générateurs de réseaux dans lesquels la distance moyenne est courte. Par contre, de nombreuses données sont disponibles sous forme de statistiques dispersées et d'observations qualitatives riches, à la fois sur les caractéristiques des individus ("qui sont-ils?"), leurs affiliations ("où se rencontrent-ils souvent?"), les relations durables et les interactions existantes. *Ces observations qualitatives et statistiques éparses constituent la seule information de terrain disponible à grande échelle.* Il semble donc cohérent de les exploiter au maximum pour contraindre les réseaux que nous génèrerons. Avant tout, il convient

<p><b>interactions et réseaux sociaux</b>  Les relations sociales durables provoquent des interactions plus ou moins fréquentes, et de nature différente, en fonction de leur type et des caractéristiques des individus  Il existe des interactions en dehors de toute relation sociale durable</p>
<p><b>processus de sélection sociale</b>  L'existence d'un lien entre deux individus dépend des caractéristiques de ces individus .  Certains liens sociaux durables se créent par transitivité.  Les liens se créent en fonction des opportunités de rencontre, qui sont souvent des pressions externes conduisant à des interactions plus ou moins superficielles .</p>
<p><b>observations statistiques</b>  La densité des réseaux sociaux est faible.  Certains réseaux révèlent une répartition des degrés de connectivité en loi de puissance.  Le taux de clustering est élevé dans les réseaux sociaux.  La distance moyenne entre deux individus est relativement courte (non proportionnelle à la taille de la population).</p>
<p><b>statistiques éparses et observations qualitatives</b>  Les caractéristiques socio-démographiques des individus sont disponibles et fiables.  Des informations existent sur certains liens durables, comme la structure familiale.  On connaît la probabilité d'affiliation des individus étant données leurs caractéristiques.  On a des informations qualitatives sur la fréquence des interactions étant donné l'affiliation ou le type de lien social.</p>
<p><b>modèles</b>  Un processus aléatoire de création de liens suffit à faire apparaître une courte distance moyenne.  La répartition des degrés en loi de puissance peut apparaître par un processus d'attachement préférentiel .  On peut décrire la création de liens par les affiliations.  On peut générer des liens sociaux en associant des liens créés en fonction des attributs, et la création de liens par transitivité.  Pour générer des réseaux plus descriptifs, il est pertinent de créer d'abord une population réaliste, puis de créer les liens sociaux en fonction des attributs individuels.</p>

TAB. 8.4: Interprétation des données et modèles existants utilisée pour construire le générateur de grand réseaux

néanmoins de trouver un formalisme permettant de regrouper ces statistiques et observations qualitatives sous une forme commune, utilisable en tant que paramètre pour un générateur de graphe.

## 8.4 Modèle

### 8.4.1 Approche et hypothèses

Une analyse critique des données disponibles a révélé l'existence de données statistiques ou qualitatives susceptibles de contraindre les réseaux. Les attributs des agents peuvent être supposés connus. On dispose aussi d'observations sur les liens eux-mêmes (e.g. structure familiale) et surtout sur les raisons pour lesquelles des liens sont sus-

ceptibles d'apparaître (école, lieu de travail, proximité géographique). Or, plusieurs modèles ont prouvé que la génération de réseaux sur la base des attributs des agents, par transitivité, ou par projection des affiliations, donnent de bons résultats descriptifs. Il semble donc pertinent de coupler les observations qualitatives avec les processus de sélection sociale connus, en nous inspirant des modèles génératifs existants. Rappelons que nous ne cherchons pas à expliquer ni à reproduire le processus réel par lequel apparaissent les liens sociaux ou les liens d'interaction. Notre but est de décrire la structure des relations sociales de façon plus réaliste, ainsi que la structure des interactions. Néanmoins, afin d'atteindre cet but, nous nous inspirerons des processus qui font apparaître ces liens dans la réalité.

Tous les réseaux sont différents. D'une part, la structure des relations sociales varie, pour une même population, en fonction de ce que nous appelons réseau social (interaction, confiance, relation sociale durable). D'autre part, les populations sont très différentes par leur culture, leurs activités et autres facteurs idiosyncratiques. On ne peut donc pas générer un réseau de façon générique ; on peut par contre créer un générateur paramétrable en fonction des observations disponibles sur la population et les interactions. Dans un premier temps, il est nécessaire de formaliser les observations qualitatives et statistiques éparées sous une forme unique, suffisamment flexible pour s'adapter à de nombreux cas, mais assez formelle pour être utilisée comme paramètre.

## 8.4.2 Formalisation des observations

### Types de liens

Différents types de relations sociales ou d'interaction existent dans la population. Nous notons  $\mathcal{T}$  l'ensemble des types de liens représentés.  $\mathcal{T}$  est un paramètre du modèle, fourni par l'utilisateur en fonction de ses besoins. L'utilisateur distingue différents types de liens car chacun de ces types conduit à des interactions différentes (distinction par l'utilisation dans les simulations), parce qu'il dispose de données différentes pour paramétrer l'apparition de chacun de ces types de liens (disponibilité des données), ou parce qu'il veut tester des mécanismes générateurs différents pour ces liens (utilisation exploratoire). Si l'on décrit la structure familiale, cet ensemble peut être  $\mathcal{T} = \{ \text{époux, enfant de, cousins, frères et soeurs, beau-père, belle-mère, grand-père, grand-mère} \}$ . Si l'on s'intéresse aux relations sociales durables, il peut être pertinent d'utiliser  $\mathcal{T} = \{ \text{époux, famille proche, famille éloignée, amis, copains, collègues} \}$ . Les interactions pourraient quant à elles être définies par  $\mathcal{T} = \{ \text{voisins, collègues, famille proche, famille éloignée, amis proches, amis éloignés} \}$ .

Certains de ces liens doivent être dirigés : A est l'enfant de B et non l'inverse. Pour d'autres, l'utilité de différencier la direction des liens est faible, ou les données disponibles ne permettent pas de distinguer ces directions ; ainsi, les liens amicaux seront probablement supposés bidirectionnels. L'utilisateur du modèle fournit en paramètre l'information sur la directionnalité de chaque lien, formalisée ici par les ensembles de

liens dirigés  $\mathcal{T}^{dir}$  et non dirigés  $\mathcal{T}^{indir}$  tels que  $\mathcal{T} = \mathcal{T}^{dir} \cup \mathcal{T}^{indir}$  (il ne peut bien sûr pas exister de liens à la fois directs et indirects :  $\mathcal{T}^{dir} \cap \mathcal{T}^{indir} = \{\emptyset\}$ ).

Enfin, l'utilisateur du modèle doit définir par quel principe chaque type de lien doit être généré. Comme cela a été proposé dans les graphes aléatoire markoviens, nous autorisons la définition de liens créés par transitivité  $\mathcal{T}^{trans} \subset \mathcal{T}$  et de liens créés en fonction des attributs de chaque agent  $\mathcal{T}^{att} \subset \mathcal{T}$ . Ces deux ensembles sont fournis en paramètre, tels que  $\mathcal{T} = \mathcal{T}^{trans} \cup \mathcal{T}^{att}$ . Dans certains cas, un même type de lien pourra apparaître pour chaque principe générateur, auquel cas on peut avoir  $\mathcal{T}^{trans} \cap \mathcal{T}^{att} \neq \{\emptyset\}$ . Par exemple, l'utilisateur peut souhaiter décrire la création de liens amicaux à cause d'attributs communs ainsi que par transitivité.

Dans l'exemple du Kenya, étant données les observations de terrain, nous représentons les types de liens  $\mathcal{T} = \{ \text{époux, mère de, collègues, amis, père de, frères ou soeurs} \}$ . Les liens "mère de" et "père de" doivent être dirigés, contrairement aux autres liens :  $\mathcal{T}^{dir} = \{ \text{mère de, père de} \}$  et  $\mathcal{T}^{indir} = \{ \text{époux, collègues, amis, frères ou soeurs} \}$ . Nous disposons des données nécessaires pour créer les liens mère-enfants et époux sur la base des attributs. Les liens "collègues" seront créés par affiliation commune à une activité professionnelle, qui sera considérée comme un attribut. De même, nous supposerons que les amis dépendent de la situation géographique et de la classe d'âge. Les liens créés sur la base des attributs sont donc :  $\mathcal{T}^{att} = \{ \text{mère de, époux, collègues, amis} \}$ . Par contre, les liens entre frères et soeurs dépendent des liens familiaux déjà créés, de même que les liens père-enfant peuvent être créés par transivité de la relation mère-enfant et époux-époux. Les amitiés se créent également, pour une certaine part, par transivité. Par conséquent,  $\mathcal{T}^{trans} = \{ \text{père de, frères et soeurs, amis} \}$ .

### Formalisation des attributs

Dans cette présentation, nous supposerons qu'un agent représente un individu. Les attributs de ces individus contiennent toutes les caractéristiques propres aux individus susceptibles d'être utiles pendant la simulation (utilisation), ou d'influencer la création de liens (génération). L'ensemble des attributs  $Att$  est fourni en paramètre du modèle. Ces attributs sont des couples (attribut,valeurs), chaque attribut pouvant prendre une valeur parmi un ensemble de valeurs. Les valeurs possibles d'un attribut sont généralement discrétisées dans les données statistiques, même quand elles reflètent une valeur continue. Par exemple, les niveaux de salaire, ou les nombres d'enfants, sont définis par tranches. De même, l'âge est au mieux décrit à l'unité, mais la plupart du temps la population est analysée par tranche d'âge.

Nous avons vu que les attributs sont généralement interdépendants (8.3.4); par exemple, le nombre d'enfants d'une femme dépend de son âge et de son statut matrimonial, eux-mêmes dépendants du type d'habitat (rural ou urbain). Afin de décrire ces informations éparses sous un formalisme unique qui se prête à la génération, nous proposons d'utiliser des *réseaux bayésiens* (par ex. [Jensen, 1996]). Un noeud du réseau

School attendance									
Percentage of the de facto household population age 6-24 years currently attending school, by age, sex, and residence, Kenya 2003									
Age	Male			Female			Total		
	Urban	Rural	Total	Urban	Rural	Total	Urban	Rural	Total
6-10	89.7	89.3	89.4	93.3	88.4	89.2	91.6	88.9	89.3
11-15	91.7	90.2	90.4	82.5	89.4	88.3	87.0	89.8	89.4
6-15	90.6	89.7	89.9	88.3	88.9	88.8	89.4	89.3	89.3
16-20	35.5	55.1	51.3	23.0	41.5	36.9	28.6	48.5	44.1
21-24	13.6	9.4	10.6	4.8	3.4	3.8	8.7	6.2	6.9

Note: Table includes children attending kindergarten/pre-school.

		scolarisé	non scolarisé
		1-5	0
homme	6-10	0.894	0.106
	11-15	0.904	0.096
	16-20	0.513	0.487
	21-24	0.106	0.894
	>25	0	1
femme	1-5	0	1
	6-10	0.892	0.108
	11-15	0.883	0.117
	16-20	0.369	0.631
	21-24	0.038	0.962
>25	0	1	

TAB. 8.5: Formalisation des statistiques disponibles sur la scolarisation (*gauche*) sous forme de probabilités conditionnelles  $p(\text{scolarisation}|\text{sexe}, \text{age})$  (*à droite*).

décrit une variable aléatoire, qui correspond ici à un attribut d'agent. Chaque attribut peut prendre plusieurs valeurs  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$  qui définissent son *domaine*. Par exemple, l'attribut "genre" peut prendre les valeurs { homme, femme }. Les noeuds racines (sans parent) contiennent des probabilités initiales décrivant la probabilité que l'attribut prenne chacune des valeurs :  $\forall v \in C, p(V = v) \in [0 : 1]$ . Les liens entre attributs représentent les interdépendances entre attributs. L'absence de lien représente l'indépendance entre les attributs, soit parce que ces variables sont réellement indépendantes, soit parce que nous manquons d'information sur cette dépendance ou décidons de l'ignorer par simplification. Lorsqu'une variable a un ou plusieurs parents, les probabilités sont conditionnelles. Par exemple, pour deux parents  $X = \{x_1 \dots x_j\}$  et  $Y = \{y_1 \dots y_k\}$ , la table de probabilités conditionnelles décrit les probabilités associées à toutes les combinaisons possibles des valeurs des parents :  $\forall x \in X, \forall y \in Y, p(V = v|X = x, Y = y)$ .

Nous utiliserons cette table de probabilités conditionnelles pour formaliser toutes les interdépendances entre attributs. Par exemple, le recensement du Kenya [KDHS, 2003a, p. 43] contient des statistiques sur la scolarisation des jeunes Kenyans, qui indiquent la proportion de scolarisation par tranche d'âge, genre et habitat (tableau 8.5 à gauche). Par simplicité, nous choisissons de négliger la variable habitat. Les attributs "âge" et "sexe" sont donc liés à la variable "scolarisation", qui a pour domaine { scolarisé, non scolarisé }. Les probabilités conditionnelles correspondant à ces statistiques sont visibles dans le tableau 8.5 (*à droite*). Par exemple, la probabilité qu'une femme de 17 ans soit scolarisée est :  $p(\text{scolarisation} = \text{scolarisé}|\text{sexe} = \text{femme}, \text{age} = 16 - 20) = 0.369$ . Cette probabilité traduit qu'une femme de cet âge prise au hasard dans la population a 36.9% de chances d'être scolarisée, conformément aux statistiques. Evidemment, les probabilités du domaine de la variable "scolarisation" somment à 1. On notera que les statistiques originales ne contiennent pas d'information sur la scolarisation au-delà de 24 ans; nous considérons ici que cette scolarisation est nulle à partir de 25 ans (lignes en italique dans le tableau). Nous aurions pu compléter ces informations par des statistiques sur l'enseignement supérieur.

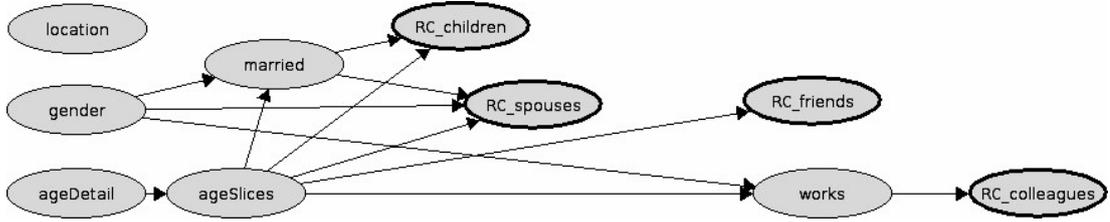


FIG. 8.2: Réseau bayésien décrivant les attributs des agents  $BN^{att}$  dans l'exemple du Kenya

variable	signification	domaine
location	localisation géographique	abstraite sous forme de 20 zones principales $\{Z1...Z20\}$
gender	sexe	$\{\text{homme, femme}\}$
ageDetail	age détaillé	$\{1,2...100\}$
ageSlices	classe d'âge	$\{1-5,6-10,11-15...96-100\}$
works	type d'activité professionnelle	$\{\text{pasDeTravail}, T1, T2...T15\}$
married	statut matrimonial	$\{\text{célibataire, marié}\}$
RC_children	nombre d'enfants ( $degre^{mere\ de}$ )	$\{0...10\}$
RC_spouses	nombre de femmes ( $degre^{spouses}$ )	$\{0...5\}$
RC_friends	nombre d'amis ( $degre^{amis}$ )	$\{0...25\}$
RC_colleagues	nombre de collègues ( $degre^{colleagues}$ )	$\{0...10\}$

TAB. 8.6: Domaines des variables représentées dans le réseau Bayésien 8.2

Pour la suite du processus de génération, nous imposons la présence de quelques attributs spécifiques. Pour chaque type de lien créé en fonction des attributs, nous imposons la description du degré de connectivité de chaque agent pour ce type de lien :  $\forall t \in \mathcal{T}^{att}, \exists degre^t \in Att$ . Considérer le degré de connectivité comme un attribut entre en contradiction avec les habitudes en génération de graphe. Pourtant, du strict point de vue des données disponibles, cela s'avère naturel. Par exemple, le nombre d'enfants d'une femme dépend de son âge et de sa situation matrimoniale. Au Kenya, le nombre d'épouses d'un homme dépend de son âge et de sa situation matrimoniale : célibataire avant un certain âge (facteur culturel), première femme aux alentours de 25 ans, seconde épouse quelques années après, éventuellement veuf à partir d'un certain âge. D'autres degrés de connectivité ne semblent pas dépendre des autres attributs, comme par exemple le lien amical. On peut alors définir  $degre^{amitie}$  par un noeud isolé aux probabilités identiques pour tous les individus. Si l'on souhaite décrire un principe d'attachement préférentiel, il suffit de décrire une faible probabilité de connectivité élevée.

Le réseau bayésien décrivant les attributs des agents est appelé  $BN^{att}$ , et constitue bien sûr un paramètre du modèle. Ce formalisme est suffisamment flexible pour laisser une grande latitude à l'utilisateur, tout en étant assez formel pour permettre une génération automatique du graphe. Notons que dans un réseau de ce type, un

lien représente une dépendance. Réciproquement, l'absence de lien ne représente pas nécessairement l'indépendance, mais notre manque de connaissances, ou notre volonté de simplifier les connaissances, sur cette indépendance.

Le réseau bayésien décrivant les attributs et leurs interdépendances est présenté en figure 8.2. Comme l'indiquent les domaines des variables (tableau 8.6), nous avons abstrait plusieurs éléments, dont la localisation géographique et l'activité professionnelle. On remarquera que les réseaux Bayésiens offrent une grande flexibilité dans la codification de statistiques existantes ; par exemple, la variable “ageDetail” est paramétrée par les statistiques de la pyramide des âges, et nous simplifions cet âge détaillé sous forme de classes d'âges pour lesquelles les statistiques sont disponibles. Les attributs dont le contour est épais (sur cette même figure 8.2) représentent les degrés des différents liens exigés dans la méthodologie. Conformément aux données du recensement, nous supposons que le nombre d'enfants dépend du statut matrimonial et de l'âge. Pour une femme, le nombre d'époux est 1 si elle est déclarée mariée, et 0 sinon. Pour un homme, ce nombre est 0 s'il est considéré comme célibataire, et varie entre 1 et 4 s'il est marié, en fonction de son âge. Le nombre d'amis est supposé être d'environ 4, avec des probabilités normales autour de cette valeur. Enfin, le nombre de collègues est supposé être de 3 pour les agents qui travaillent.

### Formalisation des dépendances attributs/liens

Nous avons décidé de décrire la probabilité d'existence de liens en fonction des valeurs des attributs des agents, c'est à dire que la probabilité d'existence d'un lien  $p(L^{a_1, a_2} = 1)$  entre deux agents  $a_1, a_2 \in \mathcal{A}$  dépend de la valeur de leurs attributs  $Att(a_1), Att(a_2)$  :  $p(L^{a_1, a_2} = 1 | Att(a_1), Att(a_2))$ . Les réseaux Bayésiens sont particulièrement pertinents pour décrire cette probabilité conditionnelle. Un exemple de réseau bayésien d'appariement pour le lien “époux” est présenté dans la figure 8.3. On reconnaît à gauche les blocs correspondant aux attributs de l'agent 1 (en haut) et de l'agent 2 (en bas), correspondant à deux copies du réseau d'attributs présenté en figure 8.2. Les noeuds au contour épais représentent les conditions d'appariement. La variable à droite décrit l'existence d'un lien, ou l'absence de lien entre les agents dont les attributs sont décrits  $p(L_t^{a_1, a_2})$ . Cette probabilité d'appariement doit renvoyer 0 si l'appariement est impossible, et jusqu'à 1 si l'appariement est possible. La normalisation de cette probabilité en fonction de la taille de la population est gérée automatiquement pendant l'étape de génération. Un tel réseau bayésien, que nous nommons *réseau Bayésien d'appariement*, doit être fourni pour chaque type de lien créé en fonction des attributs :  $\forall t \in \mathcal{T}^{att}, \exists BN^{appar, t}$ .

Ici, les variables “a2\_female” et “a1\_male” prennent la valeur 1 si les agents 2 et 1 sont respectivement une femme et un homme. La variable “ageWife” calcule la probabilité de chaque tranche d'âge plausible pour la femme sachant l'âge de l'homme ; la variable “rightAge” confirme que l'agent 2 a bien un âge correspondant à cette tranche d'âge. La variable “sameLocation” vérifie que chacun des agents habite dans la même zone géographique (opération d'égalité représentée par des probabilités). Les variables “a1\_created\_spouses” et “a1\_remaining\_spouses”, ainsi que leur équivalent pour  $a_2$ , sont

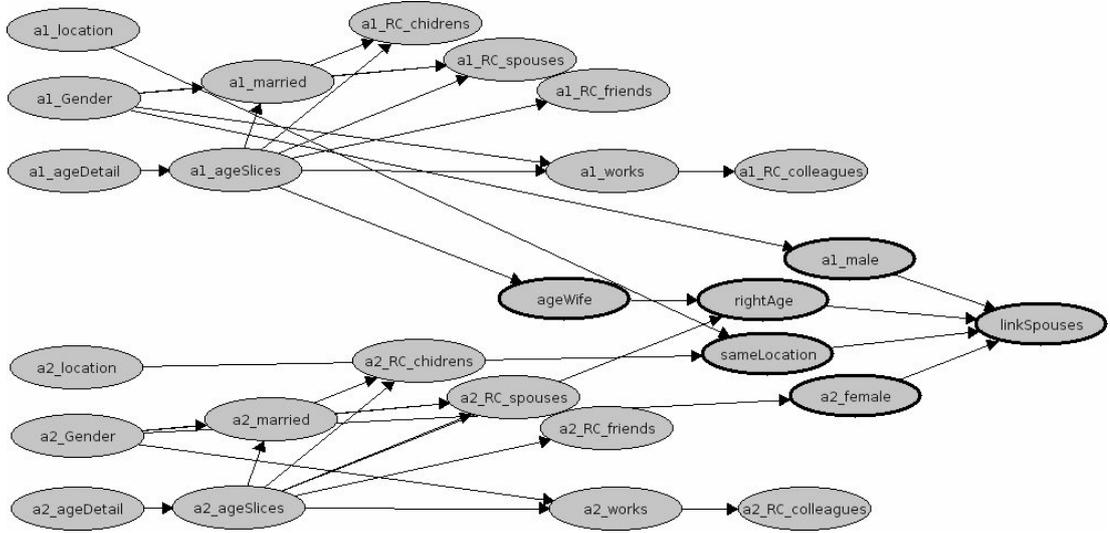


FIG. 8.3: Exemple de réseau bayésien d'appariement pour le lien "époux" dans l'application au Kenya.

automatiquement créées et gérées par le générateur. Elle permettent de prendre en compte le nombre de liens déjà créés pour un agent, afin de respecter le degré demandé pendant la génération. Enfin, le noeud "linkSpouses" correspond à la variable Booléenne  $p(L_t^{a_1, a_2})$ . Sa table de probabilité conditionnelle réalise une opération ET sur tous les noeuds booléens parents. Cet exemple montre que les tables de probabilités conditionnelles permettent d'effectuer des opérations mathématiques (soustraction, addition), des comparaisons (supérieur, égal, inférieur) ou Booléennes (et, ou, ou exclusif).

### Formalisation des liens par transitivité

Nous définissons la création de liens par transitivité par un ensemble de règles probabilistes passées en paramètre. Nous supposons que la création d'un lien par transitivité est probabiliste et non certaine, et qu'elle dépend des types de liens existants. Une règle de création par transitivité s'écrit donc :  $p(L_{t_1}^{a_1, a_2} = 1 | L_{t_2}^{a_1, a_3} = 1, L_{t_3}^{a_3, a_2} = 1)$ . Notons que l'ordre de ces règles a une importance sur le réseau final.

Pour décrire la structure familiale du Kenya, nous avons décidé de créer le lien de paternité par transitivité. Ainsi, pour  $\mathcal{T} = \{\text{mère de, époux, père de}\}$ , on peut définir  $p(L_{t_{\text{père de}}}^{a_1, a_2} = 1 | L_{t_{\text{époux}}}^{a_1, a_3} = 1, L_{t_{\text{mère de}}}^{a_3, a_2} = 1) = 1$ . Cette règle crée par transitivité un lien père-fils entre le mari d'une femme et les enfants de cette femme. On pourrait objecter qu'une telle règle est arbitraire, l'époux d'une femme n'étant pas nécessairement le géniteur de ses enfants. La réponse à cette objection est triple. D'une part, la culture est telle au Kenya qu'une femme a assez peu de relations extra-conjugales. D'autre part, si un utilisateur du modèle souhaite créer des conditions de création de lien plus détaillées, cela est autorisé par le formalisme et peut être réalisé facilement. Enfin, nous créons un modèle, donc une simplification de la réalité.

## 8.4.3 Génération des liens

paramètres	notation
<b>types de liens</b>	
types de liens décrits	$\mathcal{T}$
liens dirigés et non dirigés	$\mathcal{T}^{dir}$ et non dirigés $\mathcal{T}^{indir}$ tels que $\mathcal{T} = \mathcal{T}^{dir} \cup \mathcal{T}^{indir}$ ( $\mathcal{T}^{dir} \cap \mathcal{T}^{indir} = \{\emptyset\}$ )
liens créés par transitivité	$\mathcal{T}^{trans} \subset \mathcal{T}$
liens créés en fonction des attributs	$\mathcal{T}^{att} \subset \mathcal{T}$
<b>réseaux bayésiens</b>	
attributs	$Att = \{(nom, valeurs) \dots (nom, valeurs)\}$ , avec $\forall t \in \mathcal{T}^{att}, \exists degre^t \in Att$
dépendances entre attributs	$BN^{att}$
réseaux d'appariement	$\forall t \in \mathcal{T}^{att}, \exists BN^{appari,t}$
règles de transitivité	$\{\dots, p(L_{t_1}^{a_1, a_2} = 1   L_{t_2}^{a_1, a_3} = 1, L_{t_3}^{a_3, a_2} = 1) = x, \dots\}$
taille de la population	$ \mathcal{A}  \in \mathbb{N}$

TAB. 8.7: Paramètres du générateur de réseaux

## Principe de génération

Le générateur, sur la base des paramètres résumés dans le tableau 8.7, doit générer un réseau compatible avec les observations. Les paramètres sont les contraintes que l'utilisateur désire introduire sur la structure du réseau généré.

Différents principes de génération viennent à l'esprit pour résoudre ce problème. On pourrait créer et ajouter les agents au fur et à mesure de la création de liens. Par exemple, on crée d'abord toutes les mères, puis on crée chaque enfant de façon à satisfaire les paramètres (nombre des enfants et âge). Un tel principe atteindrait rapidement ses limites. Ainsi au Kenya, il existe des adultes dont les parents n'existent plus dans la pyramide d'âge ; ceux-ci ne seraient pas créés en générant d'abord la tranche la plus âgée de la population. D'ailleurs, de nombreux jeunes enfants sont orphelins, la population adulte étant fortement touchée par le VIH. Plus généralement, lorsque l'on cherche à créer différents types de liens, on ne peut plus se satisfaire du principe d'ajout des agents à la demande.

Nous utilisons donc le principe le plus générique et le plus "simple". Nous commençons par générer toute la population d'agents avec ses attributs, de façon à ce qu'elle soit compatible avec les paramètres d'attributs. Ensuite, nous créons les liens entre les agents en fonction de leurs attributs. Enfin, nous ajoutons les liens par transitivité.

### Génération d'une population représentative d'agents

La génération d'une population d'agents  $\mathcal{A}$  de taille  $|\mathcal{A}|$  se fait en créant successivement chaque agent individuellement à l'aide du réseau bayésien décrivant les attributs des agents  $BN^{att}$ . Pour générer un agent, nous utilisons les réseaux bayésiens comme un modèle génératif. Plusieurs solutions existent [Jensen, 1996]; nous retenons ici la plus simple, celle des tirages de Monte-Carlo, qui illustrera plus simplement ce processus. Pour chacun des agents, nous allons générer ce que nous appellerons un *prototype d'agent*.

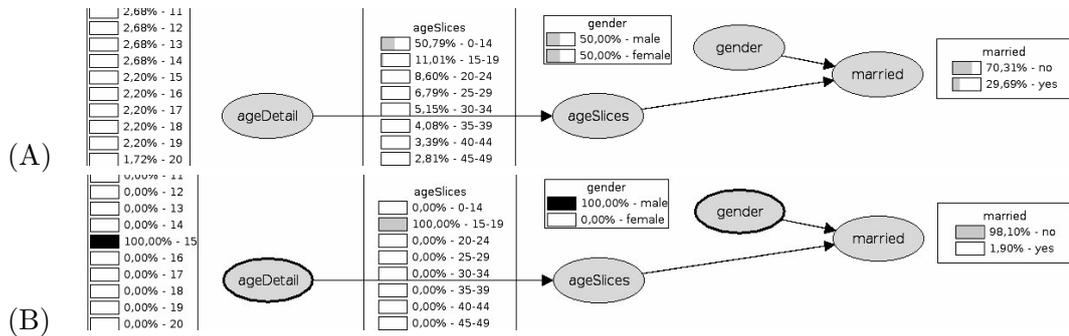


FIG. 8.4: Exemple de propagation d'évidence pendant la génération des attributs des agents. Les “moniteurs” (boîtes sur la figure) affichent les probabilités correspondant à chaque attribut. La figure (A) représente les probabilités fournies en paramètre, sans évidence; en figure (B), une évidence a été ajoutée pour un attribut, ce qui provoque un changement dans les probabilités de chacun des attributs liés.

Pour générer un agent, nous utilisons le réseau Bayésien décrivant les attributs  $BN^{att}$  comme un modèle génératif. Les probabilités “de base” du réseau Bayésien constituent notre connaissance sur le monde en général. La figure 8.4 A décrit les probabilités de base; par exemple,  $p(\text{ageSlices} = 15 - 19)$  est de 11.01% (un individu pris au hasard a 11.01% de chances d'avoir entre 15 et 19 ans). Nous pouvons prendre en compte une connaissance supplémentaire en utilisant la notion d'*évidence*. L'évidence constitue une connaissance temporaire, qui attribue une probabilité certaine à la valeur d'une variable. Sur la figure B, nous ajoutons l'évidence  $p(\text{ageDetail} = 15) = 1$ , qui revient à affirmer que nous sommes certains que l'âge de l'individu est de 15 ans. Un moteur d'inférence Bayésienne permet de prendre en compte cette évidence  $Ev$  afin d'adapter les probabilités du réseau. Ainsi, en figure B, la probabilité  $p(\text{ageDetail} = 14)$  tombe à 0 (nous sommes certains que l'individu a 15 ans, il ne peut donc pas en avoir 14). Par contre, la probabilité  $p(\text{ageSlices} = 15 - 19|Ev)$  passe à 100%, puisqu'un individu de 15 ans est nécessairement dans la tranche d'âge 15-19 ans.

L'algorithme de génération (Alg. 8.1) d'un agent prototype utilise l'évidence pour générer les agents. Nous allons successivement traiter les attributs dans l'ordre indiqué par le réseau Bayésien (les parents d'abord jusqu'aux feuilles de l'arbre). Au

---

**Entrées:**  $BN^{att}$  le réseau bayésien décrivant les interdépendances entre attributs, avec  $\mathcal{V} = \{V^1 \dots V^n\}$  les variables du réseau, chacune ayant pour domaine  $V^i = \{v_1 \dots v_p\}$ .

**Entrées:**  $\forall V^i \in \mathcal{V}, \text{parents}(V^i) \subset \mathcal{V}$  les parents de chaque noeud

**Entrées:**  $\forall v \in V^i, p(V^i = v) \in [0 : 1]$  les probabilités associées à chaque attribut, dépendant éventuellement des parents de la variable et de l'évidence  $Ev$ , calculées par un moteur d'inférence

**Entrées:**  $Att$  les attributs de l'agent construit pendant l'algorithme, qui correspondent à des paires (attribut, valeur) :  $V^i = v_j$

- 1:  $Ev = \{\emptyset\}$
- 2:  $Att = \{\emptyset\}$
- 3: **pour** chaque  $V^i \in \mathcal{V}$  (depuis les racines jusqu'aux feuilles) **faire**
- 4:   choisir par tirage de Monte-Carlo une valeur  $v_j \in V^i$  en fonction de  $\forall v \in V^i, p(V^i = v | Ev)$
- 5:   ajouter  $V^i = v_j$  dans  $Att$
- 6:   ajouter  $p(V^i = v_j) = 1$  à  $Ev$
- 7:   exécuter le moteur d'inférence pour calculer les probabilités en fonction de l'évidence  $Ev$
- 8: **fin pour**
- 9: retourner  $Att$

---

Algorithme 8.1: Algorithme de génération d'un prototype d'agent

départ, nous considérons qu'il n'existe aucune information complémentaire, donc aucune évidence ( $Ev = \{\emptyset\}$ ). Pour chaque attribut  $V = \{v_1 \dots v_i\}$ , on choisit au hasard l'une des valeurs  $\{v_1 \dots v_i\}$  conformément aux probabilités décrites par le réseau Bayésien (tirage de Monte-Carlo). Par exemple sur la figure 8.4 (A), la probabilité de choisir la valeur 15 pour l'âge d'un agent est 0.022, ou 0.0172 pour 20 ans. Une fois la valeur  $v_j \in V$  choisie, elle est mémorisée dans l'agent. On ajoute alors l'évidence correspondant à cette valeur choisie  $p(V = v_j) = 1$ . Dans cet exemple, la valeur tirée aléatoirement est  $ageDetail = 15$ , et l'on ajoute l'évidence  $p(ageDetail = 15) = 1$ . Après avoir aléatoirement déterminé que cet agent représentera un homme (gender=male), la probabilité que l'agent soit marié devient sensiblement plus basse (figure 8.4 (B)), conformément à la réalité décrite par ce réseau : au Kenya, un jeune homme de 15 à 19 ans a peu de chances d'avoir déjà une épouse. Ce processus de tirage est répété pour tous les attributs, et l'agent ajouté à la population.

Cet algorithme 8.1 est répété  $|\mathcal{A}|$  fois pour générer toute la population. L'utilisation de l'évidence permet de générer des agents dont les attributs sont conformes aux conditions exprimées par le paramètre  $BN^{att}$ . La population générée  $\mathcal{A}$ , si elle est suffisamment grande, est représentative de la population réelle décrite par ce paramètre. Les attributs des agents de la population  $Att(a), \forall a \in \mathcal{A}$  sont maintenant définis en respectant les interdépendances entre attributs.

### Création des liens conditionnés par les attributs

Nous créons maintenant les liens de type  $\mathcal{T}^{Att}$  dans la population. Les réseaux d'appariement  $BN^t$  ( $t \in \mathcal{T}^{Att}$ ) décrivent la probabilité d'appariement de deux agents, probabilité calculée au niveau de la variable ( $p(L_t^{a_1, a_2} = 1)$ ). Si la génération des agents était simple, la création des liens devient conceptuellement plus délicate. Nous avons une grande population d'agents, avec plusieurs types de liens possibles, dont certains directs ou indirects; le nombre potentiel de liens est donc très élevé. La méthode intuitive, qui serait de parcourir toutes les paires d'agents, de calculer la probabilité d'appariement de ces agents et de l'utiliser pour créer - ou non - un lien, est donc trop coûteuse pour être utilisée. Heureusement, les réseaux bayésiens d'appariement peuvent être utilisés de façon à réduire cet espace des possibles. Notre mécanisme d'appariement (de création de lien basé sur les attributs des agents) va exploiter les réseaux Bayésiens d'appariement, en utilisant la notion d'évidence pour définir des ensembles dans la population (figure 8.5).

Sans évidence, la probabilité de créer un lien  $p(L_t^{a_1, a_2} = 1)$  a peu de sens; elle quantifie une possibilité<sup>4</sup> de création de liens pour deux agents  $a_1$  et  $a_2$  tirés au hasard dans la population  $\mathcal{A}$ . Mais dans ce processus d'appariement, nous nous intéressons uniquement aux ensembles d'agents susceptibles d'être liés par une relation de type  $t \in \mathcal{T}^{att}$ . Nous définissons donc l'évidence  $p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1$  pour traduire cette volonté. Le moteur d'inférence prend en compte cette évidence pour recalculer les probabilités des valeurs de chaque attribut pour  $a_1$  et  $a_2$ . Or, nous avons défini le réseau d'appariement comme un ensemble de contraintes sur la création de liens. La plupart de ces contraintes correspondent à des opérations ensemblistes; par exemple, le lien "mariage" a été défini pour  $a_1$  un homme,  $a_2$  une femme, chacun devant avoir les attributs "statut marital=marié" et "age  $\geq 15$ ". La prise en compte de  $p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1$  conduit donc à l'apparition de nombreuses probabilités de valeurs attributs nulles, qui peuvent être vues comme restreignant l'ensemble des agents candidats à jouer le rôle  $a_1$  et  $a_2$ : seuls les agents ayant des attributs aux probabilités non-nulles peuvent être liés. Nous notons ces ensembles  $A_1|p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1 \subset \mathcal{A}$  et  $A_2|p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1 \subset \mathcal{A}$ . Dans le cas du mariage,  $A_1|p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1$  décrit les femmes mariées et  $A_2|p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1$  les hommes mariés. Dans le cas général, comme on le voit sur la figure 8.5, ces ensembles peuvent avoir une intersection. Par exemple, le réseau Bayésien d'appariement de collègues ne définit pas d'exclusion entre  $a_1$  et  $a_2$ , qui ont pour seule contrainte d'avoir le même âge et la même résidence géographique.

Nous avons utilisé le réseau Bayésien d'appariement comme contrainte sur les liens possibles, ce qui nous a permis de restreindre l'espace des agents pouvant être liés. Nous devons maintenant prendre en compte la probabilité, plus ou moins forte, que

---

<sup>4</sup>Soulignons que  $p(L_t^{a_1, a_2} = 1)$  ne décrit pas la *probabilité* que deux agents tirés au hasard soient liés, puisque cette probabilité ne tient pas compte du nombre d'agents, ni du nombre de liens à créer pour chaque agent. La probabilité est seulement utilisée dans un réseau Bayésien pour décrire les contraintes sur l'appariement, et correspond donc à une *possibilité* de création de lien dont la valeur n'a pas de sens réel, hormis la probabilité 0 qui définit l'impossibilité de créer un lien.

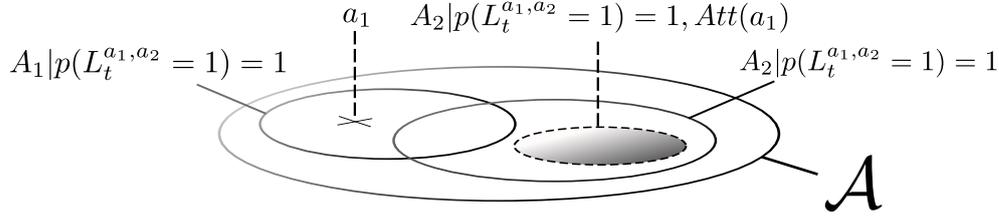


FIG. 8.5: Ensembles utilisés pour l'appariement des agents en fonction de leurs attributs pour un lien  $t \in \mathcal{T}^{att}$ .  $\mathcal{A}$  est la population complète,  $A_1|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1$  et  $A_1|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1$  les ensembles des agents qui peuvent potentiellement être liés par un lien du type  $t$ , et  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$  l'ensemble des agents avec lesquels un agent  $a_1 \in A_1|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1$  donné peut être lié.

deux agents soient liés entre eux, décrite par le réseau Bayésien. Nous sélectionnons donc au hasard un agent  $a_1$  parmi les candidats à être liés  $A_1|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1$ . Les attributs de cet agent donné doivent être pris en compte dans les probabilités de création de lien. Nous utilisons donc comme évidence les valeurs des attributs de l'agent  $a_1$  généré précédemment. Les probabilités tenant compte de cette évidence désignent maintenant un sous ensemble des candidats à jouer le rôle de  $a_2$  sachant les attributs de  $a_1$ , c'est-à-dire les agents qui peuvent être liés à cet agent précis. Cet ensemble, noté  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$ , est grisé sur la figure 8.5. Dans le cas du lien mariage, supposons que  $a_1$  soit un homme marié de 34 ans vivant dans la zone géographique Z1. L'ensemble des femmes pouvant être liées avec cet homme  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$  regroupe les femmes mariées vivant dans cette même zone géographique Z1, dont l'âge est suffisant, et dont le statut matrimonial est "marié".

Nous disposons maintenant d'un agent  $a_1$  que nous devons lier à l'un des agents de l'ensemble  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$ . Il s'agit maintenant de trouver une solution pour sélectionner un agent  $a_2$  parmi  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$ . Nous supprimons l'évidence  $p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1$ , puisque nous travaillons maintenant sur des agents dont nous savons qu'ils peuvent être liés, et désirons prendre en compte la probabilité plus ou moins importante de lier chaque paire d'agents. Ce choix doit respecter les probabilités de  $BN_t^{app}$ ; ainsi, il est très probable que l'épouse d'un homme soit plus jeune que lui, même s'il est possible - avec une faible probabilité - qu'elle soit plus âgée que lui. Nous ne pouvons donc pas choisir l'un des agents purement au hasard. Nous définissons deux solutions afin d'optimiser le coût de génération.

- si  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$  est suffisamment petit, on peut explorer tous les couples  $(a_1, a_2)$  possibles, et calculer pour chacun  $p(L_t^{a_1,a_2} | Att(a_1), Att(a_2))$ . Afin de ramener cette quantité à une probabilité, nous devons la normaliser par la taille de l'ensemble  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$ . Un simple tirage de Monte-Carlo permet de définir l'agent  $a_2$  auquel  $a_1$  sera lié par une relation de type  $t$ .
- si  $A_2|p(L_t^{a_1,a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$  est grand, l'exploration de tous les liens serait coûteuse. Une autre solution respectant les probabilités de liens est de générer un

- prototype d'agent en utilisant l'algorithme 8.1 (avec cette fois les probabilités du  $BN_t^{app}$  avec l'évidence  $p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1$  et  $Att(a_1)$ ), ce qui permet de sélectionner un agent avec lequel la probabilité de lien est plus ou moins élevée. Une fois ce prototype généré, on le recherche dans l'ensemble  $A_2 | p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$ ; si cet agent n'existe pas, on recommence la création de prototype jusqu'à trouver un agent compatible. Par sécurité, si de nombreuses générations échouent à trouver un agent existant dans l'ensemble, on revient à la première solution.
- bien sûr, si  $A_2 | p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1, Att(a_1) = \{\emptyset\}$ , la création de lien pour  $a_1$  est abandonnée.

Ce processus de génération est répété pour chaque type de lien  $t \in \mathcal{T}^{att}$ , tant qu'il existe des candidats à la création de liens  $A_1 | p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1$ . Il permet de (1) réduire le coût computationnel de génération et (2) de respecter les contraintes sur l'appariement introduites en paramètres par l'utilisation à l'aide de  $BN_t^{app}$ . Dans certains cas, la population générée ne permet pas de respecter les probabilités de ce paramètre, c'est-à-dire que  $A_2 | p(L_t^{a_1, a_2} = 1) = 1, Att(a_1)$  ne permet pas de respecter ces contraintes. Dans ce cas, le processus d'appariement liera néanmoins des agents quand cela est autorisé, mais potentiellement en faussant les probabilités d'appariement. Par exemple, on est certain qu'aucune femme trop jeune ou non mariée ne sera associée par un lien "mariage" à un homme; par contre, la proportion de liens de mariage dans lesquels la femme est plus âgée que l'homme peut être sur-représentée. Nous quantifierons ces erreurs après génération (*cf* 8.5.2).

Par souci de simplicité, nous ne décrivons pas ici toutes les subtilités du mécanisme d'appariement. Différentes contraintes sont introduites dans ce processus, comme par exemple l'impossibilité de lier un agent avec lui-même, ou l'interdiction de créer des doubles liens - dans le cas contraire, un agent pourrait être marié à sa propre fille, par exemple. Le processus gère également des variables supplémentaires décrivant le nombre de liens déjà créés pour chaque type de lien, et les met à jour pendant la génération, afin de tenir compte du degré  $degre^t$  requis par l'utilisateur.

### Création des liens par transitivité

La création des liens par transitivité, à l'aide des règles passées en paramètres, est triviale. Chacune de ces règles est écrite  $p(L_{t_1}^{a_1, a_2} = 1 | L_{t_2}^{a_1, a_3} = 1, L_{t_3}^{a_3, a_2} = 1) = x$ . Nous listons l'ensemble des agents concernés par ces règles et créons aléatoirement les liens correspondants. Comme précédemment, les liens redondants sont interdits. Notons que le réseau généré est sensible à l'ordre dans lequel ces règles sont appliquées. Cette sensibilité apparaît car une règle peut créer des liens par transitivité en utilisant d'autres liens créés par transitivité; l'interdiction des doubles liens influence également cette sensibilité.

#### 8.4.4 Implémentation

Pour implémenter ce prototype, nous nous sommes appuyés sur des logiciels libres, qui offrent le double avantage de faciliter notre travail et d'avoir été validés par d'autres utilisateurs. L'algorithme lui-même est développé en Java, ce qui permet d'obtenir un code lisible, portable et facile à vérifier. La population d'agents est stockée dans une base de données SQL. Cela permet d'effectuer très rapidement des recherches ensemblistes dans la population (sélection de tous les agents pour lesquels les attributs sont, ou ne sont pas, d'une valeur donnée). Cela permet également de reporter les opérations de sélection des agents sur un autre programme, donc d'optimiser l'exécution du programme sur plusieurs processeurs. Par ailleurs, le stockage de la population en base de données permet la mémorisation de populations de très grande taille (le moteur de base de données gère lui-même le placement des données en mémoire vive ou sur disque dur), alors qu'un stockage dans des objets Java aurait été limité par la mémoire vive disponible. Nous avons testé le programme avec le gestionnaire de base de données open-source MySQL. Afin de faciliter le déploiement de l'application, nous avons aussi testé un moteur plus léger (bibliothèque SQLite). Les réseaux bayésiens sont édités et testés avec SamIam, logiciel gratuit qui offre des fonctionnalités d'édition et de manipulation de réseaux bayésiens avec une interface graphique. Le format des réseaux bayésiens est compatible avec SamIam et d'autres logiciels d'édition de réseaux bayésiens. Dans cette version, nous avons utilisé le moteur d'inférence exacte Ace (cf discussion) utilisé dans SamIam. Ce moteur a l'avantage d'être optimisé par rapport aux moteurs classiques par une étape de précompilation des réseaux bayésiens [Weiss, 1997]. Les statistiques des réseaux générés sont étudiées avec le logiciel open-source R et la bibliothèque iGraph. Cette librairie permet des calculs rapides. Elle a été testée par de nombreux experts en réseaux, ce qui nous permet de la considérer comme fiable pour le point crucial qu'est l'analyse statistique des réseaux générés. Les représentations graphiques des réseaux sont générées par le logiciel GraphViz.

### 8.5 Réseaux générés

#### 8.5.1 Contenu du réseau

Le graphe généré contient différents types de liens  $\mathcal{T}$ , dirigés ou non dirigés. Les attributs des agents étant décrits et les liens créés en fonction de ces attributs, les agents hétérogènes sont *positionnés* sur ce réseau et non plus placés aléatoirement. Il ne peut exister de doubles liens dans ces réseaux ; par contre, il est probable qu'il existe des cycles. Ce réseau dépend totalement des contraintes introduites par l'utilisateur à l'aide des paramètres.

Dans l'exemple du Kenya, nous avons représenté l'existence de la structure familiale. La figure 8.6 présente un aperçu du résultat, dans lequel nous avons pour simplifier, supprimé tous les liens non-familiaux. L'agent M54 (pour Masculin, 54 ans) est marié à une femme de 42 ans, qui a quatre enfants, dont une fille F24, elle-même mariée à un homme de 32 ans, avec qui elle a un enfant de deux ans. M54 a une seconde épouse

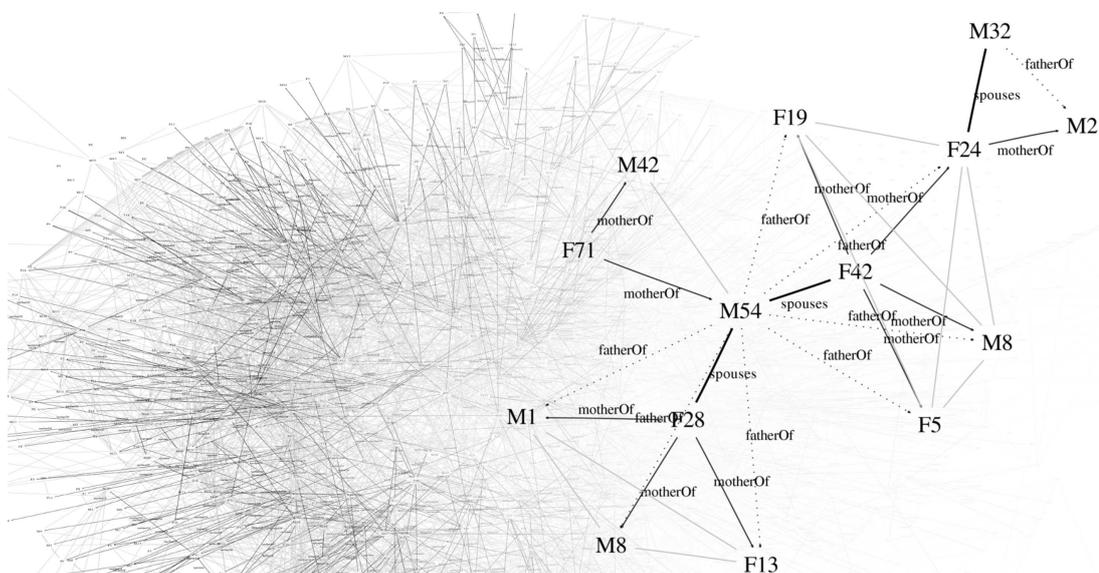


FIG. 8.6: Exemple de réseau généré dans l'exemple du Kenya, avec un zoom sur une petite partie de ce réseau.

de 28 ans, qui a eu trois enfants dont un garçon nouveau-né d'un an. La mère de M54 est toujours vivante, ainsi que son frère M42. On constate que le générateur a bien respecté les contraintes de genre sur le mariage, ainsi que les différences d'âges entre l'homme, sa première et sa seconde épouse. Les âges et le nombre des enfants sont également plausibles. Les caractéristiques de ces agents, non affichées ici, les placent ou non en scolarisation, les relient à un emploi, et ont provoqué la création d'autres liens de collègues, amis et voisins, partiellement dépendants de la zone géographique. Cette structure est répliquée à l'échelle du réseau de 50 000 agents dessiné en arrière-plan.

Contrairement à nos attentes, des phénomènes inattendus émergent dans la structure générée. Dans l'application sur les interactions au Kenya, nous avons eu la surprise<sup>5</sup> de découvrir l'existence de nombreux orphelins, généralement jeunes, malgré un paramétrage attentif de la pyramide des âges et des nombres de liens mère-enfant. En réalité, ce phénomène reflète la réalité : le taux de mortalité est tel au Kenya (essentiellement dû au VIH) que de nombreux enfants n'ont plus aucun parent vivant.

### 8.5.2 Quantification des erreurs

Comme nous l'avons précisé dans l'étape de génération, des erreurs peuvent apparaître pendant le processus de génération. Une partie de ces erreurs est due à la complexité des paramètres. Si les attributs formalisés dans  $BN^{Att}$ , ou les réseaux d'appariement sont trop complexes (grand nombre de variables, grand nombre de valeurs,

<sup>5</sup>En réalité, cette donnée est implicitement présente dans les paramètres fournis au générateur, puisque le nombre d'enfants est plus important que le nombre de liens mère-enfant qui seront créés. Ce résultat surprend néanmoins les utilisateurs lors des premières utilisations du générateur.

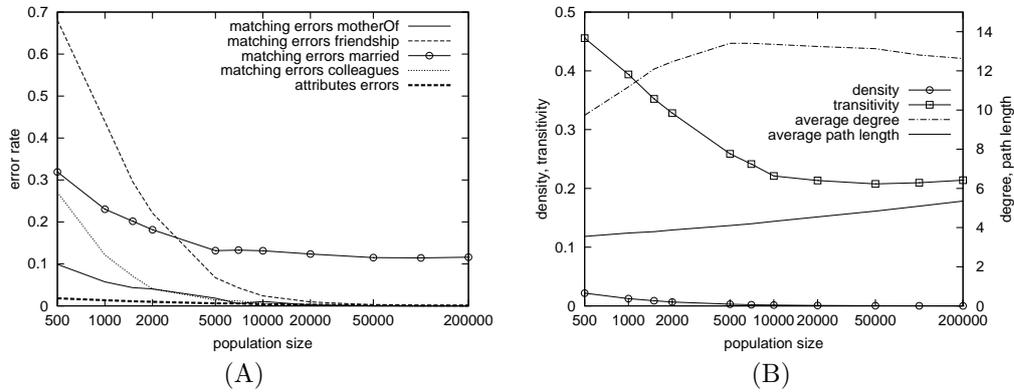


FIG. 8.7: Analyse statistique du graphe généré pour les relations et interactions au Kenya. (A) Erreurs dans le graphe. (B) Propriétés statistiques dans le graphe.

faibles probabilités), il est possible que certaines combinaisons de valeurs ne soient pas représentées dans le modèle. Il faut générer une population de *taille suffisante* pour que celle-ci soit représentative des paramètres. Par ailleurs, des incompatibilités peuvent apparaître entre les différents paramètres. Par exemple, on peut définir dans un réseau d'appariement que les hommes sont mariés en moyenne à quatre femmes et se marient à partir de 20 ans, auquel cas le processus d'appariement ne parviendra pas à trouver suffisamment de candidates au mariage pour satisfaire ces contraintes. *Il sera utile de détecter les incohérences dans les paramètres.*

Ici encore, l'utilisation de réseaux bayésiens simplifie notre travail. Nous réapprenons les probabilités de chaque réseau bayésien fourni en paramètre sur les données générées, en conservant sa structure. Par exemple, parmi les attributs décrits dans  $BN^{Att}$ , le nombre d'enfants est imposé sachant le sexe, l'âge et le statut matrimonial. Afin de vérifier la qualité de notre génération, nous observons dans la population générée le nombre d'enfants lié à chaque agent pour chaque combinaison des valeurs des attributs sexe, age et statut matrimonial. La différence entre les probabilités apprises (calculées dans la population générée) et requise (demandée dans les paramètres) représente l'erreur introduite pendant la génération. Ce calcul est d'ailleurs facilité par la représentation de la population des agents dans une base de données, qui permet de quantifier rapidement ces statistiques par des opérations ensemblistes. Les *erreurs d'attributs* quantifient la moyenne des différences entre les probabilités mesurées dans la population et les probabilités théoriques de  $BN^{att}$ . Sur le même principe, les *erreurs d'appariement* quantifient la différence entre les  $BN_t^{app}$  et les liens existants.

La figure 8.7 (A) présente les erreurs apparaissant dans les réseaux générés pour le Kenya. On constate tout d'abord que le taux d'erreurs décroît rapidement avec la taille de la population. Il existe également de fortes disparités entre les types de relation, qui dépendent directement des contraintes posées par le réseau d'appariement correspondant. L'erreur la plus importante est celle des liens amicaux ; en effet, ce paramètre demande un grand nombre de réseaux d'amitié créés dans la même zone géographique.

Si la population est trop réduite, il n'existe pas suffisamment d'agents dans la zone géographique correspondante pour satisfaire cette contrainte. Le lien "collègue" subit le même effet pour les mêmes causes. Les autres liens demandent un degré inférieur et s'avèrent moins sensibles à la taille de la population. Notons que la courbe du lien "époux" se stabilise à un taux d'erreurs important, et ne tend pas vers zéro. Il semble que les contraintes définies dans le réseau ne soient jamais satisfaites, ce qui traduit une incohérence dans les paramètres. Une analyse des réseaux d'appariement démontre en effet que le nombre de femmes supposées exister ne pouvait pas être satisfait par la pyramide des âges. Ces statistiques constituent donc un moyen de détecter les erreurs dans les paramètres fournis par l'utilisateur.

Il apparaît dans ce graphique un effet de seuil sur la taille de population, à partir duquel les contraintes posées par les paramètres peuvent être satisfaites. Ici, une population de 10 000 agents est requise pour satisfaire les demandes de l'utilisateur. Au delà de ce seuil, les résultats s'améliorent peu. Dans la pratique, la valeur de ce seuil dépend bien sûr de la complexité des contraintes introduites en paramètre ; des appariements plus simples peuvent se satisfaire de quelques centaines d'agents.

### 8.5.3 Propriétés statistiques

Nous avons présenté précédemment quelques propriétés statistiques observées dans les grands graphes (8.3.2). Les propriétés des graphes générés pour le Kenya sont présentées dans la figure 8.7 (B). On constate que ces valeurs statistiques se stabilisent quand la taille minimale de la population est atteinte. La transitivité est élevée ; plus intéressant, l'observation du graphe démontre qu'il existe des clusters d'agents quasiment totalement interconnectés, et particulièrement isolés les uns des autres. Cette observation découle des paramètres que nous avons fournis, qui créent des liens principalement dans une même zone géographique (les agents appartenant à une même zone géographique sont donc interconnectés) et entre agents partageant la même activité professionnelle (les clusters des travailleurs sur une même zone géographique sont presque totalement interconnectés). Le degré moyen correspond simplement à la somme moyenne des degrés requis dans les paramètres  $\sum_{t \in \mathcal{T}^{att}} \text{degre}^t$ . Enfin, la distance moyenne est stable par rapport à la population, exhibant un effet small-world. Cette courte distance moyenne apparaît simplement par la création aléatoire de liens indépendante de tout critère géographique, tout comme dans le modèle WS. Dans l'exemple du Kenya, la répartition des degrés n'est pas en loi de puissance ; nous aurions pu imposer cette distribution en décrivant un attachement préférentiel par les probabilités des attributs  $\text{degre}^t$ .

### 8.5.4 Des relations aux interactions

Le contenu et la structure du réseau généré dépendent bien sûr des paramètres choisis par l'utilisateur. Les paramètres adaptés au Kenya font apparaître dans le réseau généré des relations sociales durables - relations familiales, amitié - et des relations plus su-

perficielles, comme les collègues. Or, ce réseau est destiné à la simulation multi-agents, pour laquelle nous avons besoin d'un réseau d'interactions.

Nous avons constaté l'existence d'observations statistiques et qualitatives sur la fréquence d'interaction (8.3.4). Cette fréquence d'interactions est souvent connue en fonction du lien relationnel. On sait par exemple que les femmes discutent surtout avec leurs amies proches, avec leurs mères, mais peu avec leur mari. Les différents types relationnels étant décrits dans le réseau, la définition des interactions est techniquement facile. Par ailleurs, certaines observations indiquent que la fréquence d'interaction entre deux individus dépend des caractéristiques des individus ; par exemple, les amis vivant à distance se rencontrent plus rarement que les amis résidant dans la même ville. Or, nous avons recommandé de distinguer les liens conduisant à des interactions différentes pendant la simulation (8.4.2). Si l'on désire distinguer la fréquence d'interaction liée à la distance géographique, il est nécessaire de distinguer - par exemple - un type de lien "amis géographiquement proches" et son alter "amis géographiquement éloignés". Ici encore, des fréquences d'interaction différentes peuvent se décrire par le type de lien.

Si ces conseils sont respectés, l'utilisateur du modèle peut proposer une règle de probabilité  $p^{interact} : \mathcal{T} \mapsto [0, 1]$ , qui définit pour chaque type de relation représentée la probabilité d'interactions. L'utilisateur peut également définir des lois de probabilité plutôt qu'une probabilité constante. Ces paramètres imposent à l'utilisateur de collecter des données ou de poser des hypothèses sur ces probabilités d'interaction. Ce besoin n'est pas imposé par notre génération du réseau, mais par le besoin de descriptivité du modèle. La responsabilité de l'utilisation du réseau généré, tout comme le paramétrage, revient bien sûr à l'utilisateur. Nous avons seulement proposé un outil dans l'espoir de simplifier son travail.

## 8.6 Bilan

### 8.6.1 Méthodologie de modélisation

Du point de vue de l'utilisateur du modèle, la méthodologie d'utilisation du modèle est la suivante :

- étape 1 : définir les types de liens  $\mathcal{T}$ , en distinguant les liens dirigés  $\mathcal{T}^{dir}$  ou non dirigés  $\mathcal{T}^{indir}$  (dépend de la sémantique du lien et de l'utilisation prévue du modèle). Distinguer les liens qui peuvent être décrits sur la base des attributs des agents  $\mathcal{T}^{att}$  des liens créés par transitivité  $\mathcal{T}^{trans}$ .
- étape 2 : déterminer les attributs qui seront utiles pour la génération des liens, ou qui sont nécessaires dans la simulation. Formaliser les statistiques éparses, les observations qualitatives et les hypothèses éventuelles sous forme d'un réseau bayésien  $BN^{att}$
- étape 3 : formaliser les conditions de création des liens  $\mathcal{T}^{att}$  à l'aide de réseaux bayésiens d'appariement  $\forall t \in \mathcal{T}^{att}, BN_t^{att}$ .
- étape 4 : formaliser les conditions de création des liens  $\mathcal{T}^{trans}$  à l'aide de règles de transitivité.

Le générateur prend en charge la génération de la population et la création de liens. Afin de faciliter la formalisation des variables, ce même générateur aide également avant les étapes 2 et 3, générant automatiquement des “squelettes” de réseaux bayésiens qui contiennent les attributs et variables indispensables. Il permet également d’extraire facilement une petite partie de la population et d’en exporter une visualisation graphique à des fins de vérification. Enfin, le générateur permet l’exportation sous forme XML des caractéristiques des agents et des liens entre agents pour utilisation dans une simulation orientée agents.

Afin d’éviter les erreurs, nous proposons à l’utilisateur d’effectuer les étapes suivantes :

- revenir après génération aux réseaux bayésiens, et si possible faire intervenir un acteur extérieur pour “jouer” avec les réseaux bayésiens, en lui expliquant les contraintes supposées être représentées dans le réseau. Nous avons constaté que cette étape permet de *détecter des incohérences dans les indépendances ou interdépendances entre variables*. Ainsi, tout observateur sensible aux données sociales sera surpris du manque de lien entre l’attribut “genre” et l’attribut “age”, puisque ces deux variables sont censées reproduire la pyramide des âges, qui est généralement asymétrique. En l’occurrence, il s’avère que le Kenya est un cas rare de pyramide symétrique. Une interface graphique telle que celle de SamIam permet également d’introduire de l’évidence dans chaque variable d’un simple clic ; cette utilisation s’avère ludique, et permet de détecter rapidement des incohérences dans la définition des probabilités conditionnelles.
- extraire de la population générée un petit réseau, et vérifier qu’il n’existe pas d’incohérence dans ce réseau. Une telle analyse fait rapidement apparaître des phénomènes non contraints dans le modèle mais culturellement impossibles, telles que le mariage d’un homme avec la fille de sa soeur. Une telle observation permet de reparamétriser le modèle pour éviter ces erreurs. L’étude graphique du modèle devient donc une façon d’extraire des connaissances de l’observateur sur des éléments culturels qui lui semblent tellement évidents qu’il ne pense pas à les introduire dans les paramètres.
- étudier les graphiques d’erreurs d’appariement, et évaluer par les taux d’erreurs si la taille de la population n’est pas insuffisante.

### 8.6.2 Résumé et apports

Ce générateur constitue un travail de recherche en cours de réalisation, dans lequel de nombreux points théoriques et pratiques requièrent une réflexion approfondie. C’est pourquoi nous n’avons pas détaillé précisément l’ensemble de l’algorithme de génération ; à ce stade, le principe conceptuel nous semble plus important que sa mise en oeuvre. Nous introduisons dans ce travail plusieurs éléments novateurs. Tout d’abord, nous constatons l’existence de données éparpillées, parfois qualitatives, qui constituent souvent les seules connaissances disponibles sur la structure des interactions. Afin de rendre les données de terrain exploitables, nous proposons un formalisme

basé sur les réseaux bayésiens. Nous couplons plusieurs mécanismes génératifs dont l'existence a été détectée sur le terrain ou qui se sont avérés aptes à générer des réseaux descriptifs. La génération se base sur une utilisation originale des réseaux bayésiens en mode génératif. Nous avons testé par simulation la capacité de ce générateur à créer des réseaux compatibles avec les paramètres introduits.

Nous avons insisté sur le besoin de conserver à l'esprit la signification d'un lien dans le réseau. Cela se traduit par la distinction, dans le réseau généré, de différents types de liens qui peuvent être exploités pendant la simulation pour définir des probabilités d'interaction plus réalistes (plus rares entre individus lointains, discussions personnelles sur les liens amicaux seulement, etc.). L'utilisation de ce modèle permet à un modélisateur d'exploiter toutes les informations à sa disposition pour contraindre des réseaux. Nous avons démontré qu'il peut être utilisé pour représenter les structures familiales à grande échelle, ce qui n'a pas encore été réalisé à notre connaissance. Ce générateur résout également la problématique du positionnement d'agents hétérogènes sur le réseau. Il est maintenant nécessaire de tester la dynamique de différents processus sociaux sur les réseaux générés.

Plusieurs points méritent une réflexion approfondie. L'utilisation des réseaux bayésiens semble à première vue assez peu orthodoxe. Des discussions avec des spécialistes des modèles graphiques nous ont confortés dans cette utilisation [Wuillemin, 2008]. Toutefois, l'utilisation d'un autre moteur d'inférence (tirages de Gibbs) pourrait permettre une génération plus rapide des réseaux. Par ailleurs, la signification des probabilités d'appariement reste quelque peu confuse, une probabilité d'appariement de 1 se traduisant en pratique par une possibilité d'appariement. Ce travail conceptuel nécessite un travail pluridisciplinaire avec les spécialistes en modélisation de réseaux sociaux; des premiers contacts ont déjà été pris en ce sens ([Pattison, 2008],[Chattoe-Brown, 2008]). Une analyse formelle rigoureuse du générateur devient également indispensable. Elle devrait permettre de détecter automatiquement les incohérences entre paramètres et la taille de population minimale requise pour la descriptivité. Une analyse des réseaux générés est également prévue (centralité, caractéristiques des groupes sociaux, etc.).

La confrontation avec des cas réels s'avère indispensable. Nous avons présenté un exemple jouet, qui quoiqu'assez complexe, n'est pas comparé à une réalité de terrain. Plusieurs paramètres nécessitent un paramétrage plus précis, en particulier sur les conditions d'appariement. L'application à un cas plus complexe révélera sans doute des limites dans le formalisme actuel. Par exemple, les affiliations sont actuellement décrites en tant qu'attributs, ce qui complique le paramétrage si le nombre d'affiliations est important. On peut, avec ce même modèle, décrire les affiliations comme des agents, puis créer les liens par transitivité entre les agents affiliés. Par ailleurs, dans notre application actuelle, une transitivité sur deux liens s'est avérée suffisante. Il pourrait devenir nécessaire de décrire une transitivité sur davantage de liens (pour décrire des liens de cousinage, par exemple). Ces limites de formalisation semblent assez faciles à résoudre,

la base du formalisme sous forme de réseaux bayésiens demeurant inchangée. Il serait rapidement utile de publier gratuitement le logiciel aux communautés de recherche, ce qui permettrait de nombreux tests et applications indépendants.



# Chapitre 9

## Discussion

### 9.1 Bilan

#### 9.1.1 Modèle CoBAN

Pendant tout le processus de modélisation, nous avons veillé à respecter les conseils de modélisation (chapitre 2.1). Nous avons cherché à décrire des *mécanismes plausibles*, en les basant sur des observations ou des théories existantes. La *simplicité* du modèle lui confère une meilleure lisibilité et manipulabilité. Il peut aussi être *paramétré et comparé au terrain*, ce qui impose qu’il inclue des variables correspondant à une réalité mesurable. Afin d’être utile, il doit également intégrer les *variables décisionnelles de l’institution*. Ces principes ont présidé au développement de chacune des composantes de ce modèle.

#### Représentation des croyances

Le modèle CoBAN propose une représentation des croyances sous forme de *réseaux associatifs*. Cette représentation est inspirée d’une méthodologie marketing qualitative, mais aussi de différents modèles développés en Intelligence Artificielle ou en psychologie cognitive (cf. 5.1). Les réseaux associatifs peuvent décrire des croyances ou des messages réels. Un protocole de collecte permet de rassembler des croyances réelles dans la population. S’il le désire, l’utilisateur du modèle peut également utiliser des croyances ou messages stylisés. La descriptivité de cette représentation des croyances permet de prendre en compte, dans la simulation, le contenu du message institutionnel (variable décisionnelle), ainsi que de paramétrer et valider le modèle sur des données de terrain.

#### Manipulation des croyances

Afin de définir la révision des croyances, chacune est associée à un **degré de crédibilité**, ou support (voir 5.2.2). Cette notion est inspirée des travaux sur les fonctions de croyances. Pour préserver la simplicité du modèle, ces degrés de crédibilité sont qualitatifs et non quantitatifs. Ils peuvent être collectés depuis le terrain, et demeurent lisibles pour l’utilisateur.

*La révision de croyances contradictoires est définie de façon probabiliste* (cf 5.4). Contrairement aux modèles normatifs classiques, nous permettons ainsi la révision des croyances à long terme, qui peut parfois conduire à la révision d'une croyance forte suite à une information peu crédible. Ce principe recouvre en réalité plusieurs phénomènes sur la persuasion : révision d'informations due à la répétition, à la multiplicité des sources ou à l'ancienneté des croyances. La révision probabiliste des croyances permet de distinguer les capacités persuasives des différentes sources d'information et de décrire le lien entre crédibilité des croyances et recherche active d'information [FS I2].

### 9.1.2 Phénomènes collectifs descriptibles

L'une des questions posées par cette recherche était l'utilité d'une description plus réaliste des croyances. Nous avons décrit de façon plausible les mécanismes au niveau individuel (comportement et interactions). Afin d'évaluer cette utilité, nous nous sommes intéressés aux phénomènes descriptibles au niveau collectif.

#### Médias de masse et bouche à oreille

*L'influence limitée des médias de masse* apparaît naturellement dans le modèle, grâce à la prise en compte de la crédibilité des croyances. Ainsi, conformément au [FS M5], la communication institutionnelle permet seulement de provoquer la recherche d'information ; le bouche à oreille a par contre une capacité persuasive importante. Comme le comportement communicationnel pour un objet social dépend du contenu des croyances, on peut décrire l'échec d'une *campagne de mix-marketing* qui ne parvient pas à créer la curiosité chez les adoptants potentiels. De même, un phénomène de bouche à oreille n'apparaît que s'il correspond à des intérêts des adoptants, conformément à la description du marketing viral [Wilson, 2000a]. Nous avons ainsi décrit un exemple de marketing viral (7.4.1). Les interactions entre agents sont conformes aux observations de terrain ; elles permettent ainsi de faire connaître un produit, de persuader de ses avantages, mais aussi d'aider à comprendre l'innovation (7.2.2) [FS I8].

#### Echec de la diffusion d'innovations

Conformément à nos attentes, une courbe en "S" apparaît pendant la simulation [FS M3]. La modification des divers paramètres permet de changer la forme de cette courbe (décollage plus ou moins rapide, ralentissement lent, etc). Toutefois, si la courbe en "S" est caractéristique du succès de la diffusion, la plupart des diffusions d'innovations échouent. Chacun des facteurs explicatifs proposés par Rogers est descriptible dans le modèle, ce qui nous permet d'explorer les causes possibles d'échec de diffusion<sup>1</sup>.

- *échec par manque d'intérêt pour l'innovation* : le message peut être mal compris par le récepteur, qui par conséquent ne cherche pas d'information. Le message peut aussi être compréhensible, mais ne pas correspondre aux centres d'intérêt de

<sup>1</sup>Par "échec de diffusion", nous entendons que la masse critique n'a pas été atteinte pour qu'il existe un effet d'auto-entraînement dans la population. En pratique, il est probable que la courbe d'adoption instantanée révélera des petites diffusions locales, qui demeurent limitées à une petite portion de la population.

- la population. Dans les deux cas, les individus ne recherchent pas d'information, ne sont jamais convaincus des bénéfices de l'innovation, provoquant l'échec de la diffusion.
- *échec par manque de source crédible* : les agents n'adoptent que s'ils obtiennent une information suffisamment crédible. Cette information peut être absente pour plusieurs raisons. Dans CoBAN, cet échec peut être dû à un manque de crédibilité des sources d'information, ou à un nombre d'innovateurs insuffisant (qui adoptent sans prêter attention à la crédibilité du message).
  - *rejet par incompatibilité des croyances* : la représentation de croyances difficiles à réviser peut avoir deux conséquences. Si l'individu reçoit suffisamment d'information pour la réviser, il adopte tardivement. Par contre, s'il ne reçoit pas assez d'information, il n'adoptera pas [FS M11].
  - *rejet par incompréhension* : la représentation des croyances sous forme de réseaux associatifs permet de décrire l'incompréhension, qui conduit à l'échec de la diffusion, sauf s'il existe une proportion d'experts dans la population, aptes à comprendre le message. Dans ce cas, le résultat est fonction de la proportion d'experts, de curieux et de promoteurs dans la population (voir 7.2.2) [FS M10].
  - *incompatibilité avec les motivations* : si les attributs de l'innovation ne sont pas liés à des motivations des adoptants potentiels, ceux-ci ne perçoivent simplement pas d'intérêt dans cette innovation (7.3.1) [FS M11].

### Autres phénomènes

L'interdépendance de deux innovations est générée par des croyances rattachées à chacune de ces innovations (voir 7.4.2). Conformément aux observations de terrain, les simulations révèlent non seulement une diffusion plus rapide de la seconde génération d'innovation, mais aussi une facilitation de la première innovation [FS M12]. Dans notre modèle apparaît bien une masse critique en deçà de laquelle la diffusion ne peut être assumée uniquement par la communication interpersonnelle (cf 7.2.3) [FS M4].

### Représentativité

La représentation plus détaillée des croyances par des réseaux associatifs, ainsi que la description de la communication sur des objets sociaux, permettent de décrire des phénomènes collectifs identifiés dans la littérature. A notre connaissance, il n'existe pas de modèle décrivant ces phénomènes. Il faut toutefois évaluer ces résultats à leur juste valeur : nous ne prétendons pas décrire quantitativement, ni précisément ces phénomènes ; une validation du modèle serait nécessaire pour prétendre obtenir ce résultat. Ce constat nous permet toutefois de répondre à la première question posée dans cette thèse : oui, l'utilisation de croyances plus détaillées permet de décrire davantage de phénomènes observées en diffusion d'innovations.

## 9.2 Apports pour la diffusion d'innovations

Ayant répondu à cette question, nous pouvions espérer *générer de la connaissance pour le "domaine cible"*, en l'occurrence la diffusion d'innovations et le marketing. Nous retenons ici le travail sur la recherche d'information opposée à la vision épidémique des croyances, l'analyse du potentiel du marketing viral, ainsi que la réflexion sur la segmentation de Rogers.

### 9.2.1 Impact de la recherche d'information

Nous avons décrit dans CoBAN la recherche active d'information, en plus de l'émission proactive traditionnellement incluse dans l'approche épidémique. La recherche d'information s'avère influencer fortement la dynamique d'information. Elle joue un rôle différent de l'émission proactive, puisqu'elle permet à la fois de transmettre l'information possédée et de recevoir de l'information d'individus qui ne la communiquent pas spontanément. L'impact important sur la dynamique d'information indique qu'*on ne peut pas négliger la recherche active d'information en étudiant le bouche à oreille*. Les modèles basés sur le paradigme épidémique peuvent sans doute être considérés comme des abstractions plausibles pour les rumeurs, ou la transmission sur l'*existence* d'une innovation, mais ne peuvent prétendre abstraire le bouche à oreille.

### 9.2.2 Potentiel du marketing viral

"Laissez les consommateurs assurer la promotion de vos produits", telle est la promesse du marketing viral. Or, en étudiant notre modèle de communication dans un espace de paramètres plausible, cette promesse semble irréaliste (cf 7.2.4). Elle est pourtant soutenue par des exemples réels, comme le lancement du service de messagerie Hotmail. Nous avons mis en évidence les différences fondamentales qui existent entre ces exemples et la réalité du bouche à oreille quotidien : ces exemples ne demandent pas de motivation de l'utilisateur pour transmettre le message, et utilisent une structure d'interactions plus dense que les interactions interpersonnelles en face à face. D'autres études par simulation pourraient éclaircir les conditions permettant la diffusion, étant donné le nombre de promoteurs et la structure du réseau d'interactions. Le marketing viral demeure un domaine intéressant et porteur, qui pourra favoriser la communication interpersonnelle sur les produits ; ses apports potentiels doivent toutefois être jugés à leur juste valeur.

Il semble que cette réflexion n'ait pas encore été réalisée. Duncan J. Watts avait certes détecté des limites dans la faisabilité du marketing viral [Watts *et al.*, 2007] ; mais son analyse était basée sur un modèle épidémique classique, ce qui l'a conduit à conclure sobrement que le taux de reproduction d'une épidémie informationnelle est faible. Notre constat, pourtant simple, a été provoqué par une meilleure définition des concepts utilisés dans la simulation. Nous ne travaillons pas sur un "réseau social" indéfini, mais sur un réseau d'interactions qui décrit une réalité de terrain (rencontre face à face ou cour-

riel). On ne décrit pas des individus qui peuvent contaminer et être contaminés, mais des consommateurs qui relaient, ou non, une information. Comme l'écrivait Geroski, les modèles peuvent devenir des prisons, qui nous empêchent de réfléchir librement ; c'est vraisemblablement le cas du modèle épidémique [Geroski, 2000].

### 9.2.3 Réflexion sur la segmentation de Rogers

Rogers a proposé une segmentation des adoptants sous forme d'innovateurs, adoptants précoces, majorités précoce et tardive, et retardataires. Cette segmentation est largement reprise dans les ouvrages de référence en marketing [Lendrevie *et al.*, 2006] ou comportement du consommateur [Engel *et al.*, 1995b]. Ces segments sont censés adopter successivement. Rogers propose des facteurs explicatifs à cette différence dans la période d'adoption, comme les croyances préalables, l'attente d'informations interpersonnelles, etc. Ces facteurs sont décrits dans CoBAN, et devraient donc permettre de reproduire l'adoption séquentielle de ces segments. Or, si l'on peut effectivement distinguer l'adoption de deux, voire trois segments, il est impossible de différencier nettement cinq catégories d'adoptants. Cette observation du modèle nous a conduits à réfléchir à la vraisemblance même de cette catégorisation. En raisonnant à l'échelle de la population, une telle adoption séquentielle semble plausible. Par contre, quand on s'intéresse au processus interpersonnel lui-même, il apparaît que les segments sont fortement intriqués. Il est possible que cette segmentation soit en réalité due à d'autres paramètres non décrits par Rogers. Quoiqu'il en soit, cette segmentation en l'état est incomplète, voire fausse.

## 9.3 Apports pour la simulation orientée agents

### 9.3.1 Générateur de réseaux d'interaction

Le générateur de grands réseaux d'interactions repose sur plusieurs constats. D'une part, *le manque de descriptivité des générateurs utilisés habituellement limite le potentiel de la simulation orientée agents* : un modèle ne peut être dit descriptif, valable ou validé s'il est sensible à un paramètre - la structure d'interactions - inconnu. Le calcul formel de seuils épidémiques sur un réseau abstrait n'a aucun sens si ce réseau est trop stylisé. D'autre part, contrairement à ce que l'on perçoit habituellement, *il existe des données permettant de contraindre le réseau d'interactions*. Ces données sont éparpillées, souvent qualitatives, parfois incomplètes ; qu'importe, mieux vaut contraindre le réseau d'interaction par des observations approximatives que de le contraindre aussi faiblement que cela est fait actuellement. Notre apport principal réside probablement dans ce constat.

Pour utiliser ces observations, il est nécessaire - comme souvent en simulation sociale - de parvenir à utiliser ces données qualitatives, et imprécises, dans un univers computationnel rigoureux et formel. Nous avons proposé de décrire ces observations en utilisant des réseaux Bayésiens, transformant des données interdépendantes en probabilités. Nous avons ensuite sélectionné des processus générateurs de graphe, basés sur des

mécanismes observés pour des réseaux réels - dépendance attributs-lien, transitivité, affiliations - qui seront utilisés pour créer le réseau. Nous avons enfin défini un algorithme utilisant ces informations pour générer un graphe conforme aux paramètres. A l'heure actuelle, *ce générateur constitue la seule solution connue qui permette à un modélisateur d'utiliser toutes ses connaissances sur une population (même qualitatives) pour décrire de grandes structures d'interactions*. Il apporte d'ailleurs quelques éléments annexes intéressants. Il *décrit les attributs des agents*, ce qui permet de les utiliser pendant la simulation. Il distingue les différentes natures de liens interpersonnels, autorisant l'utilisateur du réseau à différencier la nature des interactions en fonction du lien social. Enfin, il répond à la question du placement des agents hétérogènes sur la structure d'interactions, en créant les liens en fonction de leurs caractéristiques.

### 9.3.2 Représentation associative des croyances et communication

Nous avons proposé une représentation associative des croyances, ainsi qu'un mécanisme de communication basé sur les objets sociaux. Les principes de manipulation des croyances (extraction, révision), dans leur détail, seront peut-être remis en cause. Il nous semble plus important de souligner les *apports de la représentation associative des croyances*. Elle offrent un *gain en descriptivité* : description de la compréhension, des liens entre objets, de différents degrés de croyances. Elles constituent également une *représentation lisible et manipulable* des croyances. Elles peuvent être collectées depuis le terrain, ouvrant la possibilité de paramétrer les croyances individuelles, mais aussi de valider un modèle sur les croyances collectives. En ce sens, *la représentation associative des croyances, ainsi que le modèle de communication associé, pourraient constituer une approche réutilisable dans d'autres modèles de dynamiques sociales basés sur l'échange de croyances..*

## 9.4 Perspectives de recherche

### 9.4.1 Raffiner le modèle

*“Tous les modèles sont faux”,* écrit George Box, *“mais certains sont utiles”* [Box et Draper, 1987, p. 424]. Notre modèle, comme tout autre, est faux. Nous avons simplifié des phénomènes compliqués, posé des hypothèses pour combler des vides théoriques. Voici, parmi d'autres, quelques points conceptuels qui nécessitent réflexion :

L'**extraction des croyances** est systématique pour tous les liens. Ce choix a été fait au profit de la simplicité et de la possibilité de paramétrer le modèle. Il conduit, parfois, à des résultats peu plausibles ; par exemple, un agent qui parle d'un événement parle automatiquement du produit associé. Si ce produit est associé à une marque, une marque à un autre produit, toutes ces croyances seront extraites et communiquées. Ce mécanisme extrait également les croyances associées à la connaissance de l'agent sur lui-même (par exemple, *“mimer le comportement des autres facilitera mon intégration sociale”*), ce qui est assez improbable dans la réalité. Une alternative consiste à *associer*

à chaque lien un niveau de saillance, qui décrira la probabilité que l'association existe entre deux concepts. Cela permettrait d'ailleurs de décrire le travail publicitaire conçu pour créer des liens besoin-produit ou besoin-marque. Malheureusement, il est difficile d'observer quelles croyances sont émises par rapport aux croyances possédées, mais aussi de paramétrer dans le modèle la saillance d'une croyance pour un individu. On pourrait également penser que *les individus n'émettent que les croyances qui conduisent à une évaluation* - par exemple, une femme Luo parlera probablement peu de la couleur de la pilule (secondaire et inutile du point de vue des motivations), mais beaucoup des risques liés à cette innovation. Afin de déterminer la solution la plus descriptive, il faudrait observer l'extraction des croyances, selon un protocole restant à définir.

**La représentation associative rend réutilisable toute croyance pour tous les objets sociaux.** Par exemple, un lien (cher, qualité) représente une heuristique générale de l'individu, qui estime qu'un produit cher est généralement de bonne qualité. Malheureusement, ce même principe existe quand ce n'est pas pertinent. Ainsi, le lien (50 euros, cher), mesuré pour un forfait d'accès à Internet, perd son sens quand on parle d'un écran plat. Dans une utilisation de terrain, il sera probablement nécessaire de réunir des croyances en ensembles activables ou non pour un objet social.

Dans le réseau d'interactions, la probabilité d'interaction est censée décrire la probabilité de rencontre de deux individus en général. Néanmoins, un même type de relation sociale ne conduit pas à la même probabilité d'interaction pour un objet social; **la probabilité d'interaction peut dépendre de l'objet social.** Ainsi, une innovation tabou ne sera pas communiquée aux collègues, alors qu'une information sur un concert pourra l'être. Il faudrait donc tenir compte de l'objet social et de la relation sociale, voire des caractéristiques de l'interlocuteur, lors de l'émission de l'information.

Une réflexion est nécessaire sur d'autres points, comme la **suppression des contradictions.** A l'heure actuelle, nous supprimons les liens en contradiction lors de la révision des croyances. Peut-être serait-il plus judicieux d'autoriser la cohabitation de liens contradictoires, et retenir le plus crédible lors de l'extraction. Peut-être devrions-nous mémoriser le nombre de sources de chaque crédibilité pour chaque lien. La simplification réalisée dans cette version de CoBAN était suffisante pour nos besoins, mais demeure discutable.

Le *générateur de réseaux d'interactions* n'a pas été utilisé dans les expérimentations présentées dans le chapitre 7, non seulement par manque de temps, mais aussi par manque de cas d'application. En effet, contrairement aux générateurs couramment utilisés, son utilisation pour générer des réseaux purement abstraits a peu de sens. Le test de ce générateur ouvre la voie à des expérimentations nouvelles sur la sensibilité des modèles au placement d'agents hétérogènes sur un réseau d'interaction. De nombreux tests seront nécessaires pour déterminer la sensibilité des caractéristiques des réseaux générés aux paramètres introduits (quelle précision est nécessaire dans ces pa-

ramètres?), ainsi que la sensibilité du modèle de communication aux caractéristiques de ces réseaux.

Bien d'autres choix pourraient révéler leurs limites lors de la confrontation du modèle avec la réalité. Les points conceptuels qui méritent révision seront découverts lors de la mise en oeuvre du modèle.

#### 9.4.2 Collecter les données nécessaires

Notre modèle étant conçu pour être rapporté au terrain, tous nos paramètres peuvent être rapportés à une valeur mesurable. Certains paramètres, ou choix, nécessitent un travail qui sera réutilisable pour toute simulation ultérieure, en dégageant des ordres de grandeurs pour les paramètres :

- **condition de fin de recherche d'information** : nous l'avons décrite sur la base d'une crédibilité et d'un contenu requis. Ce choix est basé sur des observations en diffusion d'innovation ou en comportement du consommateur . Nous avons également déterminé une durée maximale de recherche d'information à partir de laquelle l'individu oublie son intérêt pour l'innovation. Une validation de ce sous-modèle est nécessaire pour vérifier si ces suppositions sont valides.
- **condition de fin d'émission d'information** : faute d'observations de terrain, nous avons déterminé la fin d'émission proactive d'information en nombre de pas de temps. Peut-être ne discute-t-on pas d'un même sujet avec de très nombreuses personnes. Même si ce choix est confirmé par le terrain, il est nécessaire de déterminer cette durée d'émission pendant des cas réels, en la corrélant éventuellement à des caractéristiques des sujets.
- la **probabilité d'interaction** pour chaque type de lien doit être mesurée avec précision, puisqu'elle influence fortement le seuil épidémique pour l'information. Des méthodologies existent déjà pour réaliser cette collecte d'informations, en faisant tenir un journal des discussions par les sujets [Carl, 2006b].
- la **probabilité de révision d'une croyance sachant l'ancienne et la nouvelle crédibilité** doit également faire l'objet d'une étude attentive, puisqu'elle décrit la persuasion dans notre modèle. La probabilité de révision liée nombre de réceptions d'information est actuellement une loi binomiale, qui ne reflète pas nécessairement la réalité. Sur la base d'un travail de terrain représentatif, on pourrait dégager une loi plus réaliste pour la révision des croyances. A minima, il faudrait paramétrer cette courbe sur des grandeurs mesurées.
- les motivations sont difficiles à évaluer dans une population [Deffuant, 2001]. Dans certains cas, la segmentation développée par l'entreprise donne des indications sur ces motivations. Nous discutons plus loin cette problématique délicate.

A l'issue de ce travail préliminaire, on peut utiliser le modèle comme une population permettant de tester des dynamiques au plan qualitatif (et non de façon descriptive). L'intérêt principal de cet usage serait de *pousser l'utilisateur à se poser les bonnes questions*, c'est-à-dire les questions liées aux facteurs explicatifs de succès ou d'échec de diffusion. Ces questions détaillées ne peuvent pas être posées extensivement dans

un questionnaire, car elles sollicitent un temps important et une analyse poussée. Par contre, la manipulation du modèle comporte un aspect ludique, permettant d'explorer différents scénarios conduisant à des succès plus ou moins importants. Une telle utilisation sensibiliserait intuitivement l'utilisateur aux effets de seuil, de ciblage, de compréhension ; en quelque sorte, il s'agirait de transmettre ce que le processus de modélisation nous a nous-mêmes enseigné.

### 9.4.3 Se confronter au terrain : valider

La validation de ce modèle n'est envisageable qu'après étude des points énoncés précédemment. Nous ne proposons donc ici qu'un canevas général de ce que pourrait être la validation. Notons que certains de ces paramètres requièrent un travail approfondi ; ainsi, le seul paramétrage du générateur de réseaux nécessite un travail statistique détaillé.

Notre modèle visant la généralité, il devrait être validé sur différentes instances de simulation. Pour valider ce modèle, nous devrions bien sûr introduire les paramètres suivants :

- Les *croyances préalables de la population* sont collectées par entretien, ou déterminées d'après l'expertise de professionnels.
- Les comportements de communication sont mesurables en observant un comportement général sur l'adoption de différentes innovations, éventuellement disponible dans une segmentation existante, ou collecté en déclaratif.
- La crédibilité perçue des sources est en général facilement quantifiable par entretiens ou mesures de persuasion.
- Si la diffusion étudiée se déroule dans une grande population, *la structure d'interactions* peut être créée par le générateur que nous avons proposé, en utilisant la méthodologie de paramétrage proposée (chapitre 8).
- Les informations exogènes introduites dans la population sont des variables décisionnelles, donc connues.

Les motivations des individus constituent un élément délicat de ce modèle. Il semble difficile de les déterminer à l'échelle de la population (constat identifié par Deffuant [Deffuant, 2001]). La solution potentielle réside dans l'énumération de grandes motivations humaines - sécurité, besoin d'intégration sociale, estime personnelle, hédonisme - telles que celles proposées par Maslow ou Rokeach. D'après la *Means-ends Chains Theory*, on devrait pouvoir rattacher toute innovation à l'un de ces besoins. Notons que ce principe a été proposé par Jager dans son approche *consumat* [Jager, 2000]. L'inconvénient de cette solution est la discrimination insuffisante de ces valeurs : tous les individus peuvent être dits motivés par ces valeurs, puisqu'elles sont précisément inhérentes à la nature humaine. Peut-être pourrait-on pondérer ces motivations par segment : on sait par exemple qu'un jeune célibataire est plus orienté vers la socialisation et l'hédonisme, tandis que les jeunes parents cherchent à économiser et à assurer la sécurité de leurs enfants. Une telle étude a déjà été réalisée au sein de France Télécom. Même dans ce cas, nous ne parvenons à décomposer la population française

qu'en une dizaine de segments, ce qui semble insuffisant pour décrire l'adoption de façon plausible. Ici pourrait intervenir l'usage du protocole d'entretiens, qui permet de découvrir des *valeurs intermédiaires*, qui délimitent des groupes d'individus plus petits. L'enjeu d'une telle étude serait de déterminer des valeurs intermédiaires ni trop peu nombreuses (non discriminantes) ni trop détaillées (incomplètes, spécifiques à un produit particulier).

Contrairement aux modèles comportant une représentation des croyances moins réaliste, nous pouvons valider le modèle sur les croyances. Cette possibilité constitue sans doute une solution au problème du sur-paramétrage du modèle (étant donnés les paramètres, toute courbe d'adoption peut être facilement reproduite; la validation sur les croyances constitue une contrainte supplémentaire limitant l'espace des paramètres possibles pour reproduire une courbe). Les données utilisables pour comparaison modèle-réalité sont :

- les représentations sociales des individus, en terme de contenu et de proportion des agents possédant chaque représentation. Les représentations peuvent être collectées dans la société réelle par le protocole que nous avons proposé.
- l'état d'adoption : *unaware*, recherche d'information, adoption ou rejet
- fréquence et contenu des interactions. Le contenu des interactions a par exemple été étudié sur le terrain au Kenya. Dans des pays post-industrialisés, il est envisageable d'étudier ces interactions sur Internet .

#### 9.4.4 Pour aller plus loin...

Quel que soit le travail de terrain, sur ce modèle ou un autre, la simulation restera essentiellement qualitative si la structure d'interactions n'est pas décrite de façon réaliste. En premier lieu, nous prévoyons donc de tester l'applicabilité du générateur de structures d'interactions, de le rendre public, et de tester la dynamique d'information sur les réseaux générés. Les réactions positives de la communauté de recherche en simulation sociale, suscitées par le générateur de grands réseaux d'interactions [Thiriot et Kant, 2008a], révèlent un besoin latent d'une solution de ce type. Comme nous l'avons discuté (9.3.2), il est également possible que le principe de représentation associative des croyances soit réutilisé pour le gain de pouvoir descriptif qu'elle procure. Le modèle CoBAN décrit croyances et communication de façon générique, sur tout type d'objets sociaux; après un travail indispensable sur le paramétrage du modèle (cf 9.4.2), il pourrait être utilisé comme brique de communication d'un autre modèle de dynamique sociale.

Dès qu'il est suffisamment détaillé pour devenir plus descriptif, un modèle orienté agents devient difficile à communiquer auprès de la communauté de recherche. Nous avons publié un aperçu synthétique du modèle [Thiriot et Kant, 2008c, Thiriot et Kant, 2007a, Thiriot et Kant, 2007b], ainsi qu'une description plus précise de la partie communication [Thiriot et Kant, 2008b]. Toutefois, la description d'une partie d'un tel modèle perd de son sens : le protocole de communication n'a de sens que si l'on décrit les croyances, les croyances ne sont utiles

que si l'on décrit un processus comportemental, etc. Tout comme cela a été réalisé en dynamique d'opinions, nous prévoyons donc de publier des versions très stylisées de simulation, correspondant à des apports précis de nos recherches, par exemple la dynamique d'information avec deux niveaux de croyances et recherche d'information.

Pour rapprocher le modèle du terrain, nous avons vu qu'un travail de collecte et paramétrage doit être réalisé. Un tel travail ne peut s'envisager sérieusement qu'en équipe pluridisciplinaire. Contrairement à d'autres projets, nous avons déjà fait quelques pas dans la direction du terrain ; nous savons notamment quelles informations collecter pour valider ou invalider ce modèle, et disposons d'une méthodologie de collecte appropriée.

L'applicabilité de ce modèle peut sembler discutable. En réalité, le nombre de paramètres du modèle de communication a été maintenu à son strict minimum. Tous les paramètres sont mesurables. D'ailleurs, la plupart sont directement connus, comme le contenu du message envoyé par les médias de masse, l'exposition aux médias de masse, etc. Les paramètres les plus délicats nous semblent être l'analyse des motivations, ainsi que la génération des réseaux d'interactions. Toutefois, il nous semble que cette complexité ne nous est pas imputable. Le processus réel *est* complexe ; nous ne pouvons le réduire davantage sans perdre sa substance. Peut-être devrions-nous réfléchir à la simulation sociale comme à la météorologie. Pour prédire le temps à quatre jours, c'est-à-dire comprendre des processus mesurables et reproductibles, un dispositif de mesure gigantesque a été déployé : stations de mesures réparties sur toute la surface du globe, satellites et ballons-sondes. Nous cherchons à décrire des systèmes sociaux, c'est-à-dire des interactions complexes entre des êtres humains dont nous sommes incapables de prévoir les réactions précises ; tôt ou tard, il sera cohérent de procéder à une collecte d'information à la hauteur du problème.

Pour conclure, rappelons cette phrase d'Edward N. Lorenz : *"To the often-heard question, 'Why can't we make better weather forecasts?' I have been tempted to reply, 'Well, why should we be able to make any forecasts at all?'"* [Lorenz, 1996].



# Bibliographie

- [Abbott, 1955] Abbott, L. (1955). *Quality and competition*. Greenwood Press. 95
- [Abdulla *et al.*, 2002] Abdulla, R. A., Garrison, B., Salwen, M., Driscoll, P. et Casey, D. (2002). The credibility of newspapers, television news, and online news. *In Association for Education in Journalism and Mass Communication Annual Convention, Miami Beach*. 50
- [Abrahamson et Rosenkopf, 1993] Abrahamson, E. et Rosenkopf, L. (1993). Institutional and competitive bandwagons : Using mathematical modeling as a tool to explore innovation diffusion. *Academy of Management Review*, 18(3):487–517. 68
- [Abrahamson et Rosenkopf, 1997] Abrahamson, E. et Rosenkopf, L. (1997). Social network effects on the extent of innovation diffusion : A computer simulation. *Organization Science*, 8(3):289–309. 68, 69
- [Adamic et Adar, 2005] Adamic, L. et Adar, E. (2005). How to search a social network. *Social Networks*, 27(3):187–203. 200
- [Adoni et Mane, 1984] Adoni, H. et Mane, S. (1984). Media and the social construction of reality : Toward an integration of theory and research. *Communication Research*, 11:323–340. 60
- [Aiello *et al.*, 2000] Aiello, W., Chung, F. et Lu, L. (2000). A random graph model for massive graphs. *In Proceedings of the thirty-second annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 171–180. ACM Press New York, NY, USA. 201
- [Ajzen, 1988] Ajzen, I. (1988). *Attitudes, personality, and behavior*. Chicago : Dorsey Press. 48
- [Ajzen, 1991] Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational behavior and Human Decision Processes*, 50:179–211. 48
- [Ajzen et Fishbein, 1980] Ajzen, I. et Fishbein, M. (1980). *Understanding attitudes and predicting social behavior*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall. 48
- [Albarracin *et al.*, 2001] Albarracin, D., Johnson, B., Fishbein, M. et Muellerleile, P. (2001). Theories of Reasoned Action and Planned Behavior as Models of Condom Use : A Meta-Analysis. *Psychological Bulletin*, 127(1):142–161. 48
- [Albert et Barabási, 2002] Albert, R. et Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Review of Modern Physics*, 74:47–97. 196, 199, 200, 201, 202

- [Allport et Postman, 1947] Allport, G. W. et Postman, L. (1947). *The psychology of rumor*. New York : Holt, Rinehart & Winston. 52
- [Amblard, 2002] Amblard, F. (2002). Which ties to choose ? a survey of social networks models for agent-based social simulations. *In SCS International Conference On Artificial Intelligence, Simulation and Planning in High Autonomy Systems, Lisbon, Portugal*, pages 253–258. 21
- [Amblard et Deffuant, 2001] Amblard, F. et Deffuant, G. (2001). Study of the social networks aspects on the images project. Rapport technique, Cemagref-LISC. 80, 84
- [Amblard et Deffuant, 2004] Amblard, F. et Deffuant, G. (2004). The role of network topology on extremism propagation with the relative agreement opinion dynamics. *Physica A Statistical Mechanics and its Applications*, 343:725–738. 72
- [Amblard et Phan, 2006] Amblard, F. et Phan, D., éditeurs (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*. Hermès Science Publications. 18, 199, 244, 245, 249, 252, 254
- [Amblard et al., 2006] Amblard, F., Rouchier, J. et Bommel, P. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*, chapitre Evaluation et validation de modèles multiagents, pages 87–119. *In* [Amblard et Phan, 2006]. 25, 26
- [Anderson, 1998] Anderson, E. W. (1998). Customer satisfaction and word of mouth. *Journal of Service Research*, 1(1):5–17. 54
- [Anderson, 1983a] Anderson, J. (1983a). A spreading activation theory of memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 22(3):261–95. 104
- [Anderson, 1976] Anderson, J. R. (1976). *Language, memory, and thought*. Hillsdale, NJ : Erlbaum. 94
- [Anderson, 1983b] Anderson, J. R. (1983b). *The Architecture of Cognition*. Lawrence Erlbaum Associates. 95
- [Anderson et Bower, 1973a] Anderson, J. R. et Bower, G. H. (1973a). *Human Associative Memory*, chapitre Associationism : a historical review, pages 9–38. *In* [Anderson et Bower, 1973b]. 94
- [Anderson et Bower, 1973b] Anderson, J. R. et Bower, G. H. (1973b). *Human Associative Memory*. Halsted Press, Div. of John Wiley & Son. 94, 244
- [Anderson, 1973] Anderson, R. E. (1973). Consumer dissatisfaction : The effect of disconfirmed expectancy on perceived product performance. *Journal of Marketing Research*, 10:38–44. 47
- [Armitage et Conner, 2001] Armitage, C. et Conner, M. (2001). Efficacy of the theory of planned behaviour : a meta-analytic review. *British Journal of Social Psychology*, 10:471–499. 48
- [Armstrong et Kotler, 2007] Armstrong, G. et Kotler, P. (2007). *Marketing : an introduction*. Pearson Education Inc. / Prentice Hall, 8th édition. 37

- [Audenaert et Steenkamp, 1997] Audenaert, A. et Steenkamp, J. (1997). *Agricultural marketing and consumer behavior in a changing world*, chapitre Means-end chain theory and laddering in agricultural marketing research, pages 217–230. Boston : Kluwer. 98
- [Axelrod, 1997] Axelrod, R. (1997). *Simulating Social Phenomena*, chapitre Advancing the art of simulation in the social sciences. In [Conte *et al.*, 1997]. 16, 18
- [Axtell, 2000] Axtell, R. (2000). Why agents? : on the varied motivations for agent computing in the social sciences. Rapport technique, Center on Social and Economic Dynamics. 18
- [Axtell, 2006] Axtell, R. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*, chapitre La fin des débuts pour les SMA en sciences sociales, pages 141–150. In [Amblard et Phan, 2006]. 12, 16, 19
- [Bachelard, 1938] Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Librairie philosophique Vrin. 14
- [Bagozzi et Dabholkar, 2000] Bagozzi, R. et Dabholkar, P. (2000). Discursive psychology : an alternative conceptual foundation to means-end chain theory. *Psychology and Marketing*, 17:535–586. 99
- [Bagozzi et Dholakia, 1999] Bagozzi, R. et Dholakia, U. (1999). Goal setting and goal striving in consumer behavior. *Journal of Marketing*, 63:19–32. 99
- [Bagozzi *et al.*, 1996] Bagozzi, R., G. Henderson and, P. D. et Iacobucci, D. (1996). *Networks in marketing*, chapitre Network analysis of hierarchical cognitive connections between concrete and abstract goals., pages 364–383. Thousand Oaks : Sage. 99
- [Bailey, 1957] Bailey, N. T. (1957). *The Mathematical Theory of Epidemics*. London : Griffin, 1st édition. 74
- [Bailey, 1975] Bailey, N. T. (1975). *The Mathematical Theory of Infectious Diseases and Its Applications*. London : Charles Griffin and Company. 74
- [Bala et Goyal, 1998] Bala, V. et Goyal, S. (1998). Learning from Neighbours. *The Review of Economic Studies*, 65(3):595–621. 68, 69
- [Ball *et al.*, 1997] Ball, F., Mollison, D. et Scalia-Tomba, G. (1997). Epidemics with Two Levels of Mixing. *The Annals of Applied Probability*, 7(1):46–89. 75, 76
- [Bandura, 2001] Bandura, A. (2001). *Media effects : Advances in theory and research*, chapitre Social cognitive theory of mass communications, pages 121–153. Hillsdale, NJ :Lawrence Erlbaum., 2nd édition. 46, 56, 58
- [Banerjee, 1992] Banerjee, A. (1992). A simple model of herd behavior. *Quarterly Journal of Economics*, CVII(3):797–817. 68
- [Banerjee, 1993] Banerjee, A. (1993). The economics of rumours. *Review of Economic Studies*, 19:309–327. 67, 69

- [Banerjee et Fudenberg, 2004] Banerjee, A. et Fudenberg, D. (2004). Word-of-mouth learning. *Games and Economic Behavior*, 46:1–22. 68
- [Bangerter et Heath, 2004] Bangerter, A. et Heath, C. (2004). The Mozart effect : Tracking the evolution of a scientific legend. *British Journal of Social Psychology*, 43(4):605–623. 52
- [Barabási et Albert, 1999] Barabási, A.-L. et Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286:509–512. 201
- [Barsalou, 1992] Barsalou, L. W. (1992). *Frames, Fields, and Contrasts : New Essays in Semantic and Lexical Organization*, chapitre Frames, Concepts, and Conceptual Fields, pages 21–74. Hillsdale, NJ : Erlbaum. 95
- [Bass, 1969] Bass, F. M. (1969). A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 15(5):215–227. 64
- [Bass, 1986] Bass, F. M. (1986). *Innovation Diffusion of New Product Acceptance*, chapitre The Adoption of a Marketing model : comments and observations. Cambridge, MA : Ballinger Publishing Company. 65
- [Baym et al., 2004] Baym, N. K., Zhang, Y. B. et Lin, M.-C. (2004). Social interactions across media - interpersonal communication on the internet, telephone and face-to-face. *New Media & Society*, 6(3):299–318. 53, 54
- [Becker, 1974] Becker, G. S. (1974). A theory of social interactions. Nber working paper series, NBER. 57
- [Behrman et al., 2002] Behrman, J. R., Kohler, H.-P. et Watkins, S. C. (2002). Social networks and changes in contraceptive use over time : Evidence from a longitudinal study in rural kenya. *Demography*, 39(4):713–737. 35, 59, 207
- [Ben Said, 2003] Ben Said, L. (2003). *Simulation Multi-Agent des Comportements des Consommateurs dans un Contexte Concurrentiel*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. 25, 78
- [Ben Said et al., 2002] Ben Said, L., Bouron, T. et Drogoul, A. (2002). Agent-based interaction analysis of consumer behavior. In *AAMAS '02 : Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 184–190, New York, NY, USA. 78
- [Berger et Luckmann, 1966] Berger, P. L. et Luckmann, T. (1966). *The Social Construction of Reality*. New York, Doubleday. 60
- [Berger, 2001] Berger, T. (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture : a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25:245–260. 70, 71, 78
- [Bernhardt et Mackenzie, 1972] Bernhardt, I. et Mackenzie, K. (1972). Some Problems in Using Diffusion Models for New Products. *Management Science*, 19(2):187–200. 66

- [Bhargava *et al.*, 1993] Bhargava, S. C., Kumar, A. et Mukherjee, A. (1993). A stochastic cellular automata model of innovation diffusion. *Technological Forecasting and Social Change*, 44:87–97. 70
- [Bianchi-Demicheli *et al.*, 2006] Bianchi-Demicheli, F., Perrin, E., Dupanloup, A., Dumont, P., Bonnet, J., Berthoud, M., Kulier, R., Bettoli, L., Lorenzi-Cioldi, F. et Chardonnens, D. (2006). Contraceptive counselling and social representations : a qualitative study. *Swiss Medical Weekly*, 136(7/8):127. 39
- [Bikhchandani *et al.*, 1992] Bikhchandani, S., Hirshleifer, D. et Welch, I. (1992). A theory of fads, fashion, custom, and cultural change as informational cascades. *Journal of Political Economy*, 100(5):992–1026. 68
- [Bloom, 1995] Bloom, H. (1995). *le principe de lucifer : une expédition scientifique dans les forces de l'histoire. [Tome 1]*. Editions Le jardin des Livres. 197
- [Blume, 1993] Blume, L. (1993). The statistical mechanics of strategic interaction. *Games and Economic Behavior*, 4:387–424. 70
- [Boccaletti *et al.*, 2006] Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M. et Hwang, D. (2006). Complex networks : Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5):175–308. 74
- [Bonacich, 2004] Bonacich, P. (2004). The invasion of the physicists. *Social Networks*, 26(3):285–288. 195
- [Bourgault, 1995] Bourgault, L. M. (1995). *Mass Media in Sub-Saharan Africa*. Indiana University Press. 30
- [Box et Draper, 1987] Box, G. E. P. et Draper, N. R. (1987). *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. Wiley. 236
- [Breckler, 1984] Breckler, S. (1984). Empirical validation of affect, behavior and cognition as distinct components of attitude. *Journal of Personality and Social Psychology*, 47:1191–1205. 47
- [Breckler et Wiggins, 1992] Breckler, S. J. et Wiggins, E. C. (1992). *Attitude Structure and Function*, chapitre On defining attitude and attitude theory : Once more with feeling., pages 407–427. Hillsdale, NJ : Erlbaum. 47
- [Bühler et Kohler, 2003] Bühler, C. et Kohler, H.-P. (2003). Talking about aids : The influence of communication networks on individual risk perceptions of hiv/aids infection and favored protective behaviors in south nyanza district, kenya. *Demographic Research*, S1(13):397–438. 40, 59
- [Bulkeley, 2002] Bulkeley, W. M. (2002). E-commerce (a special report) : Cover story-pas it on : Advertisers discover they have a friend in viral marketing. *Wall street journal*. 40
- [Bulle, 2005] Bulle, E. (2005). Les modèles formels et l'explication en sciences sociales. *L'Année sociologique*, 55:19–34. 12

- [Buzzel et Gale, 1987] Buzzel, R. et Gale, B. (1987). *The PIMS Principles*. The Free Press, New York. 47
- [Carl, 2006a] Carl, W. J. (2006a). To tell or not to tell ? assessing the practical benefits of disclosure for word-of-mouth marketing agents and their conversational partners. Rapport technique, Northeastern University. 54, 59
- [Carl, 2006b] Carl, W. J. (2006b). What's all the buzz about ? everyday communication and the relational basis of word-of-mouth and buzz marketing practices. *Management Communication Quarterly*, 19(4):601–634. 53, 54, 76, 196, 238
- [Carrington et al., 2005] Carrington, P. J., Scott, J. et Wasserman, S. (2005). *Models and Methods in Social Network Analysis*. Cambridge University Press. 195
- [Cathelat, 1990] Cathelat, B. (1990). *Sociostyles Système*. Paris, Editions d'Organisation. 37
- [Chandrasekaran et Tellis, 2005] Chandrasekaran, D. et Tellis, G. J. (2005). Diffusion of new products : A critical review of models, drivers, and findings. *Review of Marketing*. forthcoming. 65, 67
- [Chatterjee et Eliashberg, 1990] Chatterjee, R. et Eliashberg, J. (1990). The innovation diffusion process in a heterogeneous population : A micromodeling approach. *Management Science*, 36(9):1057–1079. 67
- [Chattoe et Gilbert, 1998] Chattoe, E. et Gilbert, N. (1998). A basic simulation of information diffusion. Images Working Paper UOS-98-01, Centre for Research on Simulation in the Social Sciences (CRESS), Department of Sociology, University of Surrey , Guildford. retrieved from <http://www-lics.clermont.cemagref.fr/ImagesProject/Results/models/diffusion0model/SimulDif.html>. 78
- [Chattoe-Brown, 2008] Chattoe-Brown, E. (2008). Communication privée. 228
- [Cheng et al., 2006] Cheng, S., Lam, T. et Hsu, C. H. C. (2006). Negative word-of-mouth communication intention : An application of the theory of planned behavior. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 30:95 – 116. 55
- [Chenghan et Shaffer, 1987] Chenghan, W. et Shaffer, D. R. (1987). Susceptibility to persuasive appeals as a function of source credibility and prior experience with the attitude object. *Journal of personality and social psychology*, 52(4):677–688. 50
- [Clemence et al., 1993] Clemence, A., Doise, W. et Lorenzi-Cioldi, F. (1993). *The Quantitative Analysis of Social Representations*. Pearson Education Limited. 60
- [Codol, 1975] Codol, J. (1975). On the so-called "superior conformity of the self" behavior : Twenty experimental investigations. *European Journal of Social Psychology*, 5:457–501. 57
- [Cohen, 1963] Cohen, B. C. (1963). *The press and foreign policy*. Princeton, NJ : Princeton University Press. 38

- [Cointet et Roth, 2007a] Cointet, J.-P. et Roth, C. (2007a). How realistic should knowledge diffusion models be? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 10(3-5). 78, 84
- [Cointet et Roth, 2007b] Cointet, J.-P. et Roth, C. (2007b). Information diffusion on realistic networks. In *Proc. 9th "francophone summit on algorithms for telecommunications" - AlgoTEL*, Ile d'Oléron. 78, 84
- [Collings *et al.*, 1999] Collings, D., Reeder, A. A., Adjali, I., Crocker, P. et Lyons, M. H. (1999). Agent based customer modelling : individuals who learn from their environment. *Computing in Economics and Finance*, (1352):1492–1497. 78
- [Collins et Loftus, 1975] Collins, A. M. et Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82(6):407–428. 95, 104
- [Conte *et al.*, 1997] Conte, R., Hegselmann, R. et Terna, P., éditeurs (1997). *Simulating Social Phenomena*. Springer, Berlin. 17, 245
- [Coquillard et Hill, 1997] Coquillard, P. et Hill, D. R. C. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes : Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Paris : Masson. 17
- [Cowan et Jonard, 2004] Cowan, R. et Jonard, N. (2004). Network structure and the diffusion of knowledge. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 28(8):1557–1575. 84
- [Daley et Kendall, 1964] Daley, D. et Kendall, D. (1964). Epidemics and Rumours. *Nature*, 204(4963):1118. 74
- [Daude, 2006] Daude, E. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*, chapitre « A Monte Carlo approach to diffusion » : une étude « historique » revisitée par la modélisation multi-agents. In [Amblard et Phan, 2006]. 16, 85
- [Deaux et Philogène, 2001] Deaux, K. et Philogène, G., éditeurs (2001). *Representations of the Social : Bridging Theoretical Traditions*. Blackwell Publishing. 60
- [Deffuant, 2001] Deffuant, G. (2001). Improving agri-environmental policies : a simulation approach to the cognitive properties of farmers and institutions. Rapport technique, Cemagref. Version 2. 28, 70, 71, 72, 73, 79, 193, 198, 238, 239
- [Deffuant, 2006] Deffuant, G. (2006). Comparing extremism propagation patterns in continuous opinion models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(3). 72
- [Deffuant *et al.*, 2003a] Deffuant, G., Amblard, F., Duboz, R. et Ramat, E. (2003a). *épistémologie de la simulation*, chapitre Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée, pages 45–64. Paris ENST. 24
- [Deffuant *et al.*, 2004] Deffuant, G., Amblard, F. et Weisbuch, G. (2004). Modelling group opinion shift to extreme : the smooth bounded confidence model. In *Proceedings of the European Social Simulation Association Conference, Valladolid, September*. 73

- [Deffuant *et al.*, 2002] Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G. et Faure, T. (2002). How can extremism prevail? a study based on the relative agreement interaction model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(4). 28, 72, 80
- [Deffuant *et al.*, 2003b] Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G. et Faure, T. (2003b). Simple is beautiful...and necessary. *Journal of Artificial Societies and Social Simulations*, 6(1). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/1/6.html>. 28, 29
- [Deffuant *et al.*, 2005] Deffuant, G., Huet, S. et Amblard, F. (2005). An individual-based model of innovation diffusion mixing social value and individual benefit. *American Journal of Sociology*, 110:1041–1069. 71, 72, 73, 80
- [Deffuant *et al.*, 2000] Deffuant, G., Neau, D., Amblard, F. et Weisbuch, G. (2000). Mixing beliefs among interacting agents. *Advances in Complex Systems*, 3:87–98. 71, 72
- [Dempster, 1967] Dempster, A. P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The Annals of Statistics*, 28:325–339. 93
- [Derbaix et Vanhamme, 2003] Derbaix, C. et Vanhamme, J. (2003). Inducing word-of-mouth by eliciting surprise : a pilot investigation. *Journal of economic psychology*, 24(1):99–116. 54
- [Deutsch et Gerard, 1955] Deutsch, M. et Gerard, H. (1955). A study of normative and informational social influence upon individual judgment. *Journal of abnormal and social psychology*, 51:629–636. 46, 56, 58
- [Dewar et Dutton, 1986] Dewar, R. et Dutton, J. (1986). The adoption of radical and incremental innovations : an empirical analysis. *Management Science*, 32(11):1422–1433. 44
- [Dichter, 1966] Dichter, E. (1966). How word-of-mouth advertising works. *Harvard Business Review*, 44(6):147–166. 54
- [Dodds *et al.*, 2003] Dodds, P. S., Muhamad, R. et Watts, D. J. (2003). An experimental study of search in global social networks. *Science*, 301(5634):827–829. 199
- [Dodson et Muller, 1978] Dodson, J. et Muller, E. (1978). Models of New Product Diffusion Through Advertising and Word-of-Mouth. *Management Science*, 24(15):1568–1578. 66
- [Doise *et al.*, 1995a] Doise, W., Clemence, A. et Lorenzi-Cioldi, F. (1995a). *The quantitative analysis of social representations*. Taylor and Francis. 60, 250
- [Doise *et al.*, 1995b] Doise, W., Clemence, A. et Lorenzi-Cioldi, F. (1995b). *The quantitative analysis of social representations*, chapitre Automatic cluster analysis : proximities between contents of a social representation, pages 15–34. In [Doise *et al.*, 1995a]. 114
- [Doran, 1998] Doran, J. E. (1998). Social simulation, agents and artificial societies. In *Proceedings of Third International Conference on Multi-Agent Systems, Paris, France*, pages 4–5. (Extended Abstract of Invited Address). 70

- [Drogoul, 2003] Drogoul, A. (2003). Simulation orientée agent : où sont les agents? *In Actes des Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, Megève, France.* 18
- [Drogoul et Ferber, 1992] Drogoul, A. et Ferber, J. (1992). From tom thumb to the dockers : Some experiments with foraging robots. *In From Animals To Animats : Second Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB 92)), (Hawaii, 1992).* MIT Press. 17
- [Drogoul et al., 1994] Drogoul, A., Ferber, J. et Cambier, C. (1994). *Simulating societies*, chapitre Multi-agent Simulation as a Tool for Analysing Emergent Processes in Societies, pages 49–62. *In* [Gilbert, 1994]. 19
- [Dunbar, 1996] Dunbar, R. (1996). *Grooming, Gossip, and the Evolution of Language.* Harvard University Press. 53
- [Durkheim, 1898] Durkheim, É. (1898). Représentations individuelles et représentations collectives. *Revue de métaphysique et de morale*, VI:273–302. 60
- [Eagly et Chaiken, 1993] Eagly, A. H. et Chaiken, S. (1993). *The psychology of attitudes.* Forth Worth, TX : Harcourt, Brace, Jovanovich. 45, 48
- [Eco, 1994] Eco, U. (1994). *The Limits of Interpretation.* Indiana University Press. 13
- [Edmonds, 2005a] Edmonds, B. (2005a). Assessing the safety of (numerical) representation in social simulation. Rapport technique, Centre for Policy Modelling. 101
- [Edmonds, 2005b] Edmonds, B. (2005b). *Virtual Worlds of Precision - computer-based simulations in the sciences and social sciences*, chapitre Simulation and Complexity - how they can relate, pages 5–32. Lit Verlag. 12, 26, 27, 29
- [Edmonds et Hales, 2003] Edmonds, B. et Hales, D. (2003). Replication, replication and replication - some hard lessons from model alignment. *In M2M Workshop.* 25
- [Edmonds et Moss, 2005] Edmonds, B. et Moss, S. (2005). From KISS to KIDS : An'anti-simplistic' modelling approach. *Lecture notes in computer science*, 3415:130–144. 30
- [Ellison, 1993] Ellison, G. (1993). Learning, local interaction, and coordination. *Econometrica*, 61(5):1047–1071. 68, 70
- [Ellison et Fudenberg, 1995] Ellison, G. et Fudenberg, D. (1995). Word-of-mouth communication and social learning. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(1):93–125. 68, 69
- [Engel et al., 1995a] Engel, J. F., Blackwell, R. D. et Miniard, P. W. (1995a). *Consumer Behaviour*, chapitre The Consumer Decision Process, pages 69–98. *In* [Engel et al., 1995b], 9 édition. 45
- [Engel et al., 1995b] Engel, J. F., Blackwell, R. D. et Miniard, P. W. (1995b). *Consumer Behaviour.* The Dryden Press, Orlando, 9th édition. 45, 52, 137, 159, 196, 235, 251

- [Epstein et Axtell, 1996] Epstein, J. M. et Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies : social science from the bottom up*. Washington, DC : Brookings Institution Press. 16
- [Erdős et Rényi, 1959] Erdős, P. et Rényi, A. (1959). On random graphs. *Publicationes Mathematicae*, 6:290–297. 199
- [Eve et al., 1997] Eve, R. A., Horsfall, S. et Lee, M. E., éditeurs (1997). *Chaos, Complexity, and Sociology : Myths, Models, and Theories*. London : Sage Publications. 84
- [Fazio et Zanna, 1981] Fazio, R. et Zanna, M. P. (1981). *Advances in experimental social psychology*, chapitre Direct experience and attitude behavior consistency, pages 161–202. New York : Academic Press. 48
- [Fazio, 1986] Fazio, R. H. (1986). *Handbook of motivation and cognition : Foundations of social behavior*, chapitre How do attitudes guide behavior ?, pages 204–243. New York : Guilford Press. 48
- [Febvre et Muller, 2003] Febvre, M. et Muller, L. (2003). Une personne sur deux est membre d’une association en 2002. *INSEE Première*, 920. 206
- [Febvre et Muller, 2004] Febvre, M. et Muller, L. (2004). La vie associative en 2002 - 12 millions de bénévoles. *INSEE Première*, 946. 206
- [Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *Les systèmes Multi-Agents, vers une intelligence collective*. InterÉditions. 17
- [Ferrand, 2006] Ferrand, N. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l’Homme et de la Société : une introduction*, chapitre Modéliser avec et pour les acteurs de terrain, pages 195–216. In [Amblard et Phan, 2006]. 12
- [Festinger, 1950] Festinger, L. (1950). Informal social communication. *Psychological Review*, 57(5):271–82. 56
- [Festinger, 1957] Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford Univ. Press. 44
- [Festinger, 1974] Festinger, L. (1974). *A theory of cognitive dissonance*. Evanston, Ill., Row, Peterson. 72
- [Fishbein et Ajzen, 1974] Fishbein, M. et Ajzen, I. (1974). Attitudes toward objects as predictors of single and multiple behavioral criteria. *Psychological Review*, 81:59–74. 48
- [Fishbein et Ajzen, 1975] Fishbein, M. et Ajzen, I. (1975). *Belief, Attitude, Intention, and Behavior : An Introduction to Theory and Research*. Reading, MA : Addison-Wesley. downloadable in <http://people.umass.edu/ajzen/f&a1975.html>. 47
- [Frank et Strauss, 1986] Frank, O. et Strauss, D. (1986). Markov graphs. *Journal of the American Statistical Association*, 81:832–842. 203

- [Fransella et Bannister, 1977] Fransella, F. et Bannister, D. (1977). *A Manual for Repertory Grid Technique*. London : Academic Press. 99
- [Galam, 2003] Galam, S. (2003). Modeling rumors : The no plane pentagon french hoax case. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 320:571–580. 52
- [Galam et Moscovici, 1991a] Galam, S. et Moscovici, S. (1991a). Compromise versus polarization in group decision making. *Defense Decision making, Russ. Psychol. J.*, 13:93–103. 71
- [Galam et Moscovici, 1991b] Galam, S. et Moscovici, S. (1991b). Towards a theory of collective phenomena : consensus and attitude changes in groups. *European Journal of Social Psychology*, 21:49–74. 71
- [Gale, 1996] Gale, D. (1996). What have we learned from social learning? *European Economic Review*, 40(3-5):617–628. 68, 69
- [Ganesh et al., 2005] Ganesh, A., Massoulie, L. et Towsley, D. (2005). The effect of network topology on the spread of epidemics. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 2, pages 1455–1466. 75, 76
- [Garcia et Calantone, 2002] Garcia, R. et Calantone, R. (2002). A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology : a literature review. *Journal of Product Innovation Management*, 19(2):110–132. 36
- [Gatignon et al., 1989] Gatignon, H. A., Eliashaberg, J. et Robertson, T. S. (1989). Modelling multinational diffusion patterns : An efficient methodology. *Marketing Science*, 8:231–247. 66
- [Gengler et al., 1995] Gengler, C. E., Klenosky, D. B. et Mulvey, M. S. (1995). Improving the graphic representation of means-end results. *International Journal of Research in Marketing*, 12:245–256. 99
- [Gerland, 2004] Gerland, P. (2004). Do social interactions affect hiv/aids attitudes and prevention strategies in rural malawi? Paper presented at the Annual Meeting of the Population Association of America, April 1-3, Boston MA, USA. 59
- [Geroski, 2000] Geroski, P. (2000). Models of technology diffusion. *Research Policy*, 29(4):603–625. 14, 63, 68, 73, 75, 77, 78, 235
- [Gerwin, 1988] Gerwin, D. (1988). A theory of innovation process for computer-aided manufacturing technology. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 35(2): 90–100. 36
- [Gilbert, 1994] Gilbert, N., éditeur (1994). *Simulating societies : the computer simulation of social phenomena*. University of Surrey, Guilford (GBR). 17, 251
- [Gilbert, 1995] Gilbert, N. (1995). Simulation : an emergent perspective. In *New Technologies in the Social Sciences*. 14
- [Gilbert et Troitzsch, 1999] Gilbert, N. et Troitzsch, K. (1999). *Simulation for the Social Scientists*. Open University Press. 70

- [Ginot et Monod, 2006] Ginot, V. et Monod, H. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*, chapitre Explorer les modèles par simulation : application aux analyses de sensibilité, pages 61–86. In [Amblard et Phan, 2006]. 26
- [Gluckman, 1963] Gluckman, M. (1963). Gossip and scandal. *Current Anthropology*, 4:307–316. 52
- [Godes *et al.*, 2005] Godes, D., Mayzlin, D., Chen, Y., Das, S., Dellarocas, C., Pfeiffer, B., Libai, B., Sen, S., Shi, M. et Verlegh, P. (2005). The Firm's Management of Social Interactions. *Marketing Letters*, 16(3):415–428. 51
- [Goffman et Newill, 1964] Goffman, W. et Newill, V. (1964). Generalization of epidemic theory : an application to the transmission of ideas. *Nature*, 204(4955):225–228. 74
- [Goldenberg *et al.*, 2001] Goldenberg, J., Libai, B. et Muller, E. (2001). Talk of the Network : A Complex Systems Look at the Underlying Process of Word-of-Mouth. *Marketing Letters*, 12(3):211–223. 70, 73, 84
- [Goldenberg *et al.*, 2000] Goldenberg, J., Libai, B., Solomon, S., Jan, N. et Stauffer, D. (2000). Marketing percolation. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 284(1-4):335–347. 74, 75
- [Gould, 1995] Gould, P. (1995). *Encyclopédie de la Géographie*, chapitre Epidémiologie et maladie, pages 947–967. Paris, Economica. 85
- [Granovetter, 1973] Granovetter, M. (1973). The Strength of Weak Ties. *The American Journal of Sociology*, 78(6):1360–1380. 195
- [Granovetter, 1978] Granovetter, M. (1978). Threshold models of collective behavior. *Am J Soc*, 83:1360–1380. 69
- [Granovetter, 1983] Granovetter, M. (1983). The strength of weak ties : A network theory revisited. *Sociological Theory*, 1:201–233. 196, 198
- [Grimm, 1999] Grimm, V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology : what have we learned and what could we learn in the future? In *International conference 'Individual-based approach in ecology : assumptions, achievements and prospects'*, Mikotajki , POLOGNE, volume 115, pages 129–148. 17, 26
- [Grunert *et al.*, 1995] Grunert, K. G., Grunert, S. C. et Sørensen, E. (1995). Mean-end chains and laddering : an inventory of problems and an agenda for research. Rapport technique, Centre for market surveillance, research and strategy for the food sector. Working paper no. 34. 98
- [Guillaume et Latapy, 2004] Guillaume, J. et Latapy, M. (2004). Bipartite structure of all complex networks. *Information Processing Letters*, 90(5):215–221. 202
- [Gutowitz, 1991] Gutowitz, H. A. (1991). *Cellular Automata - Theory and Experiment*. Cambridge, MA : The M.I.T. Press. 20

- [Hägerstrand, 1952] Hägerstrand, T. (1952). *The propagation of innovation waves*. Royal University of Lund, Dept. of Geography. 16
- [Haradji *et al.*, 2004] Haradji, Y., Ferrand, N. et Li, H. (2004). Relations à l'utilisateur et nouveaux usages. In *Systèmes Multi Agents, ARAGO 29, OFTA, TEC&DOC*, pages 215–260. 12
- [Hauser *et al.*, 2005] Hauser, J., Tellis, G. et Griffin, A. (2005). Research on Innovation : A Review and Agenda for Marketing Science. 59
- [Hedström et Swedberg, 1998] Hedström, P. et Swedberg, R. (1998). *Social Mechanisms : An Analytical Approach to Social Theory*. Cambridge University Press. 19
- [Hegselmann et Krause, 2002] Hegselmann, R. et Krause, U. (2002). Opinion dynamics and bounded confidence : models, analysis and simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(3). 71
- [Helleringer et Kohler, 2005] Helleringer, S. et Kohler, H.-P. (2005). Social networks, perceptions of risk and changing attitudes towards hiv/aids : new evidence from a longitudinal study using fixed-effects estimation. *Population Studies*, 59(3):265–282. 59
- [Héran, 1987] Héran, F. (1987). Comment les Français voisinent. *Economie et Statistique*, 195:43–60. 197
- [Hethcote, 2000] Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. *SIAM Review*, 42(4):599–653. 74
- [Hoffmann, 1985] Hoffmann, B. (1985). *Histoire d'une grande idée, la relativité*. Berlin. 14, 29
- [Hofstede *et al.*, 1998a] Hofstede, F. T., Audenaert, A., Steenkamp, J. et Wedel, M. (1998a). An investigation into the association pattern technique as a quantitative approach to measuring means-end chains. *International Journal of Research in Marketing*, 15:37–50. 99
- [Hofstede *et al.*, 1998b] Hofstede, T., Frenkel, Audenaert, A., Steenkamp, J.-B. E. et Wedel, M. (1998b). The association pattern technique : An alternative approach to measuring means-end chains. *International Journal of Research in Marketing*, 15:37–50. 99
- [Holbrook, 1999] Holbrook, M. B., éditeur (1999). *Consumer Value : A framework for analysis and research*. Routledge, New York. 46
- [Huefner et Hunt, 2000] Huefner, J. C. et Hunt, H. K. (2000). Consumer retaliation as a response to dissatisfaction. *Journal of Consumer Satisfaction, Dissatisfaction and Complaining Behavior*, 13:61–82. 54
- [Huston *et al.*, 1988] Huston, M., DeAngelis, D. et Post, W. (1988). New computer models unify ecological theory. *Bioscience*, 38(10):682–691. 17
- [INSEE, 2006] INSEE, éditeur (2006). *Données sociales - la société française*. INSEE. 263, 266, 267

- [INSEE, 2007a] INSEE (2007a). *Repères et références statistiques*, chapitre Les établissements, pages 35–68. In [INSEE, 2007c]. 207
- [INSEE, 2007b] INSEE (2007b). *Repères et références statistiques*, chapitre Le système éducatif, pages 15–34. In [INSEE, 2007c]. 207
- [INSEE, 2007c] INSEE (2007c). *Repères et références statistiques*. 256
- [INSEE, 2008] INSEE (2008). Epcv participation et contacts sociaux - historique octobre 1996-2004. synthèse d'enquête, disponible sur [www.insee.fr](http://www.insee.fr). 127, 196, 197
- [Izquierdo et Polhill, 2006] Izquierdo, L. R. et Polhill, J. G. (2006). Is your model susceptible to floating-point errors? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(4). 101
- [Jacoby *et al.*, 1987] Jacoby, J., Hoyer, W. D. et Sheluga, D. A. (1987). *Miscomprehension of Televised Communication*. Lawrence Erlbaum Associates. 44
- [Jager, 2000] Jager, W. (2000). *Modelling Consumer Behaviour*. Thèse de doctorat, University of Groningen, Centre for Environmental and Traffic Psychology. 81, 82, 83, 239
- [Jager et Janssen, 2002] Jager, W. et Janssen, M. (2002). Using artificial agents to understand laboratory experiments of common-pool resources with real agents. *Complexity and Ecosystem Management : The Theory and Practice of Multi-Agent Systems*, pages 75–102. 82
- [Jager et Janssen, 2003] Jager, W. et Janssen, M. (2003). The Need for and Development of Behaviourally Realistic Agents. *Lecture Notes In Computer Science*, 2581:36–49. 82
- [Jager *et al.*, 2000] Jager, W., Janssen, M., De Vries, H., De Greef, J. et Vlek, C. (2000). Behaviour in commons dilemmas : Homo economicus and Homo psychologicus in an ecological-economic model. *Ecological Economics*, 35(3):357–379. 82
- [Jager *et al.*, 2001] Jager, W., Janssen, M. et Vlek, C. (2001). Experimentation with household dynamics : the consumat approach. *International Journal of Sustainable Development*, 4(1):90–100. 82
- [Jager *et al.*, 1999] Jager, W., Janssen, M. et Vlek, C. (1999). Consumats in a commons dilemma : testing the behavioural rules of simulated consumers. Rapport technique, Groningen : Centre for Environment and Traffic Psychology, University of Groningen. 82
- [Jager *et al.*, 2002] Jager, W., Janssen, M. et Vlek, C. (2002). How Uncertainty Stimulates Over-Harvesting In A Resource Dilemma : Three Process Explanations. *Journal of Environmental Psychology*, 22(3):247–263. 82
- [Janssen et Jager, 1999] Janssen, M. et Jager, W. (1999). An integrated approach to simulating behavioural processes : A case study of the lock-in of consumption patterns. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2(2). <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/2/2/2.html>. 82

- [Janssen et Jager, 2002] Janssen, M. et Jager, W. (2002). Stimulating diffusion of green products. *Journal of Evolutionary Economics*, 12(3):283–306. 82
- [Janssen et Jager, 2003] Janssen, M. A. et Jager, W. (2003). Simulating market dynamics : Interactions between consumer psychology and social networks. *Artificial Life*, 9:343–356. 82, 83
- [Jensen, 1996] Jensen, F. (1996). *Introduction to Bayesian Networks*. Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA. 211, 217
- [Jodelet, 1984] Jodelet, D. (1984). *Psychologie sociale*, chapitre Représentations sociales : phénomènes, concepts et théorie, pages 357–378. In [Moscovici, 1984a]. 60
- [Jodelet, 1989] Jodelet, D. (1989). *Les représentations sociales*. Paris : PUF. 60
- [Jodelet, 1991] Jodelet, D. (1991). *Madness and social representations*. Sussex : Harvester Wheatsheaf. 60
- [John et al., 2006] John, H., Tellis, G. J. et Griffin, A. (2006). Research on innovation and new products : A review and agenda for marketing science. *Marketing Science*, 25:687–717. forthcoming. 59
- [Johnson-Laird, 1980] Johnson-Laird, P. N. (1980). Mental models in cognitive science. *Cognitive Science*, 4:71–115. 11
- [Johnson-Laird et al., 1996] Johnson-Laird, P. N., Oakhill, J. et Garnham, A., éditeurs (1996). *Mental Models in Cognitive Science*. Psychology Press. 11
- [Kalampalikis et Buschini, 2007] Kalampalikis, N. et Buschini, F. (2007). La contraception masculine m'Ã©dicale : enjeux psychosociaux et craintes imaginaires. *Nouvelle Revue de Psychosociologie*, 4:89–104. 39
- [Kaler, 2004] Kaler, A. (2004). Aids-talk in everyday life : Hiv/aids in men's informal conversation in southern malawi, 1999-2001. *Social Science and Medicine*, 59(2):285–298. 53
- [Kalish, 1985] Kalish, S. (1985). A New Product Adoption Model with Price, Advertising, and Uncertainty. *Management Science*, 31(12):1569–1585. 66
- [Kalyanam et al., 2007] Kalyanam, K., McIntyre, S. et Masonis, J. T. (2007). Behind the scenes of a viral marketing campaign : How plaxo crossed the tipping point and avoided the fate of the ebola virus. Rapport technique, Santa Clara University, Santa Clara, California. 40
- [Kant, 2008] Kant, J.-D. (2008). Communication privée. 198
- [Kant et Thiriot, 2006] Kant, J.-D. et Thiriot, S. (2006). Modeling one human decision maker with a multi-agent system : the codage approach. In *Proceedings of AAMAS'06*. 136
- [KDHS, 2003a] KDHS (2003a). Kenya demographic and health survey 2003. Central Bureau of Statistics. 49, 204, 205, 206, 208, 212

- [KDHS, 2003b] KDHS (2003b). Kenya demographic and health survey 2003 - key findings. Rapport technique, Central Bureau of Statistics. 204
- [KDHS, 2003c] KDHS (2003c). Kenya demographic and health survey 2003 - preliminary report. Rapport technique, Central Bureau of Statistics, Ministry of Health, Kenya Medical Research Institute, Centers for Disease Control and Prevention, MEASURE DHS+. 204
- [Kiel et Elliott, 1997] Kiel, L. D. et Elliott, E. W., éditeurs (1997). *Chaos Theory in the Social Sciences : Foundations and Applications*. University of Michigan Press. 84
- [Kleijnen, 1995] Kleijnen, J. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82(1):145–162. 22
- [Klein et al., 1993] Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, R. et Zsombok, C. E., éditeurs (1993). *Decision Making in Action : models and methods*. Norwood, N.J. : Ablex Pub. 51
- [Klein, 1999] Klein, N. (1999). *No Logo*. Picador, New York, USA. 39
- [Kleinberg, 2002] Kleinberg, J. (2002). Small-World Phenomena and the Dynamics of Information. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 14. 200
- [Kleinfeld, 2002] Kleinfeld, J. S. (2002). Could it be a big world after all? the "six degrees of separation" myth. *Society*. 200
- [Klenosky et al., 1993] Klenosky, D., Gengler, C. et Mulvey, M. (1993). Understanding the factors influencing ski destination choice : a means-end analytic approach. *Journal of Leisure Research*, 25:362–379. 99
- [Knight et Chapman, 2004] Knight, J. et Chapman, S. (2004). "asian yuppies...are always looking for something new and different" : creating a tobacco culture among young asians. *Tob. Control*, 13:ii22 – ii29. 136
- [Kochen, 1989] Kochen, M., éditeur (1989). *The Small World*. Ablex, Norwood, NJ. 182
- [Kohler, 1997] Kohler, H.-P. (1997). Learning in social networks and contraceptive choice. *Demography*, 34:369–383. 40
- [Kohler et al., 2001] Kohler, H.-P., Behrman, J. R. et Watkins, S. C. (2001). The density of social networks and fertility decisions : Evidence from s. nyanza district, kenya. *Demography*, 38(1):43–58. 35, 59, 207
- [Kohler et al., 2007] Kohler, H.-P., Behrman, J. R. et Watkins, S. C. (2007). Social networks and hiv/aids risk perceptions. *Demography*, 44(1):1–33. 59
- [Kotler et Dubois, 1999] Kotler, P. et Dubois, B. (1999). *Marketing Management*. Publi-unions Editions, Paris, 9<sup>e</sup>me Édition édition. 47
- [Langton, 1995] Langton, C. (1995). *Artificial Life : An Overview*. MIT Press. 14

- [Latapy *et al.*, 2008] Latapy, M., Magnien, C. et Vecchio, N. D. (2008). Basic notions for the analysis of large two-mode networks. *Social Networks*, 30:31–48. 201, 202
- [Law et Kelton, 1991] Law, A. et Kelton, W. (1991). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, New York, 2nd édition. 25
- [Lawrence et Lawton, 1981] Lawrence, K. et Lawton, W. (1981). Applications of diffusion models : some empirical results. *New Product Forecasting*, pages 529–541. 65
- [Lawton et Lawton, 1979] Lawton, S. et Lawton, W. (1979). An autocatalytic model for the diffusion of educational innovations. *Educational Administration Quarterly*, 15:19–53. 65
- [Lazarsfeld *et al.*, 1944] Lazarsfeld, P., Berelson, B. et Gaudet, H. (1944). *The People Choice*. NY, Duell, Sloan & Pearce. 38
- [Leenders, 1997] Leenders, R. (1997). *Evolution of Social Networks*, chapitre Longitudinal behavior of network structure and actor attributes : modeling interdependence of contagion and selection, pages 165–184. Gordon & Breach, Amsterdam. 203
- [Legay, 1973] Legay, J. (1973). La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale. *Informatique et Biosphère*. 29
- [Lendrevie *et al.*, 2006] Lendrevie, J., LÃ©vy, J. et Lindon, D. (2006). *Mercator*. Dunod, Paris, 8 édition. 38, 52, 53, 59, 159, 235
- [Libertore et Bream, 1997] Libertore, M. J. et Bream, D. (1997). Adoption and implementation of digital-imaging technology in the banking and insurance industries. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 44:367–377. 66
- [Liljeros *et al.*, 2001] Liljeros, F., Edling, C., Amaral, L., Stanley, H. et Aaberg, Y. (2001). The web of human sexual contacts. *Nature*, 411(6840):907–908. 201
- [Lines *et al.*, 1995] Lines, R., Breivik, E. et Supphellen, M. (1995). Elicitation of attributes : a comparison of preference model structures derived from two elicitation techniques. *In Marketing Today and for the 21st century : proceedings of the 24th EMAC Conference*. 99
- [Lisi, 2007] Lisi, A. (2007). An Exceptionally Simple Theory of Everything. *Arxiv preprint arXiv :0711.0770*. 29
- [Loftus, 1973] Loftus, E. (1973). Activation of semantic memory. *American Journal of Psychology*, 86:331–337. 95
- [Lorenz, 1996] Lorenz, E. (1996). *The Essence of Chaos*. University of Washington Press. 84, 241
- [Lorenz, 2007] Lorenz, J. (2007). Continuous Opinion Dynamics Under Bounded Confidence : A Survey. *International Journal Of Modern Physics C*, 18(12):1819. 71, 72
- [Lupton, 1996] Lupton, E. (1996). *Mixing Messages : Graphic Design in Contemporary Culture*. Princeton Architectural Press. 39

- [Lynch, 1996] Lynch, A. (1996). *Thought Contagion : How Belief Spreads through Society*. New York, NY : Basic Books. 73
- [Macintyre *et al.*, 2001] Macintyre, K., Brown, L. et Sosler, S. (2001). "it's not what you know, but who you knew" : Examining the relationship between behavior change and aids mortality in africa. *AIDS Education and Prevention*, 13(2):160–174. 50
- [Mahajan *et al.*, 1990] Mahajan, V., Muller, E. et Bass, F. M. (1990). New product diffusion models in marketing : A review and directions for research. *Journal of Marketing*, 54(1):1–26. 65, 66, 67
- [Mahajan *et al.*, 1984a] Mahajan, V., Muller, E. et Kerin, R. (1984a). Introduction Strategy for New Products with Positive and Negative Word-of-Mouth. *Management Science*, 30(12):1389–1404. 66
- [Mahajan *et al.*, 1984b] Mahajan, V., Muller, E. et Sharma, S. (1984b). An empirical comparison of awareness forecasting models of new product introduction. *Marketing Science*, 3(3):179–197. 65
- [Mahajan *et al.*, 2000] Mahajan, V., Muller, E. et Wind, Y. (2000). *New-Product Diffusion Models*. Springer. 12, 66, 67
- [Maslow, 1943] Maslow, A. H. (1943). A theory of human motivation. *Psychological Review*, 50:370–396. 51
- [Maslow, 1954] Maslow, A. H. (1954). *Motivation and Personality*. New York, USA : Harper & Row. 51
- [Max-Neef, 1992] Max-Neef, M. (1992). *Real-life economics : Understanding wealth creation*, chapitre Development and human needs. London, New York : Routledge. 82
- [Mburugu et Adams, 2004] Mburugu, E. K. et Adams, B. N. (2004). *Handbook of World Families*, chapitre Families in Kenya, pages 3–24. SAGE. 205
- [McGuire, 1968] McGuire, W. J. (1968). *The Handbook of Social Psychology*, volume 3, chapitre The Nature of Attitudes and Attitude Change, pages 136–314. Addison-Wesley, 2nd édition. 45
- [McGuire, 1976] McGuire, W. J. (1976). Some internal psychological factors influencing consumer choice. *Journal of Consumer Research*, 2:320–359. 45
- [McGuire, 1989] McGuire, W. J. (1989). *Public Communication Campaigns*, chapitre Theoretical foundations of campaigns, pages 43–65. Newbury Park, CA : Sage Publications, 2nd édition. 45
- [Mckeown et Sheehy, 2006] Mckeown, G. et Sheehy, N. (2006). Mass Media and Polarisation Processes in the Bounded Confidence Model of Opinion Dynamics. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1). 72
- [McPherson *et al.*, 2001] McPherson, M., Smith-Lovin, L. et Cook, J. (2001). Birds of a feather : Homophily in social networks. *Annual Reviews in Sociology*, 27:415–444. 203

- [Meade et Islam, 2006] Meade, N. et Islam, T. (2006). Modelling and forecasting the diffusion of innovation—A 25-year review. *International Journal of Forecasting*, 22(3): 519–545. 65, 67
- [Milgram, 1967] Milgram, S. (1967). The small world problem. *Psychology Today*, pages 60–67. 182, 195, 199
- [Minsky, 1965] Minsky, M. (1965). Matter, mind and models. In *Proceedings of IFIP Congress*, pages 45–49. 11
- [Monroe et Krishnan, 1985] Monroe, K. et Krishnan, R. (1985). *Perceived Quality : How Consumers View Stores and Merchandise*, chapitre The effect of price on subjective product evaluations, pages 209–232. Association for COConsumer Research, Provo, UT. 47
- [Montgomery et Casterline, 1998] Montgomery, M. et Casterline, J. (1998). Social Networks and the Diffusion of Fertility Control. In *Seminar on Values and Fertility Change*. 59
- [Moore et Newman, 2000] Moore, C. et Newman, M. (2000). Epidemics and percolation in small-world networks. *Physical Review E*, 61(5):5678–5682. 75
- [Moscovici, 1961] Moscovici, S. (1961). *La psychanalyse, son image et son public*. Paris : PUF. 60
- [Moscovici, 1984a] Moscovici, S. (1984a). *Psychologie Sociale*. Presses Universitaires de France. 57, 257
- [Moscovici, 1984b] Moscovici, S. (1984b). *Social Representations*. University Press. 100
- [Moscovici, 1998] Moscovici, S. (1998). *Psychologie Sociale*. Presses Universitaires de France, 7th édition. 47, 57, 58
- [Moscovici, 2005] Moscovici, S. (2005). *Psychologie Sociale*. Presses Universitaires de France, 2ème édition quadridge édition. 50, 72
- [Moscovici et Doise, 1992] Moscovici, S. et Doise, W. (1992). *Dissension et consensus*. PUF, Paris. 71
- [Moss et Edmonds, 2005] Moss, S. et Edmonds, B. (2005). Towards good social science. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8(4). 23
- [Myers, 1987] Myers, D. (1987). *Social Psychology*. New York : McGraw-Hill, second edition édition. 48
- [Nekovee et al., 2007] Nekovee, M., Moreno, Y., Bianconi, G. et Marsili, M. (2007). Theory of rumour spreading in complex social networks. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 374(1):457–470. 73
- [Newman, 2001a] Newman, M. (2001a). Scientific collaboration networks. I. Network construction and fundamental results. *Physical Review E*, 64(1):16131. 201

- [Newman, 2001b] Newman, M. (2001b). Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical Review E*, 64(1):16132. 201
- [Newman, 2002] Newman, M. (2002). Spread of epidemic disease on networks. *Physical Review E*, 66(1):16128. 75
- [Newman *et al.*, 2001] Newman, M., Strogatz, S. et Watts, D. (2001). Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. *Physical Review E*, 64(2):26118. 201
- [Newman *et al.*, 2002] Newman, M., Watts, D. et Strogatz, S. (2002). Random graph models of social networks. *PNAS*, 99:2566–2572. 202
- [North *et al.*, 2005] North, M., Howe, T., Collier, N. et Vos, J. (2005). Repast symphony runtime system. In Macal, C., North, M. et Sallach, D., éditeurs : *Proceedings of the Agent 2005 Conference on Generative Social Processes, Models, and Mechanisms*. 139
- [Ostrom, 1968] Ostrom, T. (1968). The relationship between the affective, behavioral and cognitive components of attitude. *Journal of Experimental Social Psychology*, 5:12–30. 47
- [Ostrom, 1988] Ostrom, T. (1988). Computer simulation : the third symbol system. *Journal of Experimental Social Psychology*, 24:381–392. 13, 16
- [Parker, 1994] Parker, P. M. (1994). Aggregate diffusion forecasting models in marketing : A critical review. *International Journal of Forecasting*, 10(2):353–380. 65, 67
- [Pastor-Satorras et Vespignani, 2001] Pastor-Satorras, R. et Vespignani, A. (2001). Epidemic Spreading in Scale-Free Networks. *Physical Review Letters*, 86(14):3200–3203. 75
- [Pattison, 2008] Pattison, A. (2008). Communication privée. 228
- [Pearl, 1986] Pearl, J. (1986). Fusion, propagation, and structuring in belief networks. *Artificial Intelligence*, 29(3):241–288. 93
- [Pearl, 1993] Pearl, J. (1993). Belief networks revisited. *Artificial Intelligence*, 59:49–56. 93
- [Perez et Batten, 2006] Perez, P. et Batten, D., éditeurs (2006). *Complex Science for a Complex World : Exploring Human Ecosystems with Agents*. ANU E Press. 18, 83
- [Phan, 2006] Phan, D. (2006). *Complex Science for a Complex World : Exploring Human Ecosystems with Agents*, chapitre Des réseaux d’automates aux modèles multi-agents : choix discrets avec dépendance sociale, pages 237–265. ANU E Press. 21
- [Phan et Amblard, 2007] Phan, D. et Amblard, F., éditeurs (2007). *Agent-based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*. Oxford, The Bardwell Press. 18

- [Pieters *et al.*, 1995] Pieters, R., Baumgartner, H. et Allen, A. (1995). A means-end chain approach to consumer goal structures. *International Journal of Research in Marketing*, 12:227–244. 99
- [Prasad, 1935] Prasad, J. (1935). The psychology of rumour : A study relating to the great Indian earthquake of 1934. *British Journal of Psychology*, 26:1–15. 52
- [Prochaska *et al.*, 1992] Prochaska, J., DiClemente, C. et Norcross, J. (1992). In search of how people change. Applications to addictive behaviors. *Am Psychol*, 47(9):1102–14. 45
- [Pronovost, 2005] Pronovost, G. (2005). *Temps sociaux et pratiques culturelles*. PUQ. 53
- [Prouteau et Wolff, 2002] Prouteau, L. et Wolff, F.-C. (2002). La participation associative au regard des temps sociaux. *Economie et Statistiques*, 352-353(352-353):57–80. 207
- [Prouteau et Wolff, 2005] Prouteau, L. et Wolff, F.-C. (2005). Donner son temps : les bénévoles dans la vie associative. *Economie et Statistiques*, 372. 206
- [Rekom et Wierenga, 2002] Rekom, J. V. et Wierenga, B. (2002). Means-end relations : hierarchies or networks? an inquiry into the (a)symmetry of means-end relations. Rapport technique, Erasmus research institute of management. 98
- [Rennard, 2002] Rennard, J.-P. (2002). *Vie Artificielle - Où la biologie rencontre l'informatique*. Vuibert, Paris. 14
- [Reppel *et al.*, 2006] Reppel, A. E., Szmigin, I. et Gruber, T. (2006). The ipod phenomenon : identifying a market leader's secrets through qualitative marketing research. *Journal of Product and Brand Management*, 15(4):239–249. 97
- [Reynolds *et al.*, 1995] Reynolds, T. J., Gengler, C. E. et Howard, D. J. (1995). A means-end analysis of brand persuasion through advertising. *International Journal of Research in Marketing*, 12:257–266. 99
- [Reynolds et Gutman, 1984] Reynolds, T. J. et Gutman, J. (1984). Advertising is image management. journal of advertising research. *Journal of Advertising Research*, pages 27–36. 99
- [Reynolds et Gutman, 1988] Reynolds, T. J. et Gutman, J. (1988). Laddering theory, method, analysis, and interpretation. *Journal of Advertising Research*, pages 11–31. 95, 96, 97, 99
- [Robert-Bobée *et al.*, 2006] Robert-Bobée, I., Rendall, M., Couet, C., Lappegard, T., Rønsen, M. et Smallwood, S. (2006). Données sociales - la société française, chapitre Âge au premier enfant et niveau d'études : une analyse comparée entre la France, la Grande-Bretagne et la Norvège, pages 69–76. In [INSEE, 2006]. 206
- [Robins *et al.*, 2001] Robins, G., Elliott, P. et Pattison, P. (2001). Network models for social selection processes. *Social Networks*, 23:1–30. 194

- [Robinson et Lakhani, 1975] Robinson, B. et Lakhani, C. (1975). Dynamic pricing models for new product planning. *Management Science*, 10:1113–1122. 66
- [Rogers et Shoemaker, 1971] Rogers, E. et Shoemaker, F. (1971). *Communication of innovations : a cross-cultural approach*. Free Press. 38
- [Rogers, 1962] Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of Innovations*. New York : Free Press, 1th edition édition. 5, 64
- [Rogers, 2003] Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*. New York : Free Press, 5th édition. 6, 36, 37, 38, 42, 43, 45, 47, 48, 59, 60, 64, 65, 67, 85, 126, 159, 160, 181
- [Rosnow, 1988] Rosnow, R. (1988). Rumor as Communication : A Contextualist Approach. *The Journal of Communication*, 38(1):12–28. 52
- [Rosnow, 1991] Rosnow, R. (1991). Inside rumor : A personal journey. *American Psychologist*, 46(5):484–96. 52
- [Rosnow, 2001] Rosnow, R. L. (2001). *Behaving badly : Aversive behaviors in interpersonal relationships*, chapitre Rumor and gossip in interpersonal interaction and beyond : A social exchange perspective, pages 203–232. Washington, DC : American Psychological Association. 52
- [Rouchier, 2000] Rouchier, J. (2000). *La Confiance à travers l'échange. Accès aux pâturages au Nord-Cameroun et échanges non-marchands : des simulations dans des Systèmes Multi-Agents*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans. 24
- [Rouchier et al., 2001] Rouchier, J., Bousquet, F., Requier-Desjardins, M. et Antona, M. (2001). A multi-agent model for describing transhumance in North Cameroon : Comparison of different rationality to develop a routine. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(3-4):527–559. 21
- [Rutenberg et Watkins, 1997] Rutenberg, N. et Watkins, S. (1997). The buzz outside the clinics : conversations and contraception in Nyanza Province, Kenya. *Studies in Family Planning*, 28(4):290–307. 34, 35, 48, 50, 51, 53, 207
- [Ryan et Gross, 1943] Ryan, B. et Gross, N. (1943). The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities. *Rural Sociology*, 8(1):15–24. 41
- [Sargent et Dalton, 2001] Sargent, J. et Dalton, M. (2001). Does Parental Disapproval of Smoking Prevent Adolescents From Becoming Established Smokers? *Pediatrics*, 108(6):1256–1262. 58
- [Sargent, 1991] Sargent, R. (1991). Simulation model verification and validation. *In Proceedings of the 23rd conference on Winter simulation*, pages 37–47. IEEE Computer Society Washington, DC, USA. 22
- [Sargent, 2005] Sargent, R. (2005). Verification and validation of simulation models. *In Proceedings of the Winter Simulation Conference*. 15, 22, 24
- [Sawyer et Dickson, 1984] Sawyer, A. et Dickson, P. (1984). *Research on Sales Promotion : Collected Papers*, chapitre Psychological Perspectives on Consumer Response to Sales Promotion, pages 1–21. Marketing Science Insititue, Cambrige, MA. 47

- [Schelling, 1971] Schelling, T. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1:143–186. 16
- [Shafer, 1976] Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*. Princeton Univ. Press. Princeton, NJ. 93
- [Sharif et Ramanathan, 1981] Sharif, M. et Ramanathan, K. (1981). Binomial innovation diffusion models with dynamic potential adopter population. *Technological Forecasting and Social Change*, 20(1):63–87. 66
- [Simon, 1982] Simon, H. A. (1982). *Models of bounded rationality*. The MIT Press. 51
- [Smets, 1992] Smets, P. (1992). The nature of the unnormalized beliefs encountered in the transferable belief model. In Dubois, D., Wellmann, M., D’Ambrosio, B. et Smets, P., éditeurs : *Proceedings of the 8th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 292–297. Morgan Kaufmann Publ., San Mateo, California. 93
- [Smets, 1994] Smets, P. (1994). *Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence*, chapitre What is Dempster-Shafer’s model?, pages 5–34. Wiley. 93
- [Smets, 1999] Smets, P. (1999). Practical uses of belief functions. In Laskey, K. B. et Prade, H., éditeurs : *Uncertainty in Artificial Intelligence 15. UAI99*, pages 612–621. 93
- [Smets et Kennes, 1994] Smets, P. et Kennes, R. (1994). The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 66:191–234. 93
- [Smith et Sorensen, 2000] Smith, L. et Sorensen, P. (2000). Pathological Outcomes Of Observational Learning. *Econometrica*, 68(2):371–398. 69
- [Spradley, 1979] Spradley, J. (1979). *The ethnographic interview*. New York : Holt, Rinehart & Winston. 98
- [Steenkamp et Trijp, 1997] Steenkamp, J. et Trijp, H. V. (1997). Attribute elicitation in marketing research : a comparison of three procedures. *Marketing Letters*, 8:153–165. 99
- [Steve Duck *et al.*, 1991] Steve Duck, D., Starch, A., Rutt, D. J., Hoy, M. et Strejc, H. H. (1991). Some evident truths about conversations in everyday relationships all communications are not created equal. *Human Communication Research*, 18(2):228–267. 54
- [Sun, 2005] Sun, R., éditeur (2005). *Cognition and Multi-Agent Interaction : From Cognitive Modeling to Social Simulation*. Rensselaer Polytechnic Institute, New York. 20
- [Sundaram *et al.*, 1998] Sundaram, D., Mitra, K. et Webster, C. (1998). Word-of-Mouth Communications : A Motivational Analysis. *Advances in Consumer Research*, 25(1):527–531. 54
- [Tarde, 1895] Tarde, G. (1895). *Les lois de l’imitation*. 2nd édition. 5

- [Thaurel-Richard et Thomas, 2006] Thaurel-Richard, M. et Thomas, F. (2006). *Données sociales - la société française*, chapitre Typologie des collèges publics, pages 147–156. In [INSEE, 2006]. 207
- [Thiriote, 2008] Thiriote, S. (2008). Resultats d'expérience : test du protocole de laddering étendu. Application au STB, cadre photo numérique, et iPhone. Rapport technique, France Télécom - Orange Labs. 116
- [Thiriote et Kant, 2006] Thiriote, S. et Kant, J.-D. (2006). A multi-agent cognitive framework to model human decision making under bounded rationality. In *IAREP-SABE 2006*. 136
- [Thiriote et Kant, 2007a] Thiriote, S. et Kant, J.-D. (2007a). Representing knowledge as associative networks to simulate diffusion of innovations. In Amblard, F., éditeur : *Proceedings of ESSA '07, the 4th Conference of the European Social Simulation Association, September 10th-14th, 2007, Toulouse, France*, pages 193–204. 240
- [Thiriote et Kant, 2007b] Thiriote, S. et Kant, J.-D. (2007b). Représenter les croyances par des réseaux associatifs pour simuler la diffusion d'innovations. In *JFSMA 2007*. 240
- [Thiriote et Kant, 2008a] Thiriote, S. et Kant, J.-D. (2008a). Generate country-scale networks of interaction from scattered statistics. In *The Fifth Conference of the European Social Simulation Association, Brescia, Italy*. 240
- [Thiriote et Kant, 2008b] Thiriote, S. et Kant, J.-D. (2008b). Reproducing stylized facts of word-of-mouth with a naturalistic multi-agent model. In *Second World Congress on Social Simulation*. 240
- [Thiriote et Kant, 2008c] Thiriote, S. et Kant, J.-D. (2008c). Using associative networks to represent adopters' beliefs in a multiagent model of innovation diffusion. *Advances in Complex Systems*, 11(2):261–272. 240
- [Tigert et Farivar, 1981] Tigert, D. et Farivar, B. (1981). The Bass New Product Growth Model : A Sensitivity Analysis for a High Technology Product. *Journal of Marketing*, 45(5):81–90. 66
- [Toffoli et Margolus, 1987] Toffoli, T. et Margolus, N. (1987). *Cellular Automata Machines - A New Environment for Modelling*. Cambridge, MA : The M.I.T. Press. 20, 70
- [Tolman, 1932] Tolman, E. (1932). *Purposive behaviour in animals and men*. Century, New York. 95
- [Treuil et al., 2008] Treuil, J.-P., Drogoul, A. et Zucker, J.-D. (2008). *Modélisation et simulation à base d'agents - Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod/IRD. 18, 20
- [Tulving, 1972] Tulving, E. (1972). *Organization of memory*, chapitre Episodic and semantic memory, pages 381–403. New York : Academic Press. 94

- [Urbig et Lorenz, 2004] Urbig, D. et Lorenz, J. (2004). Communication regimes in opinion dynamics : Changing the number of communicating agents. *In Proceedings of the Second Conference of the European Social Simulation Association (ESSA), Valladolid, Spain, September.* 72
- [Valdelièvre, 2001] Valdelièvre, H. (2001). Un tiers des étudiants ont une activité rémunérée au cours de l'année. *Insee Première*, 795. 206
- [Valente, 1993] Valente, T. (1993). Diffusion of Innovations and Policy Decision-Making. *The Journal of Communication*, 43(1):30–45. 71
- [Valente, 1995a] Valente, T. (1995a). *Network Models of the Diffusion of Innovations.* Cresskill NJ : Hampton Press. 71
- [Valente, 2005] Valente, T. (2005). *Models and Methods in Social Network Analysis*, chapitre Network Models and Methods for Studying the Diffusion of Innovations, pages 98–116. Cambridge University Press. 70, 71
- [Valente, 1995b] Valente, T. W. (1995b). *Network models of the diffusion of information.* Hampton Press Inc., Cresskill : NJ. 70
- [Vallacher et Nowak, 1994] Vallacher, R. R. et Nowak, A. (1994). *Dynamical systems in social psychology*, chapitre The chaos in social psychology. San Diego : Academic Press, Inc. 84
- [Van den Bulte, 2002] Van den Bulte, C. (2002). The Bass Diffusion Model is not a Mixture of Innovators and Imitators. Rapport technique, Working Paper at the The Wharton School, USA. 65
- [Van den Bulte et Lilien, 2002] Van den Bulte, C. et Lilien, G. (2002). Two-stage partial observability models of innovation adoption. *In INFORMS Marketing Science Conference, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, June*, pages 27–30. 67
- [Vanderschelden, 2006] Vanderschelden, M. (2006). *Données sociales - la société française*, chapitre Position sociale et choix du conjoint : des différences marquées entre hommes et femmes, pages 33–42. *In [INSEE, 2006], 2006 édition.* 206
- [Vindigni et al., 2002] Vindigni, G., Janssen, M. et Jager, W. (2002). Organic food consumption. *British Food Journal*, 104(8):624–642. 82
- [von Randow, 2003] von Randow, G. (2003). When the centre becomes radical. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(1). 28
- [Wagner et al., 2002] Wagner, W., Kronberger, N. et Seifert, F. (2002). Collective symbolic coping with new technology : Knowledge, images and public discourse. *British Journal of Social Psychology*, 41:323–343. 60
- [Wasserman et Faust, 1994a] Wasserman, S. et Faust, K. (1994a). *Social network analysis, methods and applications.* Cambridge : Cambridge University Press. 21, 59, 75, 76, 99, 182, 194, 198

- [Wasserman et Faust, 1994b] Wasserman, S. et Faust, K. (1994b). *Social network analysis, methods and applications*, chapitre Social Network Analysis in the Social and Behavioral Sciences, pages 3–25. Cambridge : Cambridge University Press. 194
- [Watkins *et al.*, 1995a] Watkins, S., Rutenberg, N. et Green, S. (1995a). Diffusion and debate : Controversy about reproductive change in Nyanza Province, Kenya. *Annual Meeting of the Population Association of America*, pages 6–8. 40, 127, 207
- [Watkins, 2000] Watkins, S. C. (2000). Local and foreign models of reproduction in nyanza province, kenya, 1930-1998. *Population and Development Review*, 26(4):725–759. 33, 34, 207
- [Watkins *et al.*, 1995b] Watkins, S. C., Rutenberg, N., Green, S., Onoko, C., White, K., Franklin, N. et Clark, S. (1995b). 'circle no bicycle' or everything you should want to know about survey data but were afraid to ask. SNP Working Paper No.1, Philadelphia : University of Pennsylvania. 207
- [Watts *et al.*, 2002] Watts, D. J., Dodds, P. S. et Newman, M. E. J. (2002). Identity and search in social networks. *Science*, 296:13021305. 200
- [Watts *et al.*, 2007] Watts, D. J., Peretti, J. et Frumin, M. (2007). Viral marketing for the real world. Rapport technique, Collective Dynamics Group, Columbia University. 234
- [Watts et Strogatz, 1998] Watts, D. J. et Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684):440–442. 200
- [Weigts *et al.*, 1993] Weigts, W., Widdershoven, G., Kok, G. et Tomlow, P. (1993). Patients' information seeking actions and physicians' responses in gynaecological consultations. *Qualitative Health Research*, 3:398–429. 46
- [Weinstein, 1982] Weinstein, N. (1982). Unrealistic optimism about susceptibility to health problems. *Journal of Behavioral Medicine*, 5(4):441–460. 51
- [Weisbuch, 1991] Weisbuch, G. (1991). *Complex systems dynamics*. Santa Fe Institute Publications. 70
- [Weisbuch, 2004] Weisbuch, G. (2004). Bounded confidence and social networks. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 38(2):339–343. 72
- [Weisbuch et Boudjema, 1999] Weisbuch, G. et Boudjema, G. (1999). Dynamical aspects in the adoption of agri-environmental measures. *Adv. Complex Systems*, 2:11–36. 70, 71
- [Weisbuch *et al.*, 2005] Weisbuch, G., Deffuant, G. et Amblard, F. (2005). Persuasion dynamics. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 353(1):555–575. 71
- [Weisbuch *et al.*, 2002] Weisbuch, G., Deffuant, G., Amblard, F. et Nadal, J.-P. (2002). Meet, discuss, and segregate! *Complexity*, 7(3):55–63. 71, 72

- [Weiss, 1997] Weiss, Y. (1997). Belief propagation and revision in networks with loops. Rapport technique AIM-1616CBCL-155, MIT. 222
- [Wellin, 1955] Wellin, E. (1955). *Health, Culture and Community*, chapitre Boiling water in a Peruvian Town, pages 71–103. New York : Russel Sage Foundation. 6
- [Westbrook, 1987] Westbrook, R. (1987). Product/consumption-based affective responses and postpurchase process. *Journal of Marketing Research*, 24(3):258–270. 51, 59
- [Wickens, 1982] Wickens, T. D. (1982). *Models for Behavior : Stochastic Processes in Psychology*. San Francisco : W.H. Freeman. 19
- [Wicker, 1969] Wicker, A. (1969). Attitudes versus actions : The relationship of verbal and overt behavioral responses to attitude objects. *Journal of Social Issues*, 25:41–47. 48
- [Williams et Rott, 2001] Williams, M.-A. et Rott, H., éditeurs (2001). *Frontiers in Belief Revision*, volume 22. Kluwer Academic Publishers. 106
- [Wilson, 2000a] Wilson, R. (2000a). The Six Simple Principles of Viral Marketing. *Web Marketing Today*, 70(1). 232
- [Wilson, 2000b] Wilson, R. F. (2000b). *Demystifying Viral Marketing*. [www.wilsoninternet.com/ebooks](http://www.wilsoninternet.com/ebooks). 40
- [Wolfram, 1984] Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311:419–424. 70
- [Wolfram, 2002] Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc. 14
- [WOMMA's Research and Metrics Council, 2005] WOMMA's Research and Metrics Council (2005). Womma terminology framework. Rapport technique, Word of Mouth Marketing Association. 51
- [Woodall, 2003] Woodall, T. (2003). Conceptualising "value for the customer" : An attributional, structural and dispositional analysis. *Academy of Marketing Science Review*, 12. 46
- [Wooldridge, 2002] Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. New York : J. Wiley. 17, 18
- [Wozniak, 1984] Wozniak, G. (1984). The Adoption of Interrelated Innovations : A Human Capital Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 66(1):70–79. 188
- [Wu et al., 2004] Wu, F., Huberman, B. A., Adamic, L. A. et Tyler, J. R. (2004). Information flow in social groups. *Physica A : Statistical and Theoretical Physics*, 337:327–335. 76
- [Wuillemin, 2008] Wuillemin, P.-H. (2008). Communication privée. 228
- [Yin, 2003] Yin, R. (2003). *Case Study Research : Design and Methods*. Sage Publications Inc, 3d edition édition. 23

- [Young, 1999] Young, H. (1999). *Diffusion in Social Networks*. Numéro 2. available at <http://ideas.repec.org/p/fth/brooki/2.html>. 70
- [Young, 2002] Young, H. P. (2002). The diffusion of innovations in social networks. Economics Working Paper Archive 437, The Johns Hopkins University, Department of Economics. 70
- [Young, 2005] Young, H. P. (2005). The spread of innovations through social learning. CSED Working Paper 43, Johns Hopkins University, University of Oxford. 70
- [Young, 1998] Young, P. (1998). *Individual Strategy and social structure*. Princeton University Press. 71
- [Zanette, 2002] Zanette, D. (2002). Dynamics of rumor propagation on small-world networks. *Physical Review E*, 65(4):41908. 75, 200
- [Zanna et Fazio, 1982] Zanna, M. P. et Fazio, R. (1982). *Consistency in social behavior : The Ontario Symposium*, chapitre The attitude-behavior relation : Moving towards a third generation of research, pages 282–301. Hillsdale, N.J : Erlbaum. 48
- [Zsombok et Klein, 1996] Zsombok, C. E. et Klein, G. A., éditeurs (1996). *Naturalistic Decision Making*. Lawrence Erlbaum Associates. 51