



**HAL**  
open science

## Simuler la baisse de fécondité indienne

Yoann Doignon

► **To cite this version:**

| Yoann Doignon. Simuler la baisse de fécondité indienne. Géographie. 2010. dumas-00776119

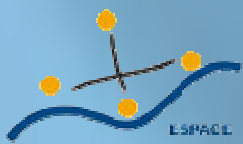
**HAL Id: dumas-00776119**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00776119>**

Submitted on 15 Jan 2013

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

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



Master 1 Géographie - Spécialité "Structures  
et Dynamiques Spatiales"

2010

Yoann Doignon



**Simuler la baisse  
de fécondité indienne**

Sous la direction de Sébastien Oliveau, Maître de Conférence  
Université de Provence Aix-Marseille 1

Membres du jury :

- \* Vincent LAPERRIERE, Maître de conférence, Université de Provence
- \* Christophe Z. GUILMOTO, Directeur de recherche, IRD
- \* Sébastien OLIVEAU, Maître de conférence, Université de Provence



## Simuler la baisse de fécondité en Inde

« N'accuse pas le puits d'être trop profond :  
c'est ta corde qui est trop courte. »  
Proverbe indien

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

## **Remerciements**

En premier lieu, je me dois de remercier Sébastien Oliveau pour m'avoir orienté sur ce sujet, pour sa disponibilité et son dévouement. Ses conseils et ses pistes de réflexions m'ont été d'une grande aide.

Mes pensées vont ensuite vers Frédéric Audard, dont la présence, la disponibilité ont été remarquables.

Je remercie également Christophe Guilmoto et Vincent Laperrière de leur honorable présence.

Je ne peux pas oublier Juliette Rouchier, qui m'a initié aux SMA et éclairé tout au long de l'année sur le chemin de la programmation et l'exploitation de mon modèle.

Il serait injuste d'oublier Joël Quercy, mon ami, qui m'a conseillé, et aidé dans de multiples tâches. Cette année nous a permis de tisser des liens d'amitié et de complicité uniques.

Je suis reconnaissant envers tous les membres de l'UMR ESPACE d'Aix-en-Provence, et plus particulièrement Lionel, Guillaume, Séverin, Marion, Camille et Elodie pour les moments de détente et les discussions durant les moments de stress.

Un grand merci également à ceux qui m'ont témoigné un soutien indéfectible : ma famille et mon amie Noëlie.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde



## **Sommaire**

Introduction .....	10
Chapitre 1 - Phase heuristique : étude des théories et concepts du sujet .....	14
I) La transition démographique .....	14
II) Le concept de diffusion spatiale de l'innovation .....	23
III) La baisse de fécondité en Inde : une thématique étudiée depuis plus de 25 ans .....	35
Chapitre 2 : La création d'un modèle Multi-Agents .....	46
I) Les Systèmes multi-agents (SMA) .....	46
II) Construction et explications d'un modèle individu-centré .....	62
III) Les déclinaisons du modèle de base .....	73
Chapitre 3 : Résultats et interprétations .....	75
I) Quelles simulations effectuer ? Que mesurer ? .....	75
II) Etudes quantitatives des résultats .....	80
III) Les formes spatiales .....	97
Conclusion.....	119
Bibliographie .....	123
Annexes .....	129
Table des annexes.....	151
Table des figures et des tableaux.....	153
Table des matières .....	156

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

## **Introduction**

La transition démographique reste une théorie globalement admise par tous les chercheurs. Elle fut étudiée par Adolphe Landry, qui la qualifie de « révolution démographique » de par le bouleversement des structures établies, comme la transformation des structures familiales ou le vieillissement de la population. Ce phénomène se divise en deux étapes décalées dans le temps : une baisse de la mortalité d'une part et une baisse de fécondité d'autre part. M.L. Lévy la caractérise de « passage (...) d'un régime traditionnel d'équilibre démographique à mortalité et fécondité fortes, à un régime moderne d'équilibre, à mortalité et fécondité basses » [Lévy M.L., 1986].

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'Europe, plus précisément la France et le bassin parisien, est le premier espace à être touché par la transition démographique. Avant cela, le taux élevé de mortalité (et notamment infantile) obligeait les individus à avoir une haute fécondité pour voir survivre un certain nombre de leurs enfants. Les progrès dans les domaines de la médecine entraînent une diminution de la mortalité infantile et de la mortalité en général. En conséquence, les nouveau-nés survivent de plus en plus dans les premières années de leur existence. Cette évolution de la mortalité constitue la première étape de la transition démographique : la baisse de la mortalité. De fait, les individus n'ont plus besoin d'avoir un taux de fécondité élevé pour équilibrer un taux de mortalité élevé, du fait que ce dernier diminue. Cependant, un certain temps reste nécessaire afin que les individus s'en rendent compte. Ceci est la raison pour laquelle la baisse de fécondité n'intervient que de manière décalée temporellement par rapport à la baisse de mortalité.

La transition démographique s'opère dans tous les pays au cours du XX<sup>e</sup> siècle, mais surtout dans la deuxième moitié de celui-ci. Actuellement, 81 % de la population mondiale se situe dans un pays ayant une fécondité inférieure à trois enfants par femme. Seules l'Afrique centrale, l'Afrique de l'Ouest et de l'Est possèdent une fécondité supérieure à cinq enfants par femme. Mais de façon plus symbolique, il faut savoir que 9 % de la population mondiale vit dans un pays où la transition démographique n'a pas encore commencé, ce qui tendrait à montrer l'ampleur géographique du phénomène. Des études [F. Héran, 2005 ; Gilles Pison et Sabine Belloc, 2005] montrent l'intérêt des études démographiques sur la transition démographique. De nos jours, de nombreux pays demeurent sous le seuil de remplacement, c'est-à-dire un accroissement naturel de 2,1 enfants par femme. Ce niveau représente le taux pour lequel une population ne diminue pas et n'augmente pas non plus.

Des modèles de projections prouvent, qu'à long terme, tout écart à ce niveau de remplacement aurait des conséquences insurmontables. En effet, en prolongeant la situation actuelle jusqu'à 2030, les espaces où la fécondité demeure en dessous du seuil de remplacement seront dépeuplés par rapport aux espaces à fécondité supérieure au niveau de remplacement, où la population « explosera ». La seule solution raisonnable à long

terme reste l'équilibre démographique, à savoir le seuil de remplacement. L'étude de la transition démographique et de ses conséquences permet de mieux comprendre le phénomène afin d'améliorer les réactions à avoir face au futur problème émergent. Dans ce but, s'attarder sur le cas de l'Inde se révèle intéressant du fait qu'il regroupe quasiment 1/6<sup>e</sup> de la population mondiale, mais aussi parce que son évolution concerne le monde entier de par son poids démographique.

La transition commence en Inde à partir de 1921, très certainement en retard par rapport à la situation européenne, du fait probablement de la colonisation britannique. La mortalité diminue car les maladies infectieuses et les crises démographiques disparaissent progressivement. Après l'Indépendance (1947), les gouvernements indiens se préoccupent de la fécondité, parce qu'elle représente un problème futur pour la gestion du pays. Ainsi, différentes politiques de contrôle des naissances sont menées, des plus extrêmes aux plus modérées. L'Inde se caractérise en premier lieu par sa forte hétérogénéité. En conséquence, la situation démographique au sein du territoire indien reste bien loin d'être homogène. D'un côté se placent les Etats du « Bimaru », avec un taux de fécondité élevé, et marqués par un fort traditionalisme. D'un autre côté, les Etats du Sud de l'Inde, possédant une situation démographique proche de certains pays européens. Cette diversité situationnelle reste la principale caractéristique de l'Inde.

La baisse de la fécondité indienne fut étudiée pendant presque 15 ans par Christophe Guilmoto. Ses apports sont considérables pour mieux comprendre le phénomène, la situation indienne mais aussi les conséquences induites par la transition démographique. Pour être concis, il s'agit principalement d'un relâchement des normes traditionnelles et de la surmortalité féminine. C.Z. Guilmoto effectue des analyses statistiques à l'échelle régionale, puis à l'échelle du district. Des déterminants de la fécondité sont trouvés, et d'autres sont écartés, comme les variables économiques par exemple. Il expose et tente de donner des éléments d'explications sur les différentiels régionaux. Mais l'apport essentiel de ses travaux reste l'identification, à l'échelle de l'Inde, de la baisse de fécondité en tant que diffusion de l'innovation. De ce fait, le comportement démographique tentant de contrôler les naissances et d'avoir moins d'enfants compose une innovation sociale. Il s'agirait malgré tout d'une diffusion particulière de par l'origine périphérique de l'innovation sociale (Inde du Sud).

Malgré cela, les études de C.Z. Guilmoto demeurent à l'échelle agrégée. Grâce à ses traitements statistiques, il apporte de nombreux éclaircissements sur la baisse de fécondité indienne. Cependant, pour étudier la même thématique, et tenter de fournir de nouveaux éléments, l'étude doit changer de point de vue. Si les prédécesseurs se sont essentiellement concentrés sur une approche agrégée, l'échelle individu-centrée apparaît très intéressante afin de renouveler le point de vue.

En effet, un taux de fécondité d'une région ou d'un district dépend étroitement du nombre d'enfants individuels. Fondamentalement, ce sont les comportements individuels qui déterminent les taux de fécondité à l'échelle agrégée. Ce point essentiel justifie alors que

l'on se place à l'échelle individu-centrée pour comprendre un peu mieux la baisse de fécondité en Inde. Pour traiter cela, l'utilisation des Systèmes Multi-Agents apparaît pertinente. Eric Daudé les expose comme un outil privilégié pour étudier les thématiques de diffusion [Daudé E., 2003]. Avec ce type d'outils, la création d'un modèle s'avère nécessaire.

Quand on parle de modélisation, on est obligé d'inclure une simplification du réel, comme le précise P. Haggett en la définissant comme une « représentation formalisée et épurée du réel ». Il n'est pas question de reproduire la réalité, par conséquent des choix doivent être faits puisque le modélisateur simplifie : il est donc nécessaire de choisir ce qu'il faut omettre et inclure dans le modèle. Mais les limites informatiques actuelles auront sûrement un impact sur la modélisation de la baisse de fécondité en Inde. De ce modèle, seront tirés des résultats qu'il conviendra d'interpréter et d'illustrer par des formes spatiales observables.

Mais, une question se pose. Celle de savoir si se placer à l'échelle individu-centrée permettrait de simuler une diffusion spatiale de l'innovation à une échelle plus désagrégée, ce qui faciliterait la compréhension des mécanismes et processus.

Pour cela, l'étude du concept de diffusion spatiale doit être plus approfondie, tout comme la théorie de la transition démographique. De même, comme dans toute démarche scientifique, il sera nécessaire de s'attarder sur les études antérieures, faites sur les mêmes thématiques. Cela fera donc l'objet d'un premier chapitre.

Il serait également nécessaire d'analyser l'émergence des Systèmes Multi-Agents au sein des sciences en général, et en géographie en particulier. Cette étude permettra d'expliquer plus aisément le modèle mis en place dans ce mémoire. Ces axes de réflexions seront donc l'objet d'un deuxième chapitre.

Le modèle créé sera exploité pour réunir des résultats quantitatifs mais aussi qualitatifs. En effet, nous chercherons à déterminer les variables les plus influentes concernant la diffusion de façon statistique. Par contre, les formes spatiales devront être appréciées de manière plus qualitative. Ces tâches seront donc traitées dans un troisième et dernier chapitre.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

# **Chapitre 1 - Phase heuristique : étude des théories et concepts du sujet**

## **I) La transition démographique**

Désignée comme « la révolution démographique » par Adolphe Landry en 1934<sup>1</sup>, la transition démographique est une théorie admise par tous les démographes et géographes, même si certains aspects restent soumis à des points de vue différents. Dans un premier temps, nous exposerons la théorie de la transition démographique, pour ensuite analyser la progression de ce phénomène dans le monde, ainsi que ses conséquences. Pour terminer, nous analyserons la situation démographique indienne afin d'observer l'évolution et les conséquences du phénomène démographique à l'échelle de ce pays.

### **A) La transition démographique, une théorie admise**

La transition démographique est définie par M.L. Lévy comme « le passage (...) d'un régime traditionnel d'équilibre démographique à mortalité et fécondité fortes, à un régime moderne d'équilibre, à mortalité et fécondité basses » [Lévy M.L., 1986]. Ce changement s'opère de manière spécifique (voir figure 1). Premièrement, la mortalité baisse alors que la fécondité reste haute. De façon décalée, la fécondité diminue à son tour pour atteindre finalement le taux de mortalité.

Lors de la première étape, l'accroissement naturel augmente fortement, pour atteindre son maximum lorsque la fécondité commence à s'incliner. Evidemment, celui-ci diminue au fur et à mesure que le taux de fécondité baisse. Un accroissement naturel fort engendre un puissant accroissement de population. Cette augmentation dépend de la coordination des baisses de la mortalité et de la fécondité. La transition démographique demeure un processus universel [Lévy M.L., 1986] car la théorie s'applique aux pays où la transition est déjà terminée, mais également aux pays avec une transition en cours et pas terminée. Le point commun à tous les types de transition reste « l'antériorité nécessaire de la baisse de la mortalité »<sup>2</sup>.

L'augmentation de la population peut modifier de manière radicale la structure d'un pays. Tout dépend de la durée de la transition : plus elle est longue, plus la population a tendance à augmenter. Michel-Louis Lévy détermine « le multiplicateur de transition » [Lévy M.L., 1986]. Il s'agit du nombre par lequel la population est multipliée entre le début et la fin du

---

<sup>1</sup> LANDRY A. (1934), *La révolution démographique. Etudes et essais sur les problèmes de la population*. Réédité à Paris, INED, 1982

<sup>2</sup> CHESNAIS J.C. (1986), « La transition démographique. Etapes, formes, implications économiques. Etudes de séries temporelles (1720-1984) relatives à 67 pays », INED coll. *Travaux et documents de recherche*, cahier n°113, 1986, 580 p.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

phénomène. Ce multiplicateur est très variable selon le pays considéré : il est inférieur à deux pour l'Irlande, de quatre à cinq pour l'Inde et de quinze ou plus pour le Kenya. De manière générale, plus la transition est récente, plus elle est courte et haute.

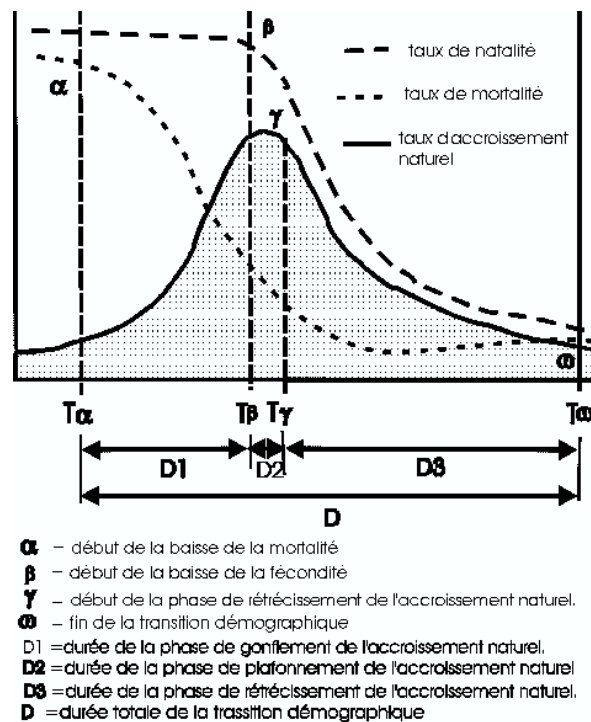


Figure 1 : Le déroulement de la transition démographique

Source : CHESNAIS (J.C.), La démographie, Paris, PUF, 1990, QSJ n°2546, p.57

Mais il faut bien comprendre que ce processus ne s'est pas déclenché de la même manière et au même moment dans tous les pays du monde. Il apparut dans un premier temps en Europe et en Amérique du Nord, puis progressivement dans le reste du monde.

## **B) La baisse de fécondité à l'échelle mondiale**

### **1) Le point de vue sociologique de la théorie**

« On admet en général que tout groupe humain, suffisamment nombreux pour que le calcul de moyennes ait un sens, est biologiquement capable d'une fécondité de 15 enfants par femme » [Gilles Pison et Sabine Belloc, 2005 : p.2]. Malgré ce constat, il reste rare de trouver un groupe social avec une fécondité supérieure à sept enfants par femme. Par conséquent, la natalité a quasiment toujours été limitée notamment par le mariage ou par l'allaitement au sein, allongeant le temps entre deux enfants. Par analogie, la vie humaine possède un âge limite de 120 ans, mais en moyenne, l'homme dans le monde vit jusqu'à 65 ans. Encore faut-il préciser que cette moyenne est obtenue grâce aux progrès socio-économiques d'une part, et de la médecine d'autre part. Dans un régime démographique ancien, la durée de vie moyenne se situait entre 20 et 25 ans, notamment à cause d'une très forte mortalité infantile.



Ce type de régime démographique se caractérise par des crises de mortalité ayant par exemple pour cause les épidémies et les maladies infectieuses. Afin d'équilibrer cette mortalité, une fécondité de six enfants par femme était nécessaire. Mais à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, les progrès de la médecine et de l'hygiène engendrèrent une diminution de la mortalité, principalement de la mortalité infantile. Il s'agit de la première étape de ladite transition démographique : la natalité devient donc excédentaire par rapport à la mortalité, provoquant une forte augmentation de l'accroissement naturel.

Avec un certain temps de retard, les hommes comprennent que les enfants survivent de mieux en mieux dans leurs premières années de vie. De ce fait, l'idée se répand qu'il n'est plus nécessaire de concevoir beaucoup d'enfants pour assurer la survie de l'espèce. Les hommes adoptent alors un nouveau comportement démographique, ce que nous observâmes tout d'abord en Europe et en Amérique du Nord : la limitation volontaire des naissances. Par ce procédé, la natalité diminue à son tour sous l'effet des progrès de l'éducation et des programmes de planification familiale.

## **2) L'évolution de la baisse de fécondité dans le monde**

Si la baisse de la mortalité intervient en Europe dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, la fécondité, quant à elle, s'atténue sensiblement à l'échelle mondiale dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle [A. Grinblat, 2008]. Effectivement, en 1950, la transition démographique n'a quasiment pas commencé dans les pays en développement, alors qu'aujourd'hui elle est terminée pour la plus grande partie du monde. Avant 1950, le monde est divisé en deux zones : celle où la fécondité est inférieure à 3,5 enfants par femme (pays développés), et celle ayant une fécondité supérieure à 6 enfants par femme (pays en voie de développement).

A la fin des années 1950, une véritable prise de conscience émerge dans le monde académique et politique concernant le fardeau que représente une fécondité élevée pour le développement économique des pays pauvres. En 1974, à la conférence mondiale de Bucarest, la causalité est inversée : le manque de développement provoque une haute fécondité. Ainsi, s'accroît l'aide au développement dans le but de réduire la fécondité. Entre 1970 et 1990, la fécondité diminue de manière conséquente, soit, à titre d'exemple, de 36 % en moyenne dans les pays en voie de développement. La conférence du Caire de 1994 établit un lien entre la fécondité et les conditions de la femme. De la sorte, les programmes internationaux se concentrent alors essentiellement sur cet axe, tout en réduisant les interventions directes sur la contraception.

En moyenne, de 1965 à 2000, les pays en voie de développement ont vu leur fécondité diminuer de 52%. Mais certains pays accusent une baisse de fécondité exceptionnelle, à l'instar de l'Iran, encaissant une baisse de 62 % en 15 ans. Aujourd'hui, seules les régions d'Afrique Centrale, de l'Ouest et de l'Est ont une fécondité supérieure à 5 enfants par femme. Dans le monde, 81 % de la population vit dans un pays dont la fécondité est inférieure à 3 enfants par femme.

Concrètement, seulement 10 % du monde vit dans un pays en transition démographique, et 9% dans un pays où la transition n'a pas débuté.

### 3) Les conséquences de la transition démographique

De la manière dont elle est exposée ci-dessus, la transition démographique possède plusieurs conséquences identifiées.

Comme l'explique Michel-Louis Lévy [Lévy M.L., 1994], elle provoque des « implications « microdémographiques » » : les liens familiaux adoptent de nouvelles formes et significations. Les familles de forme « verticale », où trois à quatre générations coexistent, remplacent graduellement les familles de forme « horizontale », ayant des fratries étendues. Entre 1920 et 1950, il existe de plus en plus de femmes à quatre générations, c'est-à-dire possédant des petits-enfants et au moins un parent vivant [Lévy M.L., 1994]. Cela montre les progrès évident de la médecine sur la mortalité, entraînant le phénomène des familles « verticales ».

La deuxième conséquence est le vieillissement de la population. La fécondité s'affaiblit après la mortalité, mais il arrive qu'elle dépasse le niveau de remplacement, à savoir 2,1 enfants par femme. Il s'agit de la « seconde transition démographique » [Héran F., 2005 : p.2], c'est-à-dire du passage d'un « régime démographique où le retard des unions aboutit à réduire la fécondité et à la conduire sous le seuil de remplacement, tandis que la mortalité continue de reculer » [Héran F., 2005 : p.2]. Ce phénomène est difficilement réversible du fait de sa tendance lourde<sup>3</sup>.

Lorsque Chris Wilson et Gilles Pison établissent le constat que « la moitié des habitants de la planète vivent d'ores et déjà dans des pays où la fécondité est inférieure à 2,1 enfants par femme »<sup>4</sup>, nous comprenons clairement la nécessaire prise en compte de ce phénomène. Un pays maintenant sa fécondité pendant un temps assez long sous la valeur de remplacement verra sa population diminuer et vieillir. « Le vieillissement démographique de l'humanité est encore à venir et sera l'un des changements sociaux les plus importants de ce siècle. » [Gilles Pison et Sabine Belloc, 2005 : p.2].

Dans les pays du Nord, l'évolution des systèmes de retraite reste obligatoire afin que les conditions de vie des futurs retraités soient aussi favorables qu'actuellement, car un faible nombre de travailleurs doit participer aux besoins d'un grand nombre de retraités.

Mais le problème réside dans les pays du Sud. Le vieillissement devrait être plus rapide que celui des pays du Nord, rendant la situation inquiétante lorsque, simultanément, la solidarité familiale s'effrite et de surcroît, aucune solidarité collective sous forme de retraite n'existe. Une population jeune nécessite de forts investissements de la part du gouvernement pour l'éducation et la création de nouveaux emplois. Que la fécondité soit

---

<sup>3</sup> FREJKA T., SARDON J.P., *Childbearing trends and prospects in low-fertility country : a cohort analysis*

<sup>4</sup> WILSON C., PISON G., « La majorité de l'humanité vit dans un pays où la fécondité est basse », *Population & Sociétés*, n° 405, oct. 2004

inférieure au niveau de remplacement ou qu'elle soit élevée, dans les deux cas des conséquences indésirables interviennent.

Finalement, nous saisissons bien la portée que possède la transition démographique sur le devenir d'un pays et les problèmes qu'elle engendre. Ceci justifie alors l'intérêt pour la démographie mondiale de la part des autorités compétentes, comme la Division de la population des Nations Unies. Cette dernière a publié, en 2005, des projections démographiques jusqu'en 2300 comprenant trois scénarii : l'implosion, l'explosion ou l'équilibre [F. Héran, 2005]. Les chercheurs de ces études n'ont pas pour objectif de prévoir l'avenir, mais plutôt d'établir « un examen attentif des dérives démographiques sur le long terme incitant les sociétés à réagir en cas de besoin » [F. Héran, 2005 : p.2], méthodologie très intéressante, correspondant peut-être à une modélisation.

Le premier scénario testé est celui à « fécondité constante » où les taux de fécondité actuels sont fixés pour les trois siècles à venir. Les résultats obtenus sont forcément irréels, car « le moindre écart initial au niveau d'équilibre se creuse à un rythme exponentiel » [F. Héran, 2005 : p.2].

D'autres scénarii sont employés mais à peine plus réalistes que le scénario précédent. Le rapport de l'ONU estime qu'une croissance démographique, même « modérée », relève à long terme de l'invivable pour un pays. Par conséquent, l'ONU émet l'hypothèse selon laquelle la fécondité de tous les pays baissera ou montera vers le niveau de remplacement car l'équilibre reste le seul objectif viable à grande échelle temporelle. [F. Héran, 2005].

Cet équilibre n'est pas accessible de la même façon par tous les pays, car comme expliqué précédemment, les pays du Sud n'ont pas la même fécondité que les pays du Nord. Les premiers doivent réduire leur fécondité élevée, mais pas trop pour ne pas dépasser le niveau de remplacement contrairement aux seconds qui essaient de faire augmenter leur taux de fécondité trop bas afin d'atteindre ce niveau.

Les démographes n'envisagent pas l'hypothèse d'un rattrapage accéléré de rythme uniforme des pays riches par les pays pauvres, même si les pays en voie de développement possèdent la capacité d'intégrer en quelques décennies des comportements de fécondité et de santé que les pays développés ont mis des siècles à acquérir. Cette position tient à l'observation suivante : malgré les formes de vies urbaines, contre toute attente, certains comportements sociaux-culturels résistent, à savoir l'excision, la polygamie, la déscolarisation des filles ou encore les difficultés d'accès à la contraception. Certaines frontières politiques, économiques et culturelles doivent être abolies afin que les pays du Sud rattrapent ceux du Nord.

L'Inde apparaît alors comme un pays remarquable pour l'étude d'une transition démographique de par son hétérogénéité, notamment culturelle, mais également de par sa politique de contrôle des naissances et les différents résultats obtenus. Sachant que l'Inde représente quasiment 1/6<sup>e</sup> de la population mondiale, son devenir démographique concerne le monde entier de par son véritable poids démographique.

## **C) La transition démographique en Inde**

Dans le but d'étudier le grand thème de la transition démographique indienne, nous choisissons de traiter de prime abord une certaine histoire de la fécondité, puis les conséquences de la transition démographique sur la situation de l'Inde.

### **1) L'évolution de la fécondité**

Les études sur l'Inde précoloniale révèlent un volume démographique assimilable à celui de l'Europe. Tandis que la transition démographique européenne commence au XVIII<sup>e</sup> siècle, celle de l'Inde s'effectue avec un décalage d'un siècle, cela étant certainement dû à des conflits survenus avant la suprématie britannique. De plus, la population indienne augmente faiblement entre 1600 et 1900 : l'Inde ne se trouve pas être un pays de forte fécondité, malgré une nuptialité intense et précoce.

L'Inde connut plusieurs vagues migratoires, mais seules deux ont marqué la distribution de la population de manière durable : la pénétration musulmane dans le Nord et le Deccan ; puis les migrations de Télougous de l'Andhra Pradesh vers le Sud. Les mouvements migratoires accomplis à des échelles plus fines, sont, quant à eux, à l'origine des structures de l'actuel système de castes. Avant 1921, date de commencement de la transition démographique, l'Inde connaît un régime démographique ancien, comme défini plus haut, c'est-à-dire marqué par un taux de mortalité et de fécondité fort, et un taux d'accroissement naturel faible et irrégulier. Si le potentiel de croissance démographique est bien réel, les crises démographiques en annulent une grosse partie. Dans ces crises démographiques sont classées les épidémies et les crises de subsistance qui sont les conséquences d'accidents climatiques. Dans certains cas, l'espérance de vie à la naissance peut chuter de 10 ans !

A partir de 1921, le taux moyen de mortalité baisse de manière quasi irrévocable, ce qui augmente par ailleurs l'accroissement naturel. Il est possible d'attribuer cette diminution de la mortalité principalement à la réduction de l'intensité, de l'étendue et de la fréquence des crises démographiques. Effectivement, les Britanniques ont consenti modestement aux efforts dans les infrastructures sanitaires et ne peuvent pas être tenus pour responsables de la disparition des plus graves maladies infectieuses [C.Z. Guilmoto, 1997].

Nonobstant que la fécondité stagne entre 45 et 50 pour mille pendant cette période, elle n'atteint pas son maximum (voir figure 2).

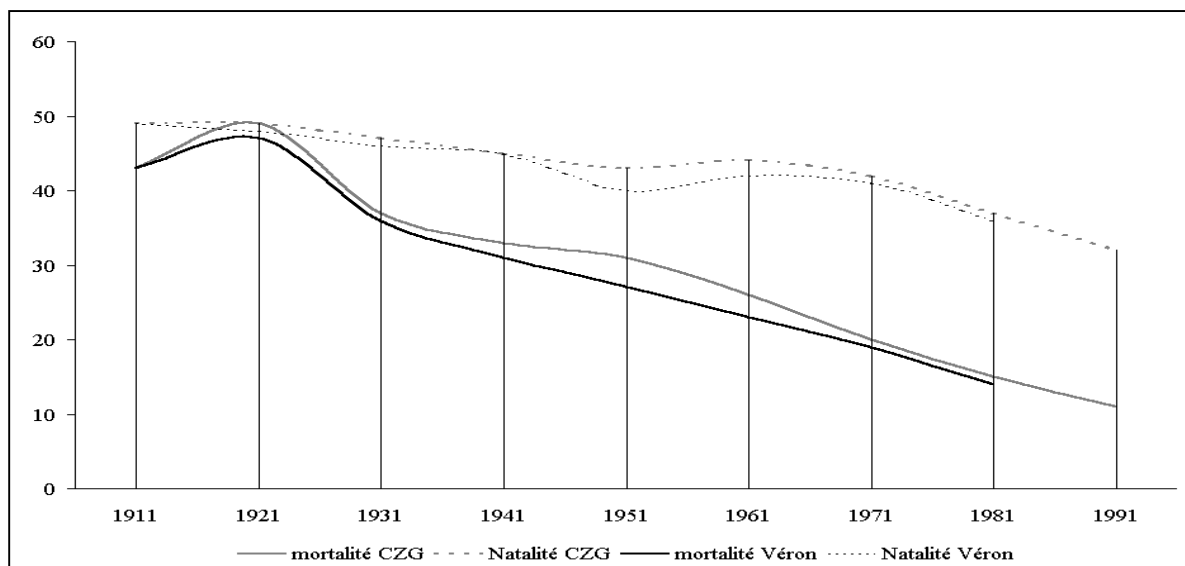


Figure 2 : La transition démographique indienne  
Source : [OLIVEAU S., 1999]

Après l'Indépendance, en 1947, l'Inde fut sûrement le premier pays du Tiers Monde à développer une politique de régulation des naissances, spécialement grâce à une bonne connaissance de la population et à la maturité des dirigeants. « La politique familiale ne s'est concrétisée que vers 1965-1966 avec la mise en place des structures administratives indispensables pour mener cette politique »<sup>5</sup>. Cela montre clairement l'importance que représente la maîtrise de la population aux yeux des politiques indiens. D'ailleurs, *a contrario* de la situation chinoise, la baisse de fécondité s'est exécutée dans un cadre démocratique, déterminant un meilleur ancrage dans la durée [Oliveau S., 1999].

De nombreux facteurs encouragent l'hypothèse d'une relative modération de la fécondité dans l'Inde traditionnelle telles que la durée de l'allaitement (qui retarde la reprise des cycles menstruels), l'interdiction de remariage des femmes de certaines communautés, les pratiques traditionnelles de limitation des naissances (avortement, voire infanticide), la moindre fertilité des femmes de plus de trente ans, etc.

Mais l'augmentation de la fécondité des femmes mariées après l'Indépendance de l'Inde indique un certain relâchement du système des normes traditionnelles, que l'on attribue souvent à la « modernisation » [Guilmoto C.Z., 1997b : p.10]. La croissance indienne se stabilise autour de 2 % entre 1951 et 1991 en raison des fortes variations dans la densité de peuplement, correspondant aux conditions agro climatiques et au mode d'exploitation des espaces ruraux.

Depuis les années 1970, le gouvernement indien a lancé « d'importantes politiques de limitation des naissances » [Guilmoto C.Z., 1997a : p.2] en mettant à disposition des moyens contraceptifs mais aussi en propageant une nouvelle idéologie familiale.

<sup>5</sup> LARDINOIS R., " L'Inde : conjoncture démographique ", *Population*, n°6, 1982, p.1060.

Néanmoins, cette organisation se heurte aux situations extrêmement hétérogènes au sein même de l'Inde.

Cette hétérogénéité se perçoit en premier lieu au niveau de l'inégalité de la mortalité. Depuis la 1<sup>ère</sup> guerre mondiale, l'espérance de vie augmente. Celle-ci suit l'évolution de la transition épidémiologique, c'est-à-dire du passage de la mortalité par maladie infectieuse à la mortalité par maladies dégénératives. Les effets du vieillissement peuvent s'apprécier dans certaines régions où le niveau de mortalité s'approche de celui des pays industrialisés. Nous pouvons citer le Kerala pour illustrer ce type de situation. Mais certaines régions demeurent dans une situation inverse, où le niveau de mortalité demeure très en retrait par rapport aux pays industrialisés. Il s'agit essentiellement des quatre Etats pauvres du Bihar, Madhya Pradesh, Rajasthan et l'Uttar Pradesh (le « Bimaru »). Dans ces régions, les taux de malnutrition restent très élevés, malgré des signes de progrès tels que la vaccination des enfants, le recours de plus en plus fréquent aux infrastructures de santé etc.

Quoiqu'il en soit, l'Inde se caractérise par des écarts significatifs d'espérance de vie à l'échelle des régions. « La société indienne [...] est extrêmement fragmentée et les évolutions démographiques qui se sont répercutées de manière très variable selon les sous-populations concernées ne peuvent être aisément résumées en un article de synthèse » [Guilmoto C.Z., 1997b : p.3].

La transition démographique n'en est pas au même stade d'avancement dans toutes les régions indiennes. En 1991, le Kerala a achevé sa transition, alors qu'à la même date, l'Orissa débute à peine la sienne [Oliveau S., 1999]. Ces différences régionales ont sûrement eu pour cause, en partie, une application différente de la politique indienne de régulation des naissances selon les états. De la même manière, une certaine hétérogénéité s'observe au niveau des religions. La communauté hindoue reste la communauté la moins féconde, malgré l'importance pour les familles de leur progéniture mâle. On peut attribuer ce phénomène à la durée prolongée de l'allaitement ainsi qu'à la moindre fréquence des rapports sexuels due aux multiples interdits.

Malgré ces différences entre régions ou castes, la dimension centrale de la nuptialité indienne demeure primordiale à l'échelle nationale : les femmes qui tardent à se marier sont dévalorisées, et subissent des pressions de la famille, du voisinage, ou encore dans leur travail. Pour une femme, avoir rapidement un ou deux fils après le mariage reste généralement bien perçu par l'entourage. Cependant, dans certaines régions où la transition démographique a été précoce, à l'image du Tamil Nadu ou du Kerala, on juge quand même la haute fécondité comme une pratique déviante [Guilmoto, 2005]. Comme expliqué précédemment, dans certains milieux, les individus n'ont pas encore saisi que les enfants meurent moins. Par conséquent, la fécondité stagne à un taux élevé car on estime que ce n'est qu'en faisant beaucoup d'enfants, qu'on assure un certain nombre de survivants. Pareillement, un enfant non scolarisé, dès son plus jeune âge, symbolise très souvent une source de revenu pour la famille. De nombreuses directives du système reproductif traditionnel visent à encadrer étroitement la reproduction. Nous pouvons citer la promotion

de l'abstinence, l'allaitement prolongé, le tabou sur les remariages féminins ou encore l'interruption précoce de la vie sexuelle [Guilmoto, 1997].

La transition démographique démarre en Inde dès 1921. Ce processus bouleverse la situation démographique du pays, tout comme les mentalités et les normes sociales. Analysons maintenant les conséquences de ce phénomène.

## 2) Les conséquences de la « révolution démographique » en Inde

Si les progrès de la médecine et de la santé ont pour résultats principaux de faire baisser le taux de mortalité, ils possèdent un autre effet de taille : la surmortalité féminine.

Depuis le début du siècle, le différentiel de mortalité dans l'enfance occasionne un abaissement constant du sex-ratio. Dans le monde, le risque de décès chez les hommes est toujours plus élevé que celui des femmes. Mais en Inde, la situation s'inverse. Il s'agit d'un phénomène de modernité, mais également d'un héritage de coutumes ancestrales. De surcroît, la dévalorisation de la fille ne fait qu'amplifier ces pratiques. L'institution de la dot à l'échelle de l'Inde engendre une représentation de la fille comme une charge supplémentaire, contrairement au garçon, qui symbolise une garantie de la situation économique une fois les parents vieux. Il existe donc un traitement différent selon le sexe d'une personne, traitement modifié par les considérations économiques, véritable effet pervers de la modernisation.

Selon C.Z. Guilmoto dans l'article « La population de l'Inde : évolution historique et tendances contemporaines » de 1997, la libéralisation économique de l'Inde entraîne le retrait progressif de l'Etat et l'ouverture aux échanges internationaux, impliquant une contraction de l'unité familiale, principalement sous l'effet de l'érosion des institutions traditionnelles et du rôle protecteur de l'Etat.

« Il apparaît que la démographie indienne est sûrement moins subie que délibérée et que l'arbitrage des individus, des familles ou des communautés (de village, de caste, de confession, etc.) s'exerce en de nombreux domaines face à un Etat impuissant à réguler le détail des arrangements sociaux et de leurs composantes démographiques, les mariages, les migrations, les naissances, etc. » [Guilmoto, 1997 : p.1]. Par ce constat, à l'hétérogénéité observée à l'échelle régionale s'ajoutent les inégalités locales représentées par les différences rurales/urbaines, religieuses, de caste ou encore de classe [Oliveau S., 1999].

La transition démographique reste un phénomène transformant les structures sociales d'un pays, en impliquant de nombreuses conséquences à prendre en compte. En Inde, l'hétérogénéité à tous les niveaux dresse une situation particulière, où le phénomène démographique ne pénètre pas dans tous les espaces de la même manière. Pourtant, la démographie indienne demeure très importante pour l'avenir, car ce pays ne peut pas se permettre, à long terme, de garder une fécondité supérieure au seuil de remplacement. C.Z. Guilmoto prévoit déjà l'expansion de la baisse de fécondité à tout le pays par paliers régionaux, faisant ainsi appel au concept de diffusion de l'innovation.

## **II) Le concept de diffusion spatiale de l'innovation**

Le processus de diffusion spatiale de l'innovation est défini par Thérèse Saint-Julien comme un « phénomène de propagation dans le temps et dans l'espace d'une chose spécifique, objet, institution, idée, pratique, etc. auprès des individus, des groupes, ou de toutes autres unités potentielles d'accueil très précisément localisées » [Saint-Julien T., 1985]. Plus largement, la notion de diffusion spatiale recouvre l'ensemble des processus qui concourent au déplacement, à la migration, de l'innovation dans l'espace géographique, et aux effets que ces déplacements engendrent dans l'espace. Il s'agit bien évidemment d'un phénomène transcalaire, et concerne donc toutes les échelles géographiques. Lorsque nous étudions le concept de diffusion de l'innovation chez Thérèse Saint-Julien ou Everett Rogers, celui-ci paraît relativement abouti. Mais pour ce faire, il a été forgé par plusieurs décennies de réflexion.

Afin de bien saisir et assimiler ce concept, il sera premièrement question d'examiner l'émergence du concept de diffusion spatiale. Dans un deuxième temps, nous exposerons les principes et les fondements de ce concept. Ces différentes parties prennent appui sur les livres de Thérèse Saint-Julien<sup>6</sup> et Everett Rogers<sup>7</sup>.

### **A) Un concept ancien et émergeant progressivement en géographie**

Le concept de diffusion spatiale de l'innovation se développe progressivement. Pendant longtemps, la notion a surtout intéressé l'ethnologie, la sociologie et l'histoire, mais peu la géographie. Effectivement, le processus de diffusion reste très bien étudié par les sociologues et les « folklorists » (anthropologues) concernant le passé, car la diffusion des innovations a été réexplorée en anthropologie par le courant du diffusionnisme. Mais jusqu'à encore une cinquantaine d'années environ, ce concept n'a que peu marqué la géographie [Raffestin C., 1991]. Il est donc préférable de récapituler son évolution pour mieux le comprendre.

Les premiers travaux faisant appel à une notion encore vague de diffusion sont fortement liés à l'école de pensée allemande. Les premiers sont ceux de Friedrich Ratzel, considéré comme le « fondateur » du diffusionnisme : il conceptualise les aires culturelles. Ratzel, tout comme Frobénius en 1898, explique la diffusion des traits de cultures entre les différentes sociétés [Raffestin C., 1991]. Ces deux auteurs introduisent donc la notion de diffusion. Cependant, les idées diffusionnistes sont reprises par différentes écoles parmi lesquelles l'école germano-autrichienne, dite de Vienne, dont le représentant est Graebner.

---

<sup>6</sup> [SAINT-JULIEN T., 1985]

<sup>7</sup> [ROGERS E., 1995]



Ce dernier fonde, avec Ankermann, la méthode diffusionniste, reprise par Franz Boas en 1924. Ce dernier fut l'élève de Ratzel, mais a beaucoup travaillé aux Etats-Unis, au point d'être considéré comme le « père fondateur de l'anthropologie américaine ». Il représente l'école américaine du diffusionnisme. De cette manière, la notion de diffusion, influencée par les chercheurs allemands, se répand aux Etats-Unis. Néanmoins, Boas fait l'objet de critiques par rapport à la dimension spatio-temporelle de sa conception du phénomène culturel. La critique estime que la diffusion s'effectue sans ordre et qu'elle aboutit plus à un emprunt qu'à une création. L'historien Frederic Jackson Turner, aborde en 1927 le thème de la « frontière » dans l'histoire américaine où il voit la marée des innovations progressant du centre vers l'extérieur [Haggett P., 1968]. Schumpeter en 1934, quant à lui, étudie la diffusion des innovations dans l'évolution économique.

Carl Sauer est un chercheur marqué par la pensée allemande. Né au Missouri dans une communauté d'immigrants allemands, il fait ses études en Allemagne ce qui l'influence fortement. Il enseigne à l'université de Berkeley, et fonde « l'école de Berkeley ». Celle-ci fournit une importante étude d'exemples de diffusion à l'échelle mondiale<sup>8</sup>, comme la diffusion du plan urbain en damier par exemple. Cette école de pensée prend de l'importance dans le concept de diffusion puis influence fortement la géographie entre 1920 et 1970, comme l'indique Clark en 1954. La théorie du diffusionnisme suscite un débat à travers la réflexion développée en géographie autour de la notion du genre de vie, abordée par Vidal de la Blache en 1911, par Sorre en 1948 et par George en 1951. L'effet de voisinage apparaît alors comme un déterminant de l'apparition et de l'évolution d'un genre de vie.

Mais la liaison entre les études de type sociologique, la recherche historique de l'école de Turner et les avancées des études géographiques de l'école de Berkeley, est établie par un groupe de géographes suédois, dont fait partie Torsten Hägerstrand. Ce dernier possède une approche nomothétique car il met en évidence des régularités temporelles et spatiales dans les processus de diffusion de l'innovation. Il n'est pas faux d'affirmer qu'il s'appuie sur les travaux de l'école de Berkeley ainsi que sur la synthèse de Svensson, qui récapitule les travaux suédois précédents.

On admet généralement qu'Hägerstrand a fait la synthèse [Hägerstrand T., 1953] la plus complète de diffusion spatiale, en réussissant à créer un modèle empirico-descriptif avec les apports des précurseurs. Dans ce livre, considéré par certains comme « fondamental » dans le concept de diffusion, Hägerstrand part d'un exemple de géographie rurale suédoise. Ce chercheur pose toutes les bases conceptuelles de la diffusion de l'innovation.

Il définit les quatre étapes temporelles reprises plus tard par Saint-Julien T. et Rogers E. [Hägerstrand T., 1962]. T. Hägerstrand comprend que la diffusion s'effectue de proche en proche (par contagion), c'est-à-dire que lorsqu'un premier adoptant apparaît, il émergera un deuxième adoptant proche du premier. Il explique qu'il y a renforcement des adoptants au

---

<sup>8</sup> Ces exemples se trouvent dans l'ouvrage suivant : SAUER, CARL O. (1952), *Agricultural Origins and Dispersals*, The American Geographical Society

centre et une dissémination radiale (concentrique autour des points de départ initiaux). D'où la prise en compte de l'importance de la distance, schématisée par la figure 3.

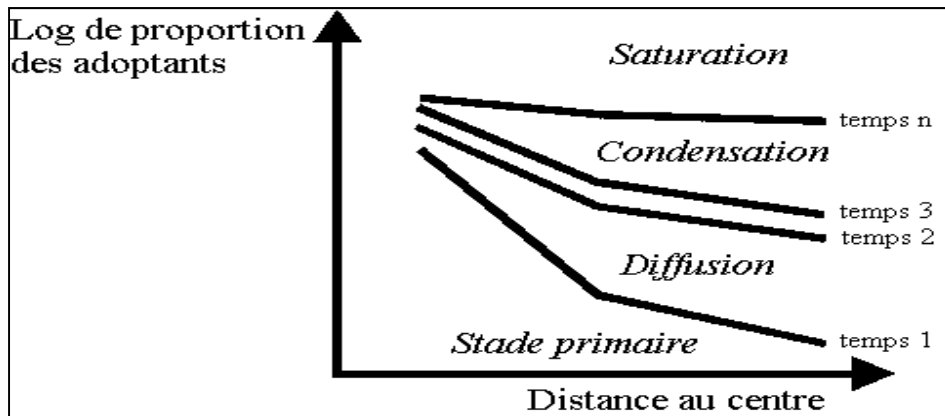


Figure 3 : Evolution du taux d'adoption en fonction de la distance

Source: Schéma de T. Hägerstrand, *Innovation diffusion as a spatial process*, Chicago, University Press, 1953

Il met également en évidence d'autres régularités, comme le fait qu'une diffusion se fasse d'autant plus rapidement qu'elle démarre à partir d'un centre et d'autant plus lente qu'elle se réalise à partir de la périphérie. Il expose également le phénomène de barrière, créant des déséquilibres, ainsi que la courbe logistique quand on exprime la proportion d'adoptants en fonction du temps (Voir figure 4).

Le modèle d'Hägerstrand reste le modèle de base de la diffusion spatiale, malgré quelques limites tels que l'espace anisotrope ou l'homogénéité des individus dans l'espace en nombre et en distinctions individuelles. Ce modèle « de base » influence toutes les études de diffusion postérieures, et sera repris plus tard par T. Saint-Julien.

Gulley (1959) et Mikesell (1960) montrent comment les idées de Turner ont été rapidement exploitées hors d'Amérique du Nord et appliquées à d'autres thématiques comme par exemple la colonisation de la Sibérie par les Russes.

Les sociologues se sont intéressés à la propagation des idées dans une société, au rôle des leaders dans le lancement des innovations, et au problème de la résistance au changement. Dans ce cadre, E. Rogers a passé en revue quelques centaines d'études, dont une grande part consacrée à l'innovation technique dans les communautés agricoles des Etats-Unis.

Pederson (1970) distingue l'innovation domestique (unité individuelle susceptible d'être adoptée par l'ensemble d'une population ou sous-population) de l'innovation institutionnelle.

Cliff et Ord [Cliff A.D., Ord J.K., Haggett P., Versey G.R., 1981] commencent à étudier les différents processus de la diffusion de l'innovation de manière scientifique et modélisatrice.

Les travaux de Brown (1981) révèlent la volonté de la prise en compte des stratégies de conquête spatiales mises en œuvre dans chacun des processus spatiaux de propagation. Il propose une perspective fonctionnaliste. Brown veut rendre plus réalistes et plus

opérationnelles les études sur la diffusion spatiale des innovations. Ainsi, il dénombre les différentes stratégies au nombre de trois. Tout d'abord, celles qui relèvent de décisions très centralisées. Ensuite, celles résultant de l'existence d'agences décentralisées mais avec une coordination centrale de la stratégie. Pour finir, celles qui correspondent à une forte décentralisation de la diffusion, du fait d'une grande autonomie des établissements chargés de la maîtrise du marché. Ainsi, Brown attire l'attention sur deux points : quelle que soit l'organisation mise en place par la diffusion, il en découle des schémas de propagation spatiale d'une complexité réelle dont certains ne peuvent être réduits à des règles communes. Le deuxième point est que l'on doit tenir compte du rôle des infrastructures dans la définition des stratégies de conquête spatiale des marchés.

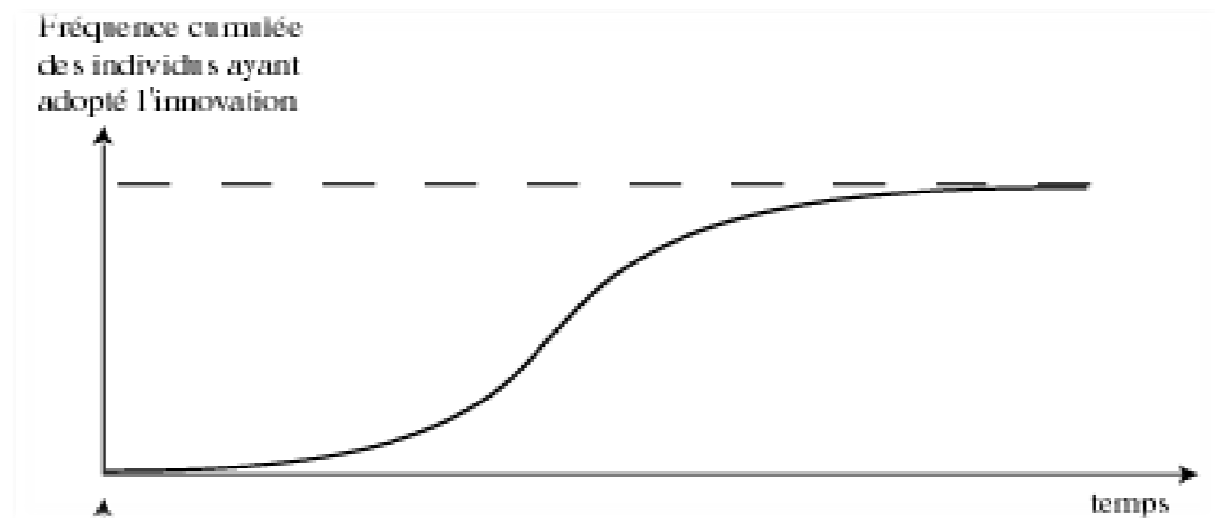


Figure 4 : Courbe logistique  
Source : [SAINT-JULIEN T., 1985]

De Sauer à Brown, en passant par Hägerstrand, nous pouvons nous rendre compte que les méthodes d'analyses ont évolué, ce dont s'inspire Thérèse Saint-Julien [Saint-Julien T., 1985 ; Saint-Julien, 1995 ; Saint-Julien T., 2001]

Ainsi, grâce à l'évolution de ce concept, Everett Rogers et Thérèse Saint-Julien produisent des synthèses sur la diffusion, toujours considérées à l'heure actuelle comme des références.

## **B) Les conceptualisations abouties**

T. Hägerstrand pose les bases du concept de la diffusion des innovations [Hägerstrand T., 1953]. Everett Roger [Rogers E., 1962], s'est principalement intéressé à l'aspect sociologique de la diffusion, contrairement à Thérèse Saint-Julien [Saint-Julien T., 1985] qui s'est penchée essentiellement sur son aspect spatial. Ces deux synthèses peuvent être considérées comme des références. La diffusion spatiale se compose de plusieurs éléments : une innovation apparaît dans un système social puis se diffuse à travers celui-ci

par le biais de canaux. La propagation peut être accélérée ou freinée par des barrières. Une diffusion de l'innovation se divise en plusieurs étapes distinctes.

## **1) Les composantes de la diffusion spatiale**

### **a) Une innovation**

La diffusion de l'innovation se caractérise comme le processus par lequel une innovation se transmet à travers certains canaux dans le temps au sein des membres d'un système social [Rogers E., 1962]. De ce point de vue, la diffusion peut s'étudier en tant que changement social.

Une innovation est une chose nouvelle, pouvant être matérielle, telle un objet, mais aussi immatérielle comme l'est une idée ou encore un concept. Une fois que l'innovation apparaît, elle se diffuse. Par la suite, elle est adoptée ou non par les individus du système social.

Le taux d'adoption d'une innovation représente la proportion des individus ayant adopté l'innovation. Ce taux va être défini par cinq éléments.

- Tout d'abord, l'avantage relatif de l'innovation, c'est-à-dire à quel point l'innovation est perçue comme meilleure que la précédente. Il peut s'agir d'un point économique mais aussi de confort social. Cet avantage relatif va être le seul élément déterminant dans le taux d'adoption : sans celui-là, il n'y a pas de taux d'adoption.
- La compatibilité montre que l'innovation ne nécessite pas l'adoption d'un nouveau système de valeur. Elle doit être compatible avec le système de valeur en place pour être plus facilement adoptée.
- La complexité de l'innovation intervient sur sa perception de la part des individus. Plus une idée est simple, plus vite elle sera adoptée ; plus elle est compliquée, plus elle mettra de temps à l'être.
- La testabilité, quant à elle, vise la capacité d'une innovation à être testée avant d'être adoptée. En effet, si tel est le cas, les individus peuvent découvrir l'innovation sans pour autant l'adopter.
- La visibilité suggère qu'une innovation visible des autres adoptants potentiels sera plus facilement adoptée qu'une innovation moins visible, et donc inconnue du public ciblé.

Tous ces critères définissent le taux d'adoption de l'innovation.

### **b) Un système social composé d'individus hétérogènes**

Une innovation apparaît dans un système social. Bien évidemment, toutes les diffusions ne concernent pas un système social, à l'image d'une diffusion dans des institutions. Ici, nous développons exclusivement l'idée d'un système social composé d'individus.

Il s'agit d'un ensemble d'unités interdépendantes, autrement dit d'une communauté fermée délimitée par une frontière à l'intérieure de laquelle se diffuse une innovation [Rogers E., 1962]. La structure propre de chaque système social affecte la diffusion. Il se caractérise

par une structure, des acteurs, des normes, des types de décisions propres au système et des conséquences qui lui seront spécifiques.

- La structure sociale représente la combinaison des groupes d'individus entre eux et de leurs relations interpersonnelles, créant une structure de communication particulière et définit pour chaque individu une probabilité d'interaction avec les autres individus. La structure du système social, selon comment elle se constitue, sera un frein ou un accélérateur à la diffusion de l'innovation.
- Les normes du système sont composées de l'ensemble des comportements établis pour les membres d'un système social et définissent les comportements que les individus ont le droit d'avoir ou pas. En conséquence, les normes indiquent à chaque individu quels comportements le groupe attend de lui.
- Parmi les acteurs, les meneurs d'opinion ou les agents du changement sont distincts du reste des individus (le reste du système social). Les innovateurs se distinguent des autres individus par leur plus grande capacité d'innovation. Ils sont généralement perçus comme déviants du système social puisque souvent, ils n'appliquent pas la norme. De par cette perception, leur crédibilité s'amointrit, et ils joueront finalement un rôle assez faible dans la diffusion. Il va falloir distinguer les innovateurs (les premières personnes qui innovent) et les meneurs d'opinion. Ces derniers transmettent le changement. Les innovateurs exposent les innovations aux meneurs d'opinion décendant, quant à eux, si l'innovation sera diffusée ou pas. E. Rogers attribue aux meneurs d'opinion l'aptitude à pouvoir changer l'opinion des autres individus et à les influencer. Cette capacité est acquise et maintenue par des compétences techniques ou encore par le statut social.
- Si le système social est tourné vers le changement, l'innovateur n'est pas vu comme déviant du système. Au contraire, si le système est réfractaire au changement, alors le rôle du meneur d'opinion dans la diffusion de l'innovation reflète cette tendance. Ils servent de modèle de par leur proximité aux normes sociales. Ils se trouveront souvent dans les adoptants précoces, mais pas nécessairement dans les innovateurs.  
Dans un système, les meneurs d'opinion peuvent être pour ou contre l'innovation. Ce sont eux qui vont faire « décoller » la courbe logistique ou au contraire l'empêcher de le faire. Les meneurs d'opinion vont se distinguer de leurs disciples par le fait qu'ils sont plus exposés aux formes externes d'informations (ressemblant ainsi aux innovateurs), mais ils n'ont pas de démarches actives de recherche d'information. Par rapport à leur discipline, ils possèdent bien souvent un statut social plus élevé et sont plus innovants. Les formes du réseau des meneurs d'opinion influencent la forme du réseau de communication du réseau social.
- Dans certains cas, des agences du changement utilisent les agents du changement pour diffuser ou pas. Ces agences de changement peuvent employer de manière directe les meneurs d'opinion pour les professionnaliser en agents du changement. L'Etat peut très bien être une agence de changement. Dans les sociétés traditionnelles, l'Etat peut se

servir d'un chef de village comme d'un meneur d'opinion. Ce dernier perd un peu de sa crédibilité quand il devient un agent du changement professionnel. Il sera alors considéré comme hétérophile, et non homophile, car il est plus proche de l'agence de changement, ce qui le discrédite aux yeux des autres individus. Il peut également être utilisé pour freiner une innovation jugée indésirable. Le but d'un meneur d'opinion est de rester assez homophile. Souvent, il utilise un autre intermédiaire, à savoir les assistants, qui eux par contre sont homophiles puisqu'ils se situent entre les meneurs d'opinion et les individus du système social.

Avec ce système social, Rogers distingue trois manières dont l'innovation peut être adoptée ou rejetée. Tout d'abord, par choix individuel, puis par décision collective qui est la façon d'adopter ou de rejeter de manière consensuelle. La dernière façon est la décision d'innovation autoritaire ou hiérarchique.

### c) Les canaux de diffusion

Il existe plusieurs types de canaux spatiaux permettant à la diffusion d'assurer le contact entre émetteurs et récepteurs [Saint-Julien T., 1985].

La diffusion se développant largement par contagion, le voisinage tient un rôle non-négligeable. Les probabilités de contact diminuent avec la distance, qu'elle soit kilométrique, temporelle, économique ou encore culturelle. Mais il existe également des formes hiérarchiques, « passant par des points privilégiés plus ou moins éloignés du foyer, auxquels ils servent de relais » [Brunet, 2005]. Le modèle hiérarchique est convenablement assimilable à la diffusion des innovations géomatiques en France par exemple [Roche S., Humeau J.B., 1991].

La hiérarchie urbaine fournit à la diffusion un canal privilégié de propagation. Le degré de proximité entre deux éléments dépend de la position relative des lieux dans l'organisation du territoire. Par le canal de hiérarchie urbaine, une grande ville a des probabilités plus grandes qu'une petite ville de devenir un émetteur puissant. De la même façon, deux très grandes villes ont des probabilités de contact supérieures à celles existant entre des centres de taille inférieure. Thérèse Saint-Julien s'appuie sur Hägerstrand pour affirmer que les propagations combinent les canaux par contagion et par hiérarchie urbaine. Un exemple de la combinaison des deux canaux est la diffusion du SIDA aux Etats-Unis, phénomène étudié par P. Gould [Dumolard P., 2008]. Cependant, considérer uniquement l'effet de voisinage et la hiérarchie urbaine comme canaux de diffusion semble réducteur : d'autres effets peuvent se combiner. En effet, les « mass media channels » et les canaux interpersonnels constituent des canaux de diffusion à part entière [Rogers E., 1962]. Les « mass media channels » regroupent la radio, la télévision, les journaux etc. Ce sont souvent les plus rapides et se révèlent très efficaces car ils permettent à un nombre limité d'individus d'en toucher un très grand nombre.

Les canaux interpersonnels, quant à eux, nécessitent un face à face entre deux individus. Ces canaux sont souvent un peu plus lents que les « mass media channels », mais plus

efficaces en terme d'adoption de par le caractère personnel des liens, faisant appel à l'homophilie et à l'empathie. L'homophilie concerne le fait que deux personnes se ressemblent : le message sera mieux compris par un individu s'il provient d'une personne qui lui ressemble.

L'empathie, quant à elle, renvoie à la capacité de se projeter dans le rôle de son interlocuteur.

#### **d) Les barrières**

L'espace n'est pas homogène, et les barrières jouent sur l'accélération ou le frein de la propagation. Il existe trois grands types de barrières.

De prime abord, les barrières absorbantes, qui stoppent le processus de diffusion quand ce dernier est à proximité. Ce type de barrière ne détruit pas l'émetteur de l'innovation. Au contraire, les barrières super-absorbantes détruisent l'émetteur.

Le dernier type est la barrière réfléchissante, qui ne stoppe pas le processus, mais le renvoie dans une autre direction.

Les barrières sont plus ou moins perméables et ce degré de perméabilité varie dans le temps et l'espace pour un processus de diffusion donné. Un système social peut constituer une barrière si les individus qui le composent sont réfractaires au changement, ou si l'innovation n'est pas compatible avec les normes du système.

#### **e) Les échelles de diffusion**

Il existe différentes échelles parmi lesquelles une innovation est capable de se diffuser.

La diffusion à micro-échelle dépend des comportements individuels, comme cela est le cas des innovations culturelles. A méso-échelle, la dominante individuelle s'atténue fortement pour laisser place à l'échelon régional ou national. A macro-échelle, il s'agit essentiellement d'une diffusion internationale. Saint-Julien montre qu'une diffusion peut combiner plusieurs modes de propagations et par conséquent combine différentes échelles [Saint-Julien T., 1985].

### **2) Les différentes étapes de la diffusion spatiale**

#### **a) Conditions d'apparitions**

Pour qu'une innovation se diffuse, plusieurs conditions doivent être réunies [Saint-Julien T., 1985].

Il faut d'abord qu'en un lieu, une innovation susceptible de se propager dans l'espace apparaisse. Ensuite, la présence d'adoptants potentiels localisés et susceptibles de recevoir l'innovation reste obligatoire. Ces adoptants potentiels peuvent être des individus, des ménages ou encore des collectivités territoriales dans le cas d'innovation institutionnelle.

La troisième condition nécessite qu'un contact existe entre les émetteurs et les récepteurs potentiels afin que le message soit transmis et que la diffusion ait lieu : il s'agit des canaux de diffusion.

La dernière condition est le temps : la propagation et la conquête progressive de l'espace ont besoin d'une certaine durée.

### **b) L'impact du temps**

Le temps va se retrouver à trois niveaux dans la diffusion : dans le processus de diffusion ; dans la faculté d'innovation et dans le taux d'adoption [Rogers E., 1962].

- Le processus de décision d'un individu se divise en cinq étapes. En premier lieu, la connaissance, soit le moment où un individu prend connaissance de l'innovation. Lors de cette étape, ce sont les « Mass Media » qui vont être les plus efficaces car ils permettent de toucher un grand nombre d'individus.

La deuxième étape est la persuasion : l'individu va chercher à savoir si l'innovation lui convient personnellement. A ce stade, les relations interpersonnelles jouent de façon privilégiée. Ensuite vient la décision, c'est-à-dire quand l'individu décide s'il adopte l'innovation ou pas. L'étape suivante est l'implémentation : l'individu utilise l'innovation afin de vérifier qu'elle est une bonne chose (ou une mauvaise). A la suite de cela, l'individu confirme ou non l'adoption et devient lui-même émetteur de l'innovation.

Toutes ces étapes vont définir une période de temps entre le moment où un individu prend connaissance de l'innovation et le moment où il la confirme.

Le deuxième niveau est la faculté d'innovation. Rogers distingue différentes catégories d'adoptants selon la faculté relative d'un individu à adopter cette innovation avant les autres membres du système. Les différentes catégories sont les innovateurs, les adoptants précoces, la majorité précoce, la majorité tardive et les « laggards » (voir figure 5). Les innovateurs sont des chercheurs actifs de nouvelles idées. Ils se caractérisent par un fort degré d'exposition aux médias de masses, par un réseau interpersonnel très étendu au-delà du système local et aussi par le fait qu'ils sont capables d'accepter un fort niveau d'incertitude dans leur décision. Les décisions des innovateurs ne peuvent pas être influencées par les autres membres du groupe social.

- Le dernier niveau est le taux d'adoption, c'est-à-dire la vitesse relative d'adoption de l'innovation par les membres d'un système social. Cette vitesse relative est modélisée par la courbe logistique [Hägerstrand T., 1953], telle qu'elle est visible sur les figures 5 et 6. Ce modèle logistique se divise en quatre étapes [Saint-Julien T., 1985].

Premièrement, le stade primaire du processus. Il s'agit d'une amorce où la diffusion introduit une nouvelle opposition entre les centres et le reste de l'espace.

L'étape d'expansion, la deuxième étape, est le développement du processus. Il existe lors de cette partie, un effet centrifuge puissant à savoir la création de nouveaux

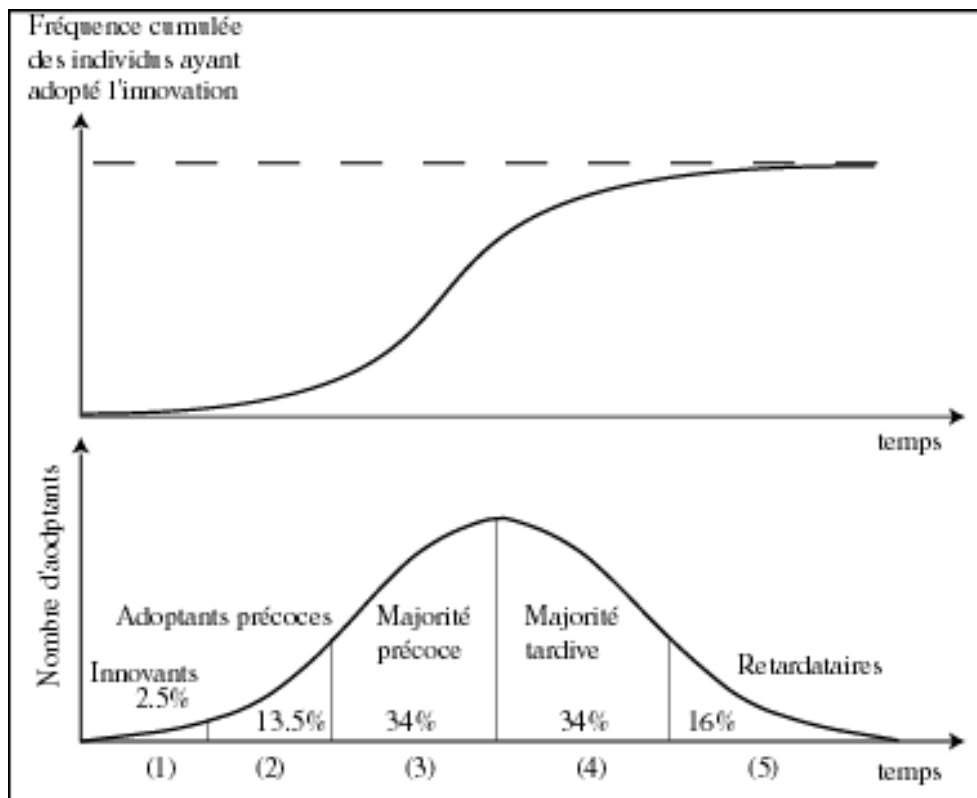


centres, en croissance plus rapide dans les zones éloignées et la réduction des plus forts contrastes.

La troisième étape est l'étape de condensation. Elle se résume par une augmentation relative de la pénétration de l'innovation. Cette dernière tend à être beaucoup moins contrastée entre les centres initiaux et les espaces périphériques.

La saturation est l'étape où la diffusion croît de manière asymptotique vers un maximum, à savoir le nombre d'adoptants total.

Quand une innovation se diffuse, il existe trois types de conséquences complémentaires : les conséquences désirables ou indésirables ; les conséquences directes ou indirectes et les conséquences prévues ou imprévues [Rogers E., 1962].



D'après Rogers, 1995

Figure 5 : Part des différentes catégories d'adoptants selon le moment où ils adoptent dans la diffusion  
Source : <http://stratégies4innovation.wordpress.com/2009/02/15/la-diffusion-dune-innovation>

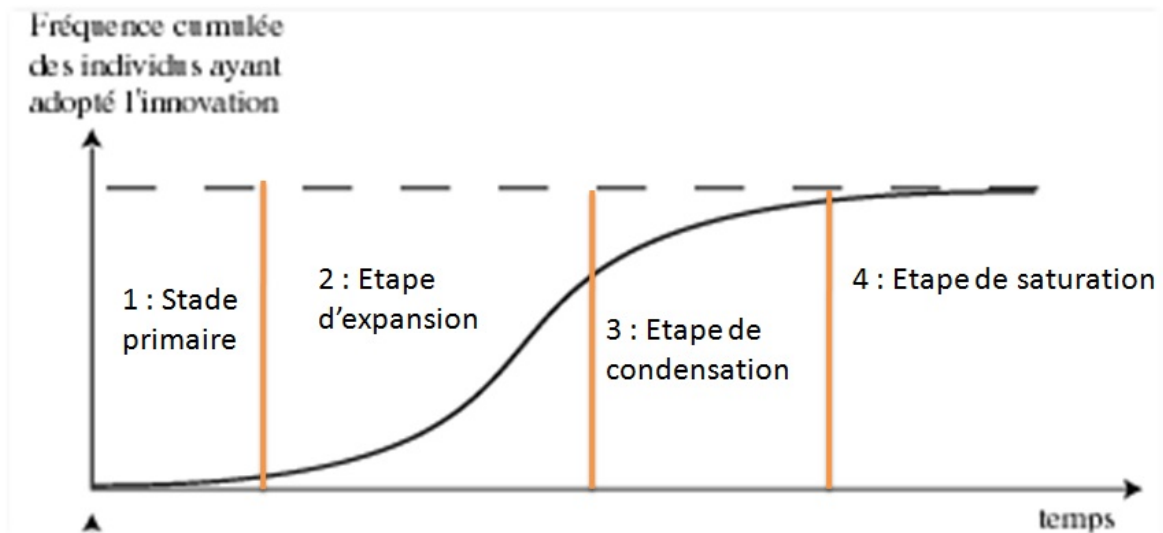


Figure 6 : Les différentes étapes d'une diffusion de l'innovation  
Source : Schéma réalisé par Y. Doignon à partir de [SAINT-JULIEN T., 1985]

### c) Les formes de propagation dans l'espace

Il existe deux types principaux de diffusion : la diffusion par extension et la diffusion par migration.

La diffusion par extension se distingue par une propagation « de proche en proche sans que diminue l'intensité du phénomène ou la diversité des éléments diffusés dans les foyers » atteints les plus rapidement. Ce type de diffusion représente une expansion géographique de l'innovation. La diffusion par migration englobe des phénomènes qui se diffusent de proche en proche, mais en se déplaçant ce qui insinue l'abandon ou l'affaiblissement des centres initialement atteints. Le concept de diffusion spatiale de l'innovation paraît intéressant pour notre problématique du fait que la baisse de fécondité apparaît comme une innovation sociale et démographique. En effet, pour qu'une région diminue sa fécondité, un certain nombre des individus habitant cette région doivent accepter l'idée de faire moins d'enfants. Mais avant d'entreprendre la moindre modélisation de la baisse de fécondité en Inde, il convient d'étudier les travaux déjà effectués sur le sujet.



### **III) La baisse de fécondité en Inde : une thématique étudiée depuis plus de 25 ans**

La baisse de fécondité demeure un thème suscitant l'intérêt des recherches de par sa participation essentielle à la transition démographique, phénomène majeur dans les études de démographie contemporaine notamment à cause de toutes les conséquences non-négligeables qu'il engendre. Cependant, l'étude géographique de la baisse de fécondité en Inde reste peut-être moins courante. Les travaux les plus aboutis et les plus concluants sont ceux dirigés par Christophe Z. Guilmoto. Nous exposerons leurs apports sur le thème de la baisse de fécondité indienne de façon chronologique, afin de faire émerger une évolution dans la recherche de C.Z. Guilmoto. Cette partie s'inspire fortement des différents articles de C.Z. Guilmoto.

#### **A) Les débuts de C.Z. Guilmoto : 1986**

En 1986, C.Z. Guilmoto s'intéresse à la transition démographique en Inde du Sud, un phénomène qu'il considère comme une « exception à la française » [Guilmoto, 1986].

A ce moment-là, le mouvement démographique est connu à l'échelle nationale, mais quasiment pas à l'échelle régionale. Pourtant, il existe deux types extrêmes d'évolutions démographiques en Inde. Tout d'abord, le cas des trois Etats en retard du Bihar. Il s'agit de trois Etats très peuplés, avec une faible productivité agricole hors des zones irriguées. La mortalité y est élevée et la baisse de la fécondité se fait moins ressentir qu'ailleurs. A l'opposé, les trois Etats du Kerala, de l'Orissa et du Tamil Nadu, dont les situations économiques sont loin d'être favorables, ont vu une chute de fécondité conséquente. Leur accroissement naturel est largement au-dessous de la moyenne nationale. Ce constat met en évidence l'incapacité des moyennes nationales à représenter la diversité des situations démographiques régionales. Déjà en 1986, C.Z. Guilmoto considère le Kerala comme un véritable « laboratoire démographique » indien du fait de sa précoce transition démographique.

A cette époque, l'étude se cantonne au cas du Tamil Nadu. Mais à travers celle-ci, différents aspects de la baisse de fécondité sont explorés à l'échelle régionale.

Premièrement, déjà dans les années 1940, il semblerait que le Tamil Nadu se distingue par une faible fécondité. Pareillement, cette région semble « en avance » sur l'évolution globale de l'Inde, avec un taux de 30 pour mille dans la décennie 1971-1981. Pourtant, la mortalité reste forte, diminuant fortement le taux d'accroissement naturel. Mais si l'on compare (en 1986), les régions avec des taux de mortalité comparables, il est possible de se rendre compte que leurs taux de natalité excèdent largement celui du Tamil Nadu, car les mentalités traditionnelles demeurent anti-malthusiennes. Le système familial de cette région se caractérise par une autonomie féminine plus grande : les taux d'alphabétisation et d'activité féminins dépassent souvent la moyenne nationale.

C.Z. Guilmoto va même jusqu'à comparer la situation du Tamil Nadu avec la situation européenne à la fin du XVIIIe siècle, dans l'objectif de montrer le rôle précurseur de cette région [Guilmoto, 1986].

### **B) L'étude de la baisse de fécondité à l'échelle du district : 1997**

Un peu plus tard, C.Z. Guilmoto apporte de nouvelles précisions sur la baisse de fécondité [C.Z. Guilmoto, 1997a]. Une nouvelle fois, il oppose les Etats pionniers aux Etats retardataires : l'Inde connaît une baisse soutenue de la fécondité, au point d'arriver à 3,5 enfants par femme en 1994. Le Kerala et le Tamil Nadu possèdent des taux de fécondité (en 1991-1993) similaires aux pays occidentaux. L'hétérogénéité des situations démographiques ressentie en 1986 se vérifie dans le temps : les régions du Sud indien ont une transition quasiment terminée, alors que les pays du Bihar voient certaines zones où la transition n'a pas commencé ou que la situation n'a pas ou peu évolué depuis 1980.

Avant l'Indépendance, les disparités régionales de fécondité étaient minimes alors qu'après l'Indépendance elles sont beaucoup plus fortes. Ainsi, C.Z. Guilmoto observe une opposition Nord/Sud. Mais la différence notable avec les recherches précédentes relève de l'échelle de l'étude. Précédemment, la fécondité est appréciée à l'échelle régionale, alors qu'en 1997, elle est étudiée à l'échelle du district. Grâce à cette échelle plus fine, plusieurs constats sont réalisés, en commençant par les différentiels de fécondité.

Il identifie le rôle majeur du statut féminin dans l'influence des niveaux locaux de fécondité. D'un point de vue statistique, l'alphabétisation et l'activité des femmes demeurent les variables les plus liées à une faible fécondité. Par contre, C.Z. Guilmoto attribue un rôle très secondaire aux différences économiques sur la modélisation de la fécondité des districts indiens. Il expose également une frontière virtuelle entre l'Inde du Nord sanskritisée et islamisée, et une Inde du Sud, dravidienne et aux traditions spécifiques.

Le découpage administratif des Etats explique de 70,6 % des variations entre districts : la structuration régionale possède un poids statistique sur la fécondité comparable ou supérieur à celui de l'alphabétisation. Mais l'intérêt d'une étude à l'échelle du district est d'observer les hétérogénéités à l'intérieur même des Etats. Et l'on se rend bien compte que certains districts d'Uttar Pradesh ou du Bihar ont une fécondité comparable à celle d'un district du Kerala. Le paysage démographique indien apparaît alors très contrasté, à l'échelle régionale comme à l'échelle du district, rendant compte du différentiel de la pénétration des nouvelles normes démographiques à l'intérieur des ensembles régionaux.

Mais l'apport énorme de C.Z. Guilmoto en 1997 reste de concevoir la baisse de fécondité en Inde comme une diffusion de l'innovation : « La baisse de la fécondité indienne se range parmi les phénomènes d'innovation qui transforment les usages sociaux, selon des mécanismes de diffusion dont le processus connaît certaines régularités temporelles et spatiales » [Guilmoto, 1997a : p.2]. La baisse de fécondité devient alors une « innovation

sociale ». La diffusion spatiale de cette innovation « renvoie à une image en couronnes successives, centrée autour de la région gangétique à fécondité maximale ».

C.Z. Guilmoto énonce « trois règles » pour cette diffusion.

La première montre que le foyer d'apparition de l'innovation est périphérique, ce qui compose certainement le trait « le plus inhabituel » de cette diffusion. F. Giraut se pose la question de savoir « si les marges ou les périphéries peuvent être porteuses d'innovations potentielles ou condamnées à la reproduction issues du centre, voire à la simple attente de la diffusion des effets des innovations externes ou enfin à la fatalité d'une dépendance et d'une assistance de la part du centre » [Giraut F., 2009 : p.2]. Dans notre cas, cela est possible. La distance à ce foyer d'apparition de l'innovation reste essentielle. Par contre, la structuration spatiale de la diffusion demeure plus complexe : répartition de la fécondité de manière quasiment concentrique autour d'un foyer central à la frontière des Etats de langue hindi. L'espace indien s'organise alors de façon auréolaire, mais les régions les plus natalistes s'enclavent progressivement.

L'effet littoral compose la deuxième règle. Les régions côtières ont eu un rythme particulièrement rapide dans la transition démographique. Ces régions sont celles où les échanges avec le reste du monde ont été les plus denses, impliquant des progrès de l'instruction plus rapides par rapport aux régions intérieures.

La dernière règle stipule un « effet urbain » grâce au grand nombre de métropoles qui impulsent les nouveaux comportements reproductifs.

Les profils sociologiques plutôt pro-natalistes ou malthusiens ne sont pas réellement responsables dans la détermination des disparités régionales. C.Z. Guilmoto utilise alors l'outil de l'auto corrélation spatiale pour étudier l'effet de la configuration spatiale sur les liaisons entre variables. Ainsi, il démontre que les frontières socioculturelles, tels le peuplement ou le groupe linguistique, créent des points de continuité très abrupts. Des zones sont alors identifiées, mais ne correspondent pas aux frontières sociales ou physiques car à cheval sur plusieurs Etats. La fécondité permet de connaître des frontières divisant l'espace indien de l'intérieur.

« La transition de la fécondité a en effet suivi un cheminement typique de la diffusion des innovations, le long des canaux de l'échange social, et s'appuyant donc très fortement sur les contiguïtés sociales ou culturelles pour se propager » [Guilmoto, 1997a : p.14].

### **C) Une explication plus technique pour les études sur la baisse de fécondité : 2002**

Dans le cadre d'un programme de recherche sur la baisse de fécondité en Inde (le « South India Fertility Project"), C.Z. Guilmoto publie un article en 2002<sup>9</sup> sur les mécanismes de ce phénomène. Encore une fois, son étude se limite à l'Inde du Sud, mais il justifie ce choix. Les pays d'Asie du Sud sont bien souvent assimilés, mais il n'en reste pas moins une

---

<sup>9</sup> [C.Z. Guilmoto, 2002]

grande hétérogénéité. De surcroît, l'évolution de la fécondité des différents pays de cette région du monde reste très différente. De ce fait, la région d'Inde du Sud ne correspond pas à la situation indienne générale, car nous voyons très bien que la fécondité de l'Uttar Pradesh en 2002 n'est même pas égale à la fécondité des Etats du Sud dans les années 1970.

C.Z. Guilmoto remarque que la fécondité du Kerala atteint une limite, et que les autres Etats comblent leurs écarts avec de dernier. Celui-ci insiste fortement sur un nécessaire « effort de régionalisation de la démographie indienne » [C.Z. Guilmoto, 2002 : p.9] pour comprendre ces dynamiques. Mais cette volonté se retrouve confrontée à un problème : la base statistique renseigne uniquement sur des agrégats démographiques, alors même que les Etats indiens voient une situation très hétérogène à l'intérieur même de leur territoire. D'où, la volonté de C.Z. Guilmoto de désagréger les agrégats régionaux afin de saisir les contours micro régionaux de la fécondité.

Le recensement indien de 2001 fournit des données à l'échelle du village. Mais les indicateurs disponibles ne sont pas aussi précis que ceux choisis pour les agrégats. Après analyse statistique par régression et par analyse factorielle de type ACP, plusieurs points sont éclaircis. La présence d'un centre de planning familial n'a aucun effet sur la fécondité. Par contre les variables d'infrastructures, d'éducation par exemple, ont tendance à faire diminuer significativement la fécondité.

Cette étude apparaît clairement comme étant moins portée sur les déterminants du phénomène, mais plus sur ses mécanismes. La baisse de fécondité reste perçue comme une diffusion de l'innovation, où l'espace est le support privilégié pour l'interaction entre individus et groupes sociaux. L'hypothèse est posée que la progression du comportement malthusien se dote de son propre élan, rejetant ainsi des variables considérées comme essentielles telle que l'offre de contraception ou les campagnes officielles.

En cartographiant la fécondité indienne, il est possible d'observer plusieurs phénomènes. Au fil du temps, un « noyau dur » subsiste autour de la vallée moyenne du Gange, enclavé et marginal. Dans le reste de l'Inde, des « poches de résistance » se détachent de leur environnement à faible fécondité : la discontinuité spatiale demeure très forte.

Après ces études statistiques et cartographiques, C.Z. Guilmoto utilise à nouveau l'outil d'autocorrélation spatiale, mais en obtenant de nouveaux résultats du fait des nouvelles données du recensement de 2001. Cependant, cette étude établit des agrégats des données concernant les 70 000 villages des quatre Etats d'Inde du Sud mises à disposition par le recensement, du fait que l'autocorrélation spatiale devient difficile voire impossible à employer quand on considère plus de 1000 unités. On remarque une extrême corrélation spatiale de la fécondité en Inde, et en conséquence une forte cohésion géographique des comportements de fécondité. L'autocorrélation spatiale reste maximale à moins de 100 kilomètres, mais à partir de 400 kilomètres, les districts n'obéissent plus aux mêmes logiques régionales. Il est possible d'observer une augmentation de l'autocorrélation spatiale entre 1951 et 2001. L'espace de la fécondité indienne devient de plus en plus

cohérent grâce à la transition démographique : les comportements, au départ très différents sur une faible distance, deviennent semblables sur une distance de plus en plus grande. L'autocorrélation spatiale permet ainsi de valider une forte corrélation de la fécondité dans un rayon de 400 kilomètres, à l'échelle du village et à l'échelle du district [Guilmoto C.Z., Oliveau S., 2005].

Il nous est possible de remarquer que l'évolution des recherches de C.Z. Guilmoto suit considérablement les progrès de l'informatique et de la précision des données fournies par le recensement, permettant d'étudier le phénomène à une échelle toujours plus fine.

#### **D) Une synthèse finale des travaux : *Fertility Transition in South India (2005)***

En 2005, C.Z. Guilmoto publie un livre<sup>10</sup>, considéré comme une synthèse des recherches faites sur la baisse de fécondité en Inde. Cet ouvrage rassemble plusieurs chercheurs et leurs apports sont singuliers. Certains points qui n'étaient que pressentis ou posés en hypothèse auparavant, sont alors démontrés de manière plus scientifique.

Les points exposés par la suite représentent les dernières avancées des recherches menées par C.Z. Guilmoto sur la baisse de la fécondité en Inde. Certains points ont déjà été abordé dans les études précédentes, mais ils le sont encore mieux dans celle-ci.

Des analyses statistiques sont menées afin de déterminer les facteurs de la fécondité. La tâche n'est pas aisée mais plusieurs choses sont éclaircies à nouveau. C.Z. Guilmoto utilise un groupe de variables appelé « variables idéales », dans lequel il étudie le rôle possible des facteurs de communications, ainsi que la densité démographique. Après étude, il en conclut qu'aucune de ces variables ne joue un rôle réel dans la baisse de fécondité. De la même manière, sont écartés des facteurs la qualité du planning familial. Les femmes utilisant le planning familial sont des femmes qui ont déjà adopté un règlement de fécondité.

L'alphabétisation masculine n'a aucun effet sur la fécondité, ainsi que les variables de type économique : la pauvreté et la propriété foncière inégale ne sont pas obligatoirement associées à une haute fécondité. Par contre, à l'échelle locale, les variables sociodémographiques et relevant de la structure sociale jouent un rôle plus important, tels que la composition religieuse ou le système de castes [Guilmoto, 2005a]. En effet, on peut observer que les populations musulmanes et tribales ont un niveau de fécondité localement plus fort que la moyenne locale. Ainsi, les différences de fécondité peuvent symboliser des conséquences de systèmes sociaux différents, sur lesquels reposent les traditions culturelles.

Les variables du statut des femmes occupent une grande place, dont la plus importante est l'alphabétisation. Comme pressenti auparavant, à aucun moment l'âge au mariage influence les taux de fécondité. De la même façon, le fait d'appartenir à un groupe régional

---

<sup>10</sup> [C.Z. Guilmoto, 2005a]



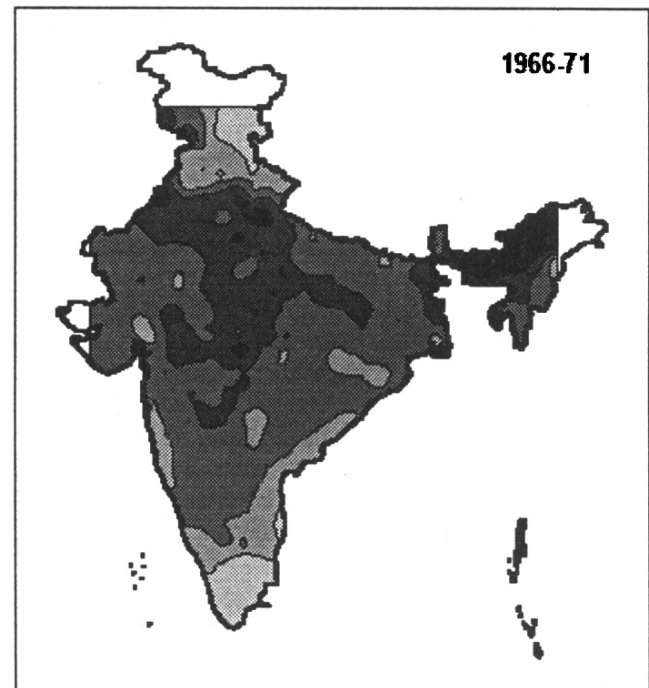
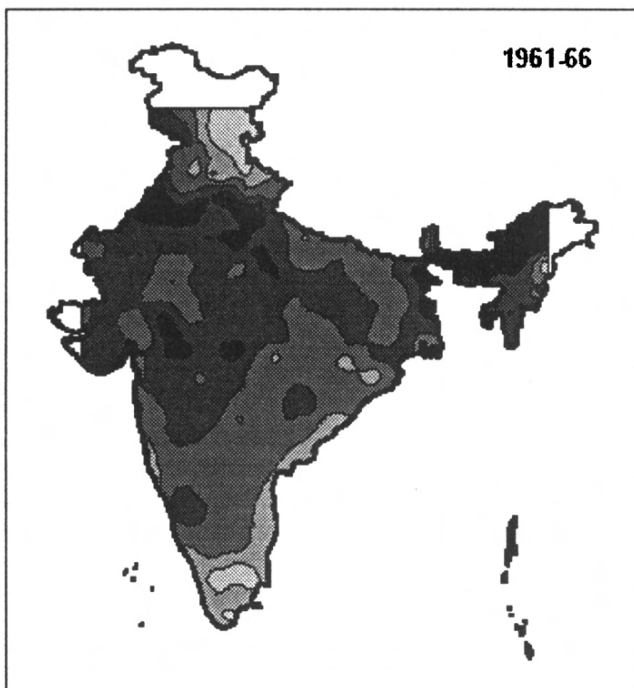
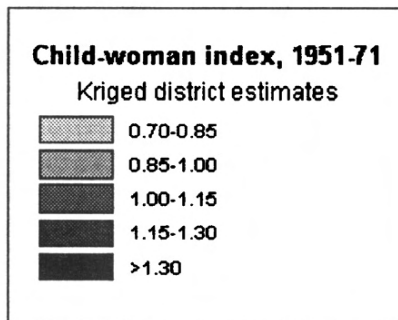
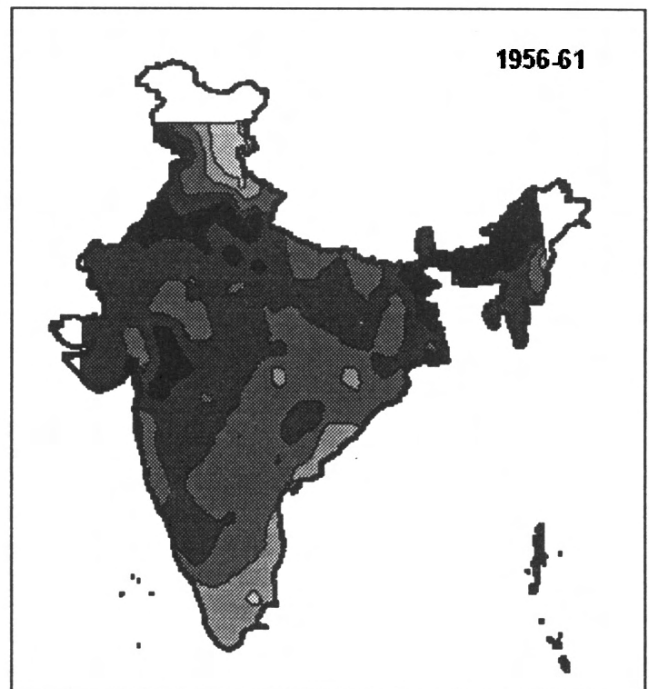
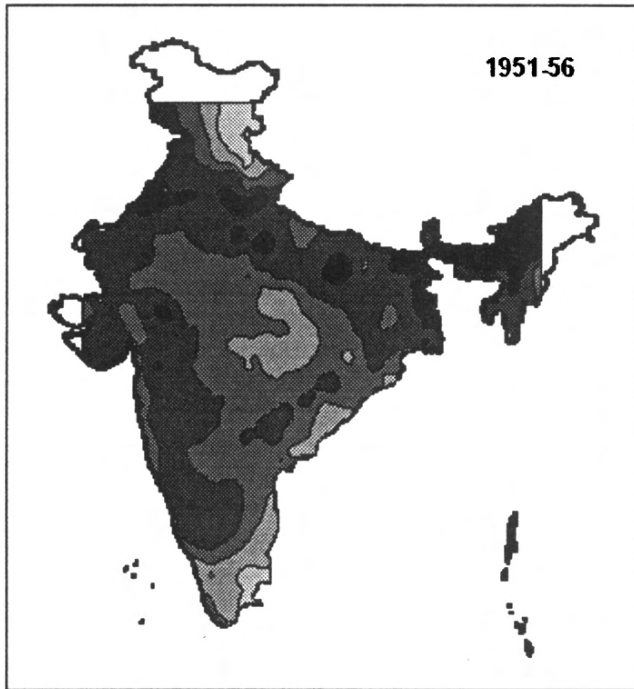
(le Nord ou le Sud) influe directement sur les différences de fécondité entre les zones indiennes, représentant une signification statistique forte. De manière synthétique, « ce sont les facteurs sociaux et/ou culturels qui forment le commencement et l'accélération de déclin de fécondité », et non les facteurs économiques.

Ensuite, C.Z. Guilmoto montre que la diffusion de pratiques malthusiennes se révèle essentielle dans la baisse de fécondité. Il postule que « les réseaux d'interactions sont formés par la proximité sociale et spatiale ». Le nouveau comportement reproducteur se répand plus ou moins facilement selon le système social. Des études du NFHS-2 montrent une diffusion verticale, des classes dominantes aux autres groupes sociaux. Cependant, la baisse de fécondité s'est socialement élargie car on ne peut que constater l'importance de la pénétration du comportement malthusien dans les groupes économiquement ou socialement moins susceptibles de l'adopter. C.Z. Guilmoto conclut que la proximité des groupes sociaux et la fréquence d'interactions augmente la probabilité d'adoption de l'innovation.

En considérant une diffusion de l'innovation spécifique à la fécondité, les frontières du changement démographique ne correspondent pas aux frontières administratives des Etats, mais plus aux espaces culturels. Le même phénomène est observé avec l'alphabétisation en Inde du Sud [Oliveau S., Chasles V., 2005].

La diffusion semble d'ailleurs suivre les routes principales ainsi que les axes ferroviaires [Oliveau, 2005]. Par ailleurs, contrairement à ce qui est exposé par le concept de diffusion de l'innovation, les grandes villes d'Inde du Sud comme Bangalore, Coimbatore, Madurai, Mysore, ou encore Hyderabad, n'ont eu qu'un faible effet sur la diffusion du nouveau comportement démographique. Ainsi, une cartographie de la fécondité en Inde de 1951 à 1991 est proposée pour illustrer ces propos (voir figure 7). Il nous est possible d'y observer la diffusion, démarrant au Sud de l'Inde, puis progressant vers le Nord, par les littoraux et isolant petit à petit la moyenne vallée gangétique, autrement dit l'Inde traditionnelle.

Simuler la baisse de fécondité en Inde



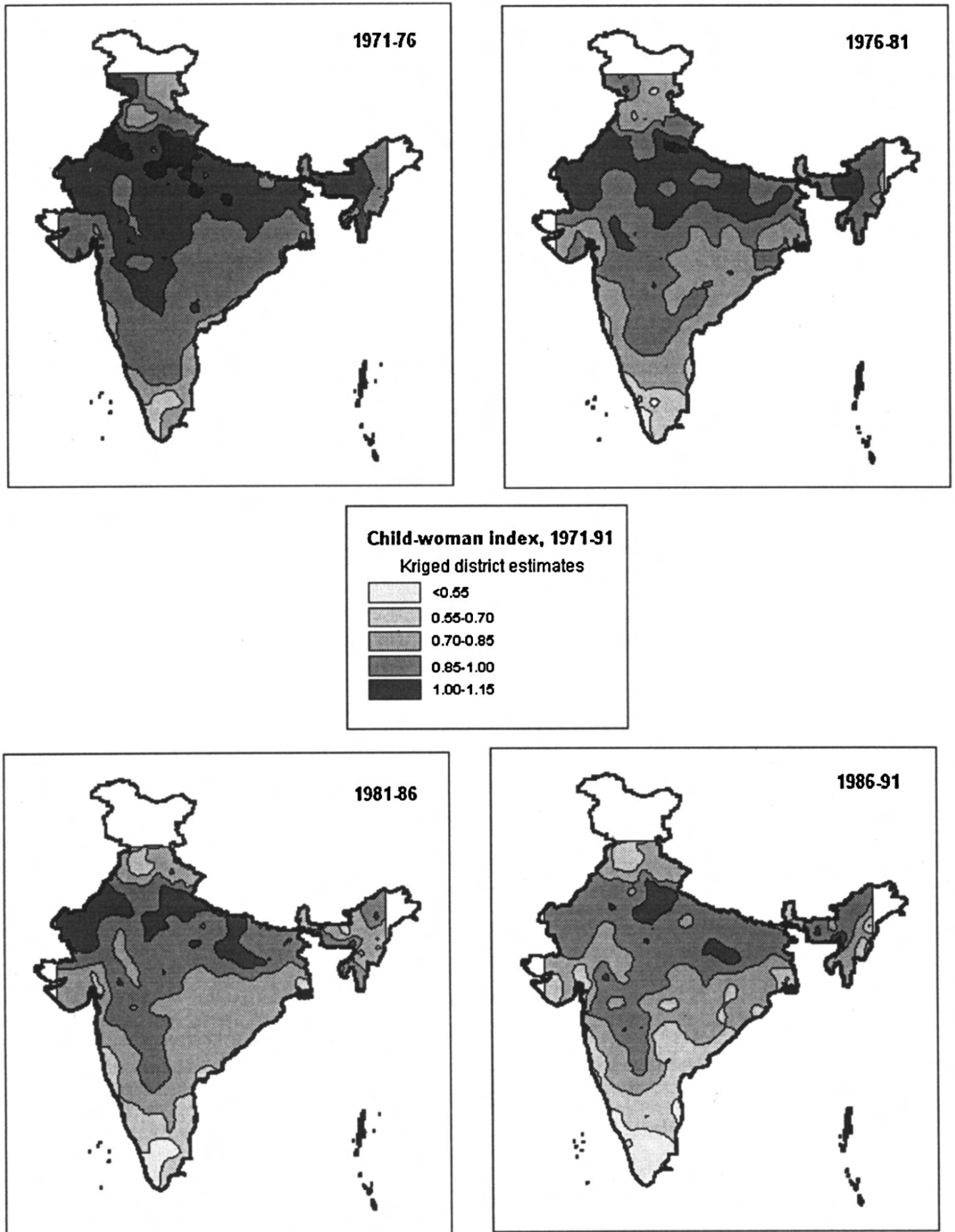


Figure 7 : Evolution de la fécondité en Inde de 1951 à 1991  
Source : Cartes tirées de [GUILMOTO C.Z., 2005]

L'autocorrélation spatiale prouve l'existence d'une diffusion spatiale spécifique de la fécondité où la géographie historique et sociale ne sont pas les facteurs les plus déterminants, mais plutôt le principe de proximité spatiale.

Un autre apport de C.Z. Guilmoto concerne la recherche plus approfondie sur le site d'apparition de la baisse de fécondité en Inde du Sud. Grâce à la cartographie de la fécondité, on peut se rendre compte que certaines zones sont affectées par le phénomène dès les années 1950 voire plus tôt, Coimbatore par exemple. Mais le cas inverse existe également : des zones voient leur fécondité diminuer parfois après 1960, comme dans les zones musulmanes. Les chrétiens syriens sont identifiés comme les premiers à percevoir les bienfaits de l'éducation des familles, notamment des filles. Par conséquent, ils développèrent plus rapidement les méthodes de contraception. Ainsi, la géographie de la baisse de fécondité dans le Kerala correspond à l'implantation des chrétiens syriens. Dans certaines régions kéralaises, le christianisme (à majorité des chrétiens syriens) représente localement une caste dominante. Au XIXe siècle, les chrétiens syriens ont sûrement gardé un avantage éducatif significatif par rapport aux autres communautés locales. Ils représentent alors les innovateurs par rapport à l'innovation du comportement malthusien. En adaptant le concept de diffusion spatiale et en observant la baisse de la fécondité au Kerala dans les années 1950, C.Z. Guilmoto pose l'hypothèse de l'imitation des comportements reproducteurs des chrétiens syriens par les autres communautés locales. Par contre, il n'arrive à fixer les facteurs initiaux de l'innovation, de par leurs différences selon les situations. En effet, les chrétiens syriens engendraient un fort taux d'alphabétisation féminin dans les zones qu'ils dominaient (dépassait souvent 75 %), alors qu'à Coimbatore, avec moins de 8 % des femmes de plus de 60 ans dans les régions rurales pouvaient lire et écrire en 1991, l'éducation y demeurait faible.

Au Tamil Nadu par exemple, la caste dominante est dominée par les Vellalars. Des sources historiques de la période coloniale soupçonnent cette caste de contrôler leur fécondité dans le but de contourner le problème de division de la succession entre les hommes de la famille. Etant donné la composition majoritaire de propriétaires terriens de cette caste, « on peut supposer que les comportements malthusiens ont été transmise aux paysans pauvres ainsi qu'à la grande population rurale et urbaine travaillant dans le secteur industriel » [Guilmoto, 2005].

Bien évidemment, ces affirmations ne sont que des hypothèses, du fait que leurs fondements se résument essentiellement à des sources ethnographiques et historiques.

La baisse de fécondité « repose sur la dynamique sociale dans les sociétés locales et en particulier sur l'innovation démographique introduite par des groupes dans une position dominante » [Guilmoto, 2005].

Dans son article de 2002, C.Z. Guilmoto exprime clairement le rôle que peuvent jouer les modèles multi-agents pour analyser les déterminants de la diffusion spatiale de la basse fécondité à l'échelle individu-centrée. Mais ce type d'outil le laisse plutôt perplexé.

Cependant, toutes les études de C.Z. Guilmoto présentées précédemment sont des études agrégées du phénomène de la baisse de fécondité en Inde. Bien évidemment, on note une volonté de toujours plus désagréger la réflexion. Cela reste possible au fur et à mesure de la précision des données et des progrès informatiques pour le traitement de données. En 1986, les seules données disponibles étaient à peine à l'échelle régionale, et on se rend compte que cette agrégation de données suggère une moyenne de comportements individuels : les individus d'une unité géographique agrégée possèdent tous les mêmes types de comportements. Cette hypothèse, comme nous l'avons remarquée à travers la réflexion de C.Z. Guilmoto, pose un problème car l'espace indien se révèle très hétérogène à l'échelle locale, et d'autant plus à l'échelle régionale. Une agrégation à l'échelle régionale ne peut que représenter un biais dans la compréhension du phénomène. Afin de contourner cela, C.Z. Guilmoto se rend bien compte de la nécessaire désagrégation des données. Après les données à l'échelle régionale, sont venues dans le recensement les données à l'échelle du district, puis à l'échelle du village. Plus l'échelle d'étude est fine, plus grande est la possibilité de compréhension du processus de baisse de fécondité grâce aux outils disponibles. Mais encore faut-il que l'évolution de ces derniers puisse le permettre. Nous avons bien vu que l'utilisation de l'autocorrélation spatiale se retrouve limitée à 1000 unités, obligeant le modélisateur à l'agrégation de ses données, même si elles sont à l'échelle du village.

Il serait donc intéressant d'étudier le phénomène de baisse de fécondité à l'échelle individu-centrée. Pour cela, l'outil apparaissant le plus approprié reste les systèmes multi-agents, malgré une certaine réticence de C.Z. Guilmoto envers ce type d'outil.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

## **Chapitre 2 : La création d'un modèle Multi-Agents**

### **I) Les Systèmes multi-agents (SMA)**

Il est impossible d'attribuer la source des SMA à une seule équipe de recherches. Cependant, on peut affirmer que les travaux de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et de la Vie Artificielle (VA) aux Etats-Unis à la fin des années 1970 et les recherches des sciences de la complexité en Europe, sont, dans une certaine mesure, le départ de ce qu'on appelle aujourd'hui les SMA. Il est généralement admis de nos jours que l'IAD et la vie artificielle ont trouvés dans les SMA le moyen de reformuler certaines questions sur le fonctionnement du monde, mais aussi le moyen de les tester.

Les SMA ne sont que le résultat d'une multitude d'apports venant de disciplines et recherches différentes. Ils profitent de l'évolution de l'Intelligence Artificielle (IA). Cette évolution et les apports qu'utilisent les SMA seront étudiés dans un premier temps. Cette partie s'inspire de la thèse d'Eric Daudé [Daudé E., 2003]. Ensuite, sera donnée une définition des SMA et de ses composants. Pour finir, nous analyserons l'utilisation des SMA par les géographes.

#### **A) Historique : de l'intelligence artificielle à la vie artificielle**

##### **1) Les automates cellulaires : les prémices de l'intelligence artificielle**

Les automates cellulaires sont inventés par Ulam et John von Neumann dans les années 1940. Ces chercheurs cherchaient à savoir s'il était possible de concevoir une machine capable de se reproduire elle-même. Ulam travaillait sur les objets géométriques récurrents censés évoluer dans le temps dans le but, à partir d'un certain moment, de se disputer. Il menait ces études dans un environnement cellulaire dans lequel l'état de chaque cellule serait dicté par l'état des cellules voisines. En 1952, arrivant à une version d'automate comportant 29 états différents, Von Neumann pense qu'il a échoué et arrête la recherche. Ses travaux seront repris par Arthur Burks en 1966. Ce n'est qu'à partir de ce moment-là que les automates cellulaires seront complétés et approfondis. Le jeu de la vie de John Conway est assimilé aux automates cellulaires en 1970. Dès lors, on s'aperçoit de la répétitivité de formes récurrentes et de la ressemblance de certains phénomènes au monde de la physique. Dans les années 1990, les automates cellulaires connaissent une phase de maturité en raison de leur classification et de leur application en physique, en cryptographie ou encore en géographie avec Patrice Langlois.

De manière générale, un automate cellulaire se caractérise par sa structure et son fonctionnement. Sa structure dépend de la topologie du réseau cellulaire. Son fonctionnement, quant à lui, renseigne sur l'aspect dynamique du réseau cellulaire à savoir le voisinage et le parallélisme.

L'automate cellulaire reste un puissant instrument de modélisation des systèmes complexes mais néanmoins, quelques limites apparaissent quand il convient de modéliser la complexité des phénomènes sociaux. Un automate cellulaire ne peut pas prendre en compte simultanément des règles de transition qualitative et quantitative, et des états qui évoluent.

Lorsque l'hétérogénéité des situations et des comportements individuels est jugée déterminante pour expliquer un phénomène dynamique, les sciences sociales privilégient alors l'utilisation de l'outil SMA.

Les SMA ont eu des apports de plusieurs disciplines à savoir l'informatique, le génie logiciel, la robotique, la linguistique, la sociologie, la psychologie sociale ou encore les sciences cognitives. Analysons à présent l'évolution de ce que l'on appelle aujourd'hui les SMA.

### **2) L'intelligence artificielle (IA)**

Les débuts de l'IA sont marqués par des préoccupations qui relèvent à la fois du domaine de l'informatique et de la robotique.

Dans les années 1970, son objectif se tient clairement à construire des systèmes capables de rivaliser avec l'intelligence humaine, dans le but de résoudre des problèmes en remplaçant les experts humains. A cet égard, l'IA s'intéresse essentiellement à la modélisation des capacités intelligentes d'un agent rationnel, que ce soit un robot, un ordinateur etc.

Face à un problème, les recherches en IA préconisait d'envoyer un seul agent rationnel capable de procéder à différentes tâches permettant de résoudre la difficulté sans l'aide directe de l'homme. Les chercheurs ont besoin d'une grande compréhension du fonctionnement des différentes composantes de l'agent rationnel afin de pouvoir planifier les tâches qu'il est apte de faire.

Les premiers succès de ce raisonnement se trouvèrent en informatique avec les systèmes experts. Mais deux problèmes se dressent à l'IA. D'abord, l'incapacité théorique et technique à planifier les tâches en vue de régler un problème complexe. L'agent rationnel est capable d'effectuer certaines tâches, pourtant face à une problématique complexe, planifier les tâches à exécuter représente un véritable enjeu que l'IA n'arrive pas à relever. En effet, dans un environnement réel, une tâche complexe nécessite trop d'algorithmes de planification, engendrant trop de temps de calculs, pour des résultats médiocres.

Deuxièmement, les chercheurs en IA se rendent compte que dans le monde humain, un problème complexe est résolu par les connaissances de plusieurs experts, et non pas d'un seul.

Plusieurs individus mettent en commun leurs compétences variées, collaborent, communiquent ensemble afin de résoudre un problème. En conséquence, les chercheurs remettent progressivement en cause la méthode de l'IA, considérant un seul agent rationnel comme la solution dans l'intention de résoudre un problème complexe.



Face à ces échecs, l'IA ne cherche plus à remplacer l'expert humain, mais bascule graduellement dans son assistance. L'agent rationnel n'est donc plus destiné à substituer l'homme, mais à accomplir automatiquement certaines tâches de l'homme.

### **3) L'intelligence artificielle distribuée (IAD)**

De manière générale, les recherches de l'IAD visent à concevoir des systèmes composés de plusieurs agents autonomes et capables d'interagir ensemble dans le but d'obtenir des systèmes dits intelligents.

Au début des années 1970, les chercheurs considéraient l'IAD comme l'évolution des travaux de l'IA, dont toute la différence résidait principalement dans le nombre d'agents utilisés : l'IA n'en utilise qu'un seul, alors que l'IAD en emploie plusieurs.

L'IAD crée des entités logicielles ou matérielles relativement autonomes et indépendantes en interaction les unes avec les autres. Chacune d'entre elles représente un agent rationnel. Pour résoudre une difficulté complexe, l'IAD cherche une résolution collective et distribuée, contrairement à l'IA.

Les recherches en IAD se propagent dans plusieurs autres disciplines à partir des années 1980. Chacune des disciplines manie les concepts de l'IAD à sa façon, impliquant une multiplication des définitions de l'agent.

De façon générale, nous pouvons distinguer deux types d'agents.

Le premier est l'agent réactif, conçu comme une entité réagissant à des stimuli externes pour effectuer une action. Il lui est impossible de s'auto-contrôler, d'évaluer des résultats ou encore de faire évoluer son comportement.

Le deuxième type d'agent est l'agent cognitif, possédant des représentations et des connaissances, sur lesquelles il s'appuie pour prendre des décisions. Il lui est possible d'évaluer l'impact d'une de ses actions passées dans le futur. Les recherches des sociologues, notamment des courants de l'individualisme méthodologique ou de la psychosociologie, inspirent largement la vision cognitive de l'agent.

Les recherches de l'IAD mènent plus tard à la Vie Artificielle (VA).

### **4) La vie artificielle (VA)**

La différence entre l'IAD et la VA se trouve dans le type d'agent employé. Si l'IAD utilise des agents cognitifs avec une base de connaissances aidant à la réalisation d'une tâche, la VA préfère les agents réactifs. L'IAD veut construire des interactions entre agents, alors que la VA tente d'observer les interactions entre agents dans la nature afin de les tester.

En 1989, C. Langton pose la problématique de la vie artificielle : « l'étude de la vie telle qu'elle pourrait être, et non de la vie telle qu'elle est »<sup>11</sup>. Dans ce but, elle s'intéresse aux transitions de phases d'un système et aux seuils correspondants. Ainsi, les chercheurs

---

<sup>11</sup> LANGTON C.G., *Artificial Life I*, Addison-Wesley, 1989

implémentent dans un programme informatique les principes de l'organisation du vivant dans le but de les étudier et de les tester.

La particularité méthodologique de la vie artificielle réside dans l'émission d'une correspondance entre le modèle mis en place et le système associé : ils sont censés appartenir à la même classe d'universalité. Wolfram exprime cette idée en expliquant que les lois et les propriétés générales qui dirigent de tels modèles sont suffisamment universelles pour être appliquées à la plupart des systèmes naturels.

La Vie Artificielle possède deux champs de recherche privilégiés parmi d'autres, à savoir l'analyse des dynamiques de phénomènes complexes grâce aux automates cellulaires et notamment l'adaptation du jeu de la vie dans les années 1970. Le deuxième thème de recherche demeure l'analyse de l'intelligence collective à partir des interactions d'un ensemble d'agents réactifs avec Steels, Ferber et Dogoul.

Jusqu'au milieu des années 1990, tous les domaines étudiés par la Vie Artificielle effectuent des recherches sur l'exploration de nouveaux concepts, sur l'élaboration de nouvelles théories et la conception de divers SMA. Le fait que plusieurs disciplines soient touchées engendre un dialogue fécond et une profusion d'idées. Ainsi, les systèmes distribués et la modélisation du parallélisme ont permis de grandes avancées des protocoles de communications entre agents. La robotique et l'automatisme, quant à eux, permettent de mieux comprendre et de mieux maîtriser la régulation des actions. Les langages de programmation ont permis de développer des environnements de programmation adaptés aux différents concepts associés aux SMA.

La Vie Artificielle et l'IAD ont contribué dans une large mesure au développement des SMA. Les différences entre la VA et l'IAD donneront deux orientations aux SMA : une orientation « cognitive » employée dans l'IAD et une orientation « réactive » utilisée par la VA et les sciences humaines. Les apports des différentes disciplines sont visibles dans la figure 8.

Grâce à cette étude de l'émergence progressive des SMA, il est possible de se rendre compte que ces derniers existent uniquement grâce à un apport multidisciplinaire. Une fois les apports assimilés, les SMA deviennent un outil de plus en plus utilisé par les sciences sociales. Analysons à présent les SMA en tant que tels.

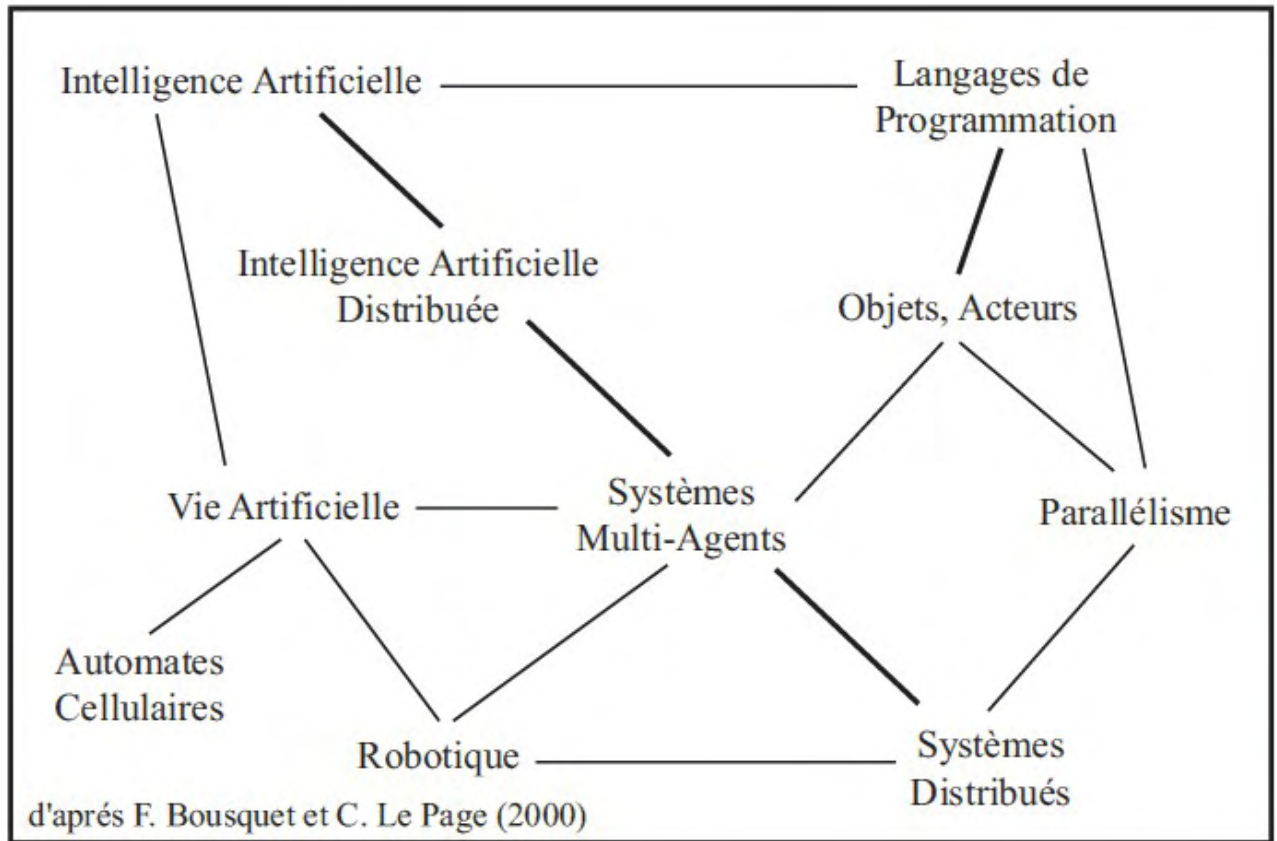


Figure 8 : Apports des disciplines aux Systèmes Multi-Agents

Source : [Daudé E., 2003 : p. 168]

## **B) Définitions et composants des Systèmes Multi-Agents**

Dans cette partie que nous entamerons par une définition, nous étudierons les composantes d'un SMA à savoir les agents, l'environnement et les interactions entre agents. Pour finir, nous exposerons les différents champs d'applications des SMA à l'heure actuelle.

### **1) Définition d'un Système Multi-Agents**

Dans l'univers multi-agents, doivent être considérés deux courants distincts.

Premièrement les recherches qui portent directement sur les SMA et leurs applications dans l'objectif de résoudre des problèmes. Le deuxième courant englobe les recherches portant sur l'analyse des dynamiques de systèmes complexes à partir de processus en interactions et selon une approche individu-centré. Dans ce cas-là, la priorité est donnée à la compréhension de phénomènes et de processus plus qu'à la résolution de problème.

Etant donnée l'utilisation multidisciplinaire des SMA dans la recherche, il n'existe pas vraiment de définition unique de ce qu'est un SMA : cela dépend du domaine d'application. Cependant, plusieurs définitions peuvent apparaître comme correctes. Après réflexion, on peut se dire qu'elles oublient souvent un aspect, à savoir l'environnement, et donc l'espace, qui nous concerne directement en tant que géographes.

Parmi toutes les définitions possibles, nous retiendrons celle de Ferber [Ferber, 1995] car elle semble englober le plus de propriétés des SMA.

Pour Ferber, un SMA se caractérise par les six « éléments suivants :

1. Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
3. Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers, lesquels représentent les entités actives du système.
4. Un ensemble de relations R qui unissent les objets (et donc les agents) entre eux.
5. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets O.
6. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ses opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers. » [Ferber, 1995].

Après cette définition d'un SMA, penchons nous à présent sur ses différentes composantes : des agents, un environnement et des interactions.

### **2) Définition d'un agent**

Pareillement à la définition des SMA, l'agent ne dispose pas d'une définition précise et admise par tous, parce qu'elle dépend de la discipline d'utilisation. Néanmoins, l'autonomie reste une caractéristique essentielle et commune à toutes les disciplines.

Encore une fois, la définition de l'agent donné par Ferber apparaît comme la plus complète. Selon lui, un agent est « une entité physique ou virtuelle :

- a. qui est capable d'agir dans son environnement,
- b. qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- c. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- d. qui possède ses propres ressources,
- e. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- f. qui possède plus d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- g. qui possède des compétences et offre des services
- h. qui peut éventuellement se reproduire
- i. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations, et des communications qu'elle reçoit. » [Ferber, 1995]

Cette définition englobe les agents réactifs et cognitifs. En effet, l'orientation cognitive postule « qu'un SMA résulte de l'organisation intelligente d'agents intelligents »<sup>12</sup>. Par conséquent, l'intentionnalité et l'apprentissage restent donc essentiels dans l'approche cognitive. Cette dernière est largement employée par les économistes, les sociologues et les géographes, l'inscrivant dans une conception sociologique de la modélisation multi-agents. L'approche réactive, quant à elle, utilise des agents qui n'ont généralement pas d'intention explicite. Ils ne possèdent pas de représentation et ne se contrôlent pas car ils fonctionnent par stimuli externe. Le postulat de cette approche est qu'une solution collective intelligente peut émerger des interactions entre agents pas nécessairement « intelligents ». Ce mode de pensée convient particulièrement aux modèles de sociétés animales. Le célèbre exemple du modèle de Drogoul et Ferber sur les fourmis se doit d'être cité<sup>13</sup>.

Avec le développement de ces deux approches, plusieurs architectures sont employées pour représenter la structure et le fonctionnement interne de l'agent, en considérant qu'un agent se compose de modules ou de couches plus ou moins importants selon la complexité de l'agent. Plus un agent possède de modules, plus il est complexe.

Les architectures les plus connues sont celles de Bratman<sup>14</sup> (BDI : Belief Desire Intention) ou encore celles de Frasson et Gouardère<sup>15</sup> où l'agent adopte des comportements réactifs la plupart du temps, mais parfois des comportements rationnels et quelquefois des comportements émergentistes.

Certaines disciplines ont tendance à construire des SMA avec peu d'agents, mais « hyper-cognitifs ». Ce type d'agents relève de la volonté de produire des agents à affect ou à émotion.

Par contre, ce type d'architecture reste peu pertinent quand il s'agit de les employer pour représenter des systèmes complexes, c'est-à-dire des phénomènes qui sont le fruit d'interactions entre agents « simples » [Daudé, 2002].

### **3) L'environnement**

L'environnement se définit généralement comme l'espace commun aux agents d'un SMA. Il existe deux types d'environnements : centralisé et distribué.

---

<sup>12</sup> DROGOUL A. (1993), De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents. Paris, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, spécialité Informatique

<sup>13</sup> DROGOUL A., FERBER J. (1994), "Multi-agents simulation as a tool for studying emergent processes in societies", in N. Gilbert, J.E. Doran (ed), *Simulating societies: the computer simulation of social phenomena*. London, University of London College Press, p. 127-142

<sup>14</sup> BRATMAN M. (1987), *Intention, plans and practical reason*. London, Harvard University Press

<sup>15</sup> FRASSON C., GOUARDÈRES G. (1996), "On effectiveness of distance learning using Lanca", *Workshop on Pedagogical Agents*, The Fourth International Conference ITS'96, San Antonio, Texas

Un environnement distribué se compose de plusieurs cellules, à l'image des automates cellulaires. A l'inverse, un environnement centralisé se présente comme un « bloc monolithique » [Ferber, 1995] et où les agents ont accès à la même structure.

L'environnement demeure un élément essentiel d'un SMA car il peut être à la fois un support, une ressource, une entité propre ayant sa propre dynamique, un champ de communication entre agents ou encore un tout complexe dont les agents et les objets sont des parties.

En géographie, lorsque l'environnement joue un rôle dans la dynamique d'un phénomène, il s'avère plutôt judicieux de choisir un environnement distribué.

#### 4) Les agents interagissent entre eux

Les interactions occupent une place centrale en géographie, et dans cette tâche, les SMA permettent de définir des interactions spatiales d'un niveau de complexité supérieur à celles des automates cellulaires. Ils permettent également de créer des relations non spatiales, comme des réseaux sociaux [Bonnefoy et al. 2001]. Les SMA possèdent cette capacité car l'interaction entre agents, dans le but de réaliser un objectif, demeure un principe de base.

A partir de cet état de faits, une véritable typologie d'interactions peut être dressée selon la compatibilité des buts entre agents, selon leur niveau de ressources, et selon leurs compétences. Les interactions résultantes s'opèrent selon un mode de coexistence, de coopération ou de concurrence (voir figure 9).

<b>Buts</b>	<b>Ressources</b>	<b>Compétences</b>	<b>Types de situation</b>	<b>Catégorie</b>
Compatibles	Suffisantes	Suffisantes	Indépendance	<i>Indifférence</i>
Compatibles	Suffisantes	Insuffisantes	Collaboration simple	<i>Coopération</i>
Compatibles	Insuffisantes	Suffisantes	Encombrement	
Compatibles	Insuffisantes	Insuffisantes	Collaboration coordonnée	
Incompatibles	Suffisantes	Suffisantes	Compétition individuelle pure	<i>Antagonisme</i>
Incompatibles	Suffisantes	Insuffisantes	Compétition collective pure	
Incompatibles	Insuffisantes	Suffisantes	Conflits individuels pour des ressources	
Incompatibles	Insuffisantes	Insuffisantes	Conflits collectifs pour des ressources	

d'après J. Ferber (1995, 74)

Figure 9 : Les différents types d'interactions entre agents  
Source : [Daudé E. 2003 : p. 180]

Pour la simulation multi-agents, il convient de choisir, lors de la modélisation, quels mécanismes agissent dans le processus que l'on souhaite représenter [Daudé, 2002].

Les agents sont donc interconnectés, mais l'échange d'informations et la coordination des activités entre les agents ne sont permis que par la communication. Le modélisateur doit alors se poser plusieurs questions sur la nature et les propriétés de ces messages. En effet, ils peuvent être directs ou indirects ; linguistiques ou non linguistiques.

Les messages linguistiques directs sont les messages circulant directement entre un agent et un autre. Les messages linguistiques indirects sont les messages partagés par la collectivité des agents contrairement aux non linguistiques qui se répandent par le biais d'une modification de l'environnement.

Il peut y avoir une base de données partagée où les agents envoient des messages à l'intérieur et lisent les messages qu'elle contient. Les modèles à base d'agents cognitifs ont la particularité d'une certaine autonomie de l'agent dans la production et l'interprétation de messages. Il est normal que les chercheurs en SMA portent leur intérêt sur les théories des actes de discours. On assiste alors à certains modèles où, dans certains groupes d'agents hiérarchisés, le statut l'emporte sur le message véhiculé.

Du fait que les SMA autorisent la différenciation des agents, le modélisateur « [s'affranchit] d'une conception de l'individu au « comportement moyen » » [Daudé E., 2002 : p.184].

### **5) Les champs d'utilisation des Systèmes Multi-Agents**

Comme nous l'avons précisé précédemment, les praticiens des SMA appartiennent à de nombreuses disciplines, ce qui multiplie les domaines privilégiés d'applications.

Cependant, J. Ferber arrive à regrouper certaines tendances dans des projets fédérateurs [Ferber J., 1995] :

- La résolution de problèmes. Il s'agit de créer des agents informatiques dans le but de résoudre des problèmes : cette tendance provient directement de l'IAD des années 80.
- La construction de mondes hypothétiques lorsque l'intention du chercheur est l'analyse des potentialités des SMA.
- La robotique distribuée, qui met en place des robots pour réaliser une tâche.
- La conception génétique de programmes dont l'objectif est « de donner naissance à des systèmes informatiques capables d'évoluer par interaction, adaptation et reproduction d'agents relativement autonomes et fonctionnant dans des univers physiquement distribués » [Ferber, 1995]. Pour cela, les SMA sont perçus comme des programmes informatiques contenant d'autres petits programmes (les agents) qui évoluent, communiquent et agissent.
- La simulation multi-agents. Cette approche tente de modéliser les phénomènes proches du réel, où le rôle d'entités individuelles est jugé fondamental pour comprendre la dynamique du système. Les SMA apparaissent alors pertinents pour

modéliser de tels phénomènes, principalement par le fait qu'ils sont émergents. Les chercheurs utilisent le modèle comme un laboratoire artificiel car « la simulation multi-agents permet alors d'observer la dynamique du phénomène, de suivre le comportement des agents individuellement ou collectivement, d'analyser les résultats à l'aide de techniques statistiques pour vérifier la validité des hypothèses qui sous-tendent la construction du modèle » [Daudé E., 2002 : p.198].

Tous ces champs d'utilisations des SMA ne sont pas obligatoirement valables dans toutes les disciplines. Effectivement, en géographie par exemple, la simulation multi-agents reste le champ d'utilisation favori. Analysons maintenant les recherches effectuées avec les SMA par les géographes.

### **C) La pénétration des Systèmes Multi-Agents dans les sciences géographiques**

Un ancien débat théorique oppose les géographes. D'un côté, certains privilégient une approche agrégée des phénomènes, impliquant que malgré la diversité des comportements individuels, des régularités peuvent s'appréhender à partir des modèles mathématiques ou statistiques. D'un autre côté, certains géographes adoptent une approche microscopique selon laquelle seule l'hétérogénéité des comportements individuels et des actions permet de modéliser le réel. Ce débat est sûrement la cause de la lente pénétration des SMA en géographie.

Toutefois, les méthodologies dites « individu-centré » se rapprochent de ces deux positions car elles autorisent de faire la liaison entre des approches micro et macro des phénomènes de par le concept d'émergence. Pour rappel, il s'agit d'un concept ascendant par lequel des règles propres à un niveau micro produisent des règles propres à un niveau macro.

Les partisans des modèles agrégés utilisent l'ensemble des observations et régularités observées à ce niveau pour calibrer la recherche de résultats lorsqu'ils travaillent à un niveau méso ou micro. Les SMA représentent, pour les partisans de l'approche microscopique, des instruments adaptés pour conceptualiser des connaissances acquises sur le terrain et pour en tester la pertinence par l'expérimentation. Cependant, des études montrent qu'un modèle agrégé de diffusion de l'innovation, globalement, peut arriver à retranscrire la moyenne de son équivalent individu-centré [Edwards M., Huet S., Goreaud F., Deffuant G., 2003].

Les études géographiques employant les SMA traitent en grande majorité de phénomènes urbains. Il s'agit essentiellement de dynamiques sociales et spatiales intra-urbaines tels que les modèles de Portugali et Benenson<sup>16</sup> ou celui de Vanbergue et al. (2000). Dans ces

---

<sup>16</sup> PORTUGALI J., BENENSON I. (1995), « Artificial planning experience by means of a heuristic cell-space model : Simulating international migration in the urban process », *Environment and Planning A*, n°27, p. 1648-1665



derniers, ce sont les unités élémentaires de décision (ménage, entreprise etc.) et leurs parcours individuels qui sont modélisés. Le modèle SIMPOP reste l'exemple de modèle multi-agents le plus cité dans la communauté géographique. L'objectif de ce dernier est « de simuler l'émergence et la dynamique d'évolution d'un système de villes à travers le développement et la concentration de différentes fonctions urbaines » [Daudé E., 2002 : p.186-187]. Daudé expose, selon lui, le problème de l'agent « ville » de SIMPOP : s'agissant d'un « niveau d'agrégation méso-géographique [qui] permet de décrire certaines propriétés macro-géographiques du système de peuplement, mais pas nécessairement de saisir tous les processus à l'œuvre à une échelle plus fine et qui pourraient faire basculer le système vers une autre forme de structuration. A ce niveau d'agrégation, les décisions individuelles interviennent donc sur l'organisation de l'espace, mais à travers des moyennes. » [Daudé E., 2002 : p.191].

En se plaçant à une échelle agrégée, le modélisateur risque de passer à côté de certaines dynamiques individuelles pouvant se révéler très importantes. Concrètement, les SMA ne présentent qu'un nombre limité d'applications en géographie, alors même que l'espace devient un concept transdisciplinaire de par son utilisation en économie, en écologie et en sociologie.

Les SMA sont le produit des recherches de plusieurs disciplines dans les domaines successifs de l'IA, de l'IAD puis de la VA. Les sciences sociales utilisent de plus en plus les SMA depuis les années 1990 car ils permettent de formuler et d'explorer de nouvelles pistes de recherches, difficilement abordables autrement.

Actuellement en géographie, les SMA ne sont que peu utilisés hors application de phénomènes urbains. Pourtant ils permettent de créer un monde artificiel à partir d'hypothèses, de lois et de théories, multipliant de surcroît les possibilités du modélisateur [Bonney, 2005]. Cependant, il faut préciser que l'un des problèmes des modèles SMA demeure dans son évaluation et sa validation. Comme le précise si bien Frédéric Amblard, « il s'agit bien plus d'une technique et d'une méthodologie permettant d'accompagner le chercheur en sciences sociales dans sa réflexion » [Amblard F., 2010].

Il reste tout de même intéressant d'utiliser cet outil pour des problématiques démographiques ou de diffusion. Si nous partons du principe que les moteurs des dynamiques de diffusion sont l'hétérogénéité des situations spatiales et sociales, et la diversité des comportements individuels, alors les SMA apparaissent comme l'outil idéal pour étudier ces phénomènes. Le nombre conséquent de travaux effectués dans ce domaine représente un point positif d'une problématique sur la diffusion. Bien qu'ils aient été faits à une échelle macro et agrégée, les régularités et les formes observées sont les « garde fous » d'une approche individu-centrée. [Daudé 2002].

## **D) Des phénomènes de diffusion sont traités par les SMA**

Nous considérons deux types de travaux. Premièrement, celui effectué sur la baisse de fécondité en France par SMA, se rapprochant le plus de notre thématique. Puis ceux concernant plutôt des travaux sur les processus propres à la diffusion dit « d'opinion ».

### **1) Travail sur la baisse de fécondité en France**

Tommy Murphy et Sandra Gonzalez-Bailon se fixent pour objectif de comprendre la baisse de fécondité à l'échelle individu-centrée [Gonzalez-Bailon S., Murphy T., 2008].

A cet égard, ils choisissent la France car il s'agit du premier pays européen touché par la transition démographique. Ils étudient plus particulièrement le rôle de l'influence sociale sur les décisions de fertilité. Leur travail se base sur des données historiques à l'échelle départementale, utilisées seulement de 1740 à 1900. Les chercheurs parlent d'une « notion de contrôle familial », de « la préférence pour une taille différente de famille » c'est-à-dire une « norme sociale », rejoignant l'hypothèse de C.Z. Guilmoto selon laquelle la baisse de fécondité demeure une innovation sociale.

La simulation agent est l'outil utilisé par les auteurs afin de simuler la baisse de fécondité en France. Ils expliquent bien que cet outil doit trouver la bonne combinaison entre une bonne description du monde et la nécessaire simplification<sup>17</sup>. Le trait réellement intéressant de l'outil est qu'il puisse donner des résultats totalement différents avec un changement minime dans l'interaction entre les individus.

Ce modèle cherche à mettre en relation l'hypothèse individuelle de comportement et la diffusion du taux de fécondité sur l'espace et dans le temps. Les facteurs explicatifs sont les règles déterminant comment les agents agissent sur les autres. Maintenant, détaillons succinctement le modèle en lui-même.

Les agents sont nés pour se reproduire, mais ils le font seulement pendant une certaine période de leur vie. Les distinctions de genre, les dynamiques de mariages ainsi que la stérilité primaire sont laissées de côté : il s'agit de simplifications du réel. Au lieu de déterminer un système d'âge, les auteurs préfèrent se baser sur des classes d'âge. Chaque agent possède deux attributs : une probabilité de mourir et une fécondité.

Par contre, les agents fixent leur nombre d'enfants à avoir selon le nombre d'enfants qu'ils veulent avoir, mais aussi selon le nombre d'enfants voulus par leurs voisins. Il y a donc bien une problématique de distance et de proximité spatiale influençant directement les comportements individuels. L'espace de simulation représente la carte de France, où sont disposés au départ 100 00 agents selon la densité de population et les estimations de la pyramide des âges de 1740. Une simulation concerne 36 périodes de temps, chacune représentant 5 ans. Tous les agents de plus de 70 ans meurent.

---

<sup>17</sup> Axelrod, Robert (1997), *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press, Princeton

Des recherches posent l'hypothèse selon laquelle la Révolution constitue le point de démarrage de la baisse de fécondité en France. Pour représenter cela, un certain nombre d'agents diminueront leur nombre d'enfants désirés au moment de la Révolution.

Le modèle compose une bonne première approximation descriptive de la baisse de fécondité en France. L'influence sociale a sûrement joué un rôle dans la dynamique car les simulations où l'influence sociale est présente sont plus capables de faire progresser la baisse de fécondité spatialement, que les simulations où l'influence est mise de côté.

## **2) Travaux sur les processus de « diffusion d'opinion »**

Les SMA peuvent être utilisés pour ce qui est appelé la « diffusion d'opinion ». Il ne s'agit pas à proprement parler de baisse de fécondité, mais plus largement de la diffusion d'une idée. Les résultats de ce type de travaux nous intéressent car ils concernent les processus de la diffusion de l'innovation, bien que la plupart ne le traitent pas, ou le fassent de manière simplifiée, de l'espace. Dans la suite de cette partie, plusieurs articles sont cités. Tous utilisent les SMA pour tenter de résoudre leur problématique mais ce sont leurs résultats qui nous intéressent.

Des recherches sont effectuées dans le domaine du marketing [Delre S.A., Jager W., T.H.A. Bijmolt, M.A. Janssen, 2007], l'objectif étant de tester l'efficacité de plusieurs stratégies sur le lancement d'un produit. L'attention est surtout portée sur le ciblage et le timing de la promotion publicitaire.

Les sociétés lancent de nouveaux produits sur le marché. L'intérêt pour elles est de savoir quand et comment cibler sa publicité pour que son produit soit une réussite car environ 50% des nouveaux produits demeurent de purs échecs et plus de 70 % n'atteignent pas leurs buts en terme de ventes. De nombreux fiasco se produisent dans les étapes initiales. La publicité représente l'influence externe de la figure 10, alors que l'influence interne est dominée par les influences sociales : ce sont les décisions individuelles dont dépendent les autres consommateurs. On se rend compte qu'avec les petits groupes, la diffusion fonctionne grâce à l'influence sociale. Là encore, la courbe logistique est utilisée pour représenter la « pénétration du marché » : le nombre de personnes ayant adopté le nouveau produit.

La publicité peut cibler plusieurs types de personnes. Tout d'abord, plusieurs petits groupes situés à des endroits éloignés du marché potentiel puis le ciblage d'un petit nombre de gros groupes d'individus. Il existe donc deux stratégies promotionnelles :

- « throwing rocks » : La société cible un ou plusieurs des gros groupes de consommateurs en espérant créer une pression sociale.
- « throwing gravels » : Dans ce cas là, l'entreprise distribue le nouveau produit à de nombreux petits groupes pour répandre le plus d'information possible sur le produit.

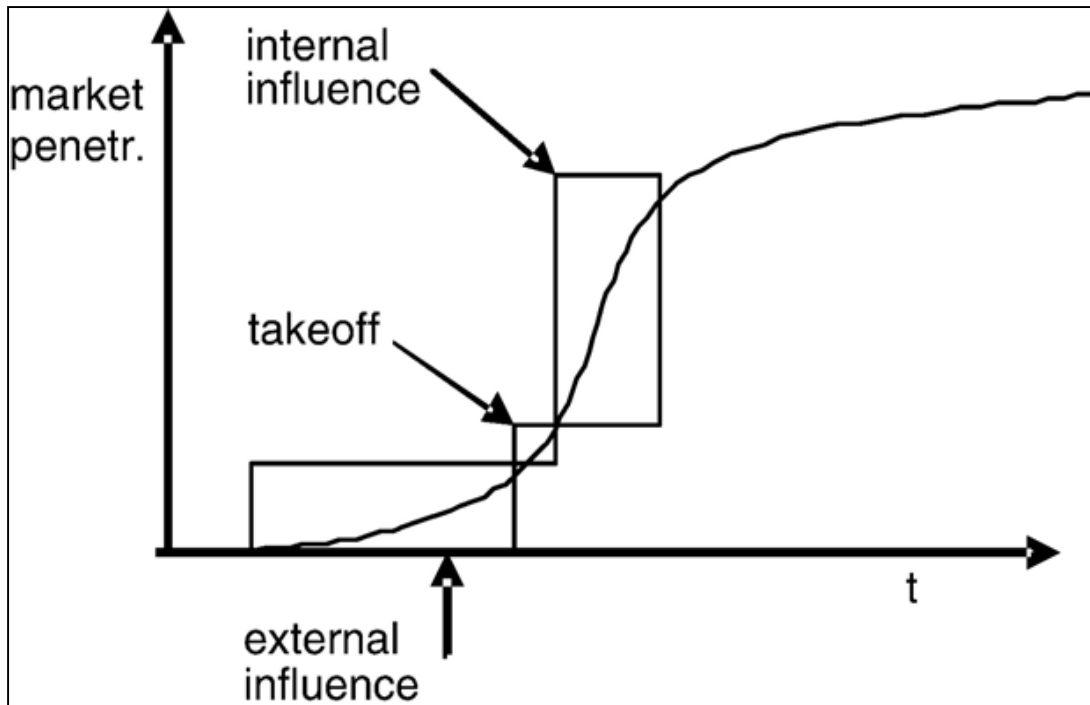


Figure 10 : Les différentes influences lors de la diffusion  
 Source : Schéma tiré de [Delre, Jager, Bijmolt, Janssen, 2007]

Dans le modèle proposé, les agents représentent les consommateurs, reliés entre eux par des liens. Le réseau est essentiellement régulier, à savoir que les agents sont fortement clustérisés, avec très peu de liens aléatoires. A chaque pas de temps, s'il communique avec d'autres agents ayant déjà acquis le nouveau produit, l'agent décide s'il adopte ou non le produit. Il adopte le produit si l'utilité obtenue par la consommation de ce produit est supérieure au niveau minimum d'utilité demandée par l'agent. Dépassé un certain seuil d'adoptants, les agents privilégieront l'influence sociale plutôt que leur seuil personnel.

L'article montre bien que le timing et le ciblage des promotions composent un élément crucial de la réussite d'une diffusion. Le timing des activités promotionnelles garde un rôle stratégique dans le décollage de la pénétration du marché et de surcroît dans la réussite du nouveau produit. Les résultats montrent que la stratégie optimale est de viser les petits groupes de consommateurs éloignés. Une campagne trop forte à la suite du lancement du produit engendre une « mort » de l'innovation. De la même façon, une campagne faible et trop tardive sera synonyme d'inefficience. Ainsi, une grosse campagne de « mass media » doit être employée avant le lancement du produit, puis des campagnes doivent être faites ultérieurement, mais beaucoup plus faible que la première.

Dans cet article, les auteurs précisent également une faiblesse principale du modèle SMA à savoir le manque de calibrage par des enquêtes et des expériences.

Sylvie Huet, Guillaume Deffuant et Wander Jager ont étudié les conséquences des différences individuelles sur le global [Huet, Deffuant et Jager, 2007]. Les auteurs se basent sur les théories de diffusion de l'opinion et plus particulièrement sur le modèle à

« confiance limitée ». Ce dernier considère que deux individus se rapprochent quand leur différence est inférieure à un certain seuil, dans le cas contraire ils ne s'influencent pas. Le but de cet article est de considérer un effet que peu de modèle de dynamique d'opinion prennent en compte : le rejet.

Ainsi, le modèle présenté dans l'article ajoute une opinion, impliquant la présence de deux opinions par individu, mais également un module de rejet. C'est-à-dire que lors de la rencontre de deux individus, ils s'éloignent sur une opinion s'ils ne sont pas d'accord sur la première opinion, mais proche sur la deuxième. La grande hypothèse de ce modèle est que « lorsque deux individus sont fortement en désaccord sur une première dimension alors même que ces individus sont proches sur la seconde dimension, ils réduisent leur dissonance en s'éloignant sur la dimension où ils sont proches » [Sylvie Huet, Guillaume Deffuant et Wander Jager, 2007 : p.2]. Dans le cas où les deux opinions sont éloignées ou proches toutes les deux, le modèle à « confiance limitée » s'applique.

Les résultats produisent plusieurs différences avec le modèle à « confiance limitée ». Dans un premier temps, plusieurs groupes métastables tendent à se rejeter les uns les autres. Certains groupes sont même poussés aux limites du « domaine d'attitude ». Pour conclure, « l'introduction d'un mécanisme individuel de rejet engendre un nombre de groupe final plus faible, autrement dit un conformisme plus fort dans la population. [...] Le modèle de rejet génère des hétérogénéités locales et de la diversité liée à la métastabilité » [Sylvie Huet, Guillaume Deffuant et Wander Jager, 2007 : p.9].

En 2000, J. Sznajd publie un article où il expose son modèle d'évolution d'opinion dans une communauté fermée [Sznajd-Weron K., Sznajd J., 2000]. Il considère une population qui doit voter pour un président dans un système à deux partis. Le but de l'article est d'observer la différence notée «  $m$  » entre les votants pour le candidat A et pour le candidat B. Une chaîne d'individus se met en place. Les dynamiques d'opinion sont les suivantes : si un agent «  $i$  » et son suivant sur la chaîne des individus (par conséquent l'agent «  $i + 1$  ») vote pour le même candidat, alors que l'agent «  $i - 1$  » et l'agent «  $i + 2$  » voteront la même chose que l'agent «  $i$  » et «  $i + 1$  ».

Par contre, si l'agent «  $i$  » ne vote pas la même manière que l'agent «  $i+1$  », alors l'agent «  $i - 1$  » votera comme l'agent «  $i + 1$  » et l'agent «  $i + 2$  » pareil que l'agent «  $i$  ».

Trois états d'équilibre sont alors possibles avec ces règles dynamiques : soit 100 % de votants pour A, soit 100 % de votants pour B, soit 50 % pour l'un et pour l'autre. Les résultats indiquent que dans 25 % des cas, il n'y a que des votants pour A, dans 25 % des cas il n'y a que des votants pour B et dans 50 % des cas, il y a 50 % des votants pour A et 50% des votants pour B.

Pour interpréter l'évolution de la différence «  $m$  », les auteurs utilisent l'outil de l'autocorrélation sur le temps. Ils appellent l'effet « amazing » le fait qu'un individu puisse changer d'opinion au temps «  $t$  » puis changer à nouveau au temps «  $t+1$  », rendant compte du fait qu'un seul changement reste capable de provoquer une « avalanche ». Un facteur

est testé : la proportion au départ de votants pour B (« Cb »). On se rend compte qu'une fois  $C_b > 70\%$ , alors la probabilité d'avoir 100 % de votants B à la fin de la simulation est supérieure à 0,5 %. Plusieurs conclusions sont tirées dans cet article. Dans une communauté fermée, l'état final n'a que deux possibilités : la dictature ou l'impasse. Pour gagner, un groupe doit être le plus possible au départ. Dans le cas d'une société ouverte, il y a des chances de prendre une décision de manière démocratique.

Ce modèle dit « de Sznajd », est réemprunté et modifié par C. Schulze en 2004 [Schulze, 2004]. Il modifie le modèle de la manière suivante : quand deux personnes à une certaine distance sont d'accord sur leurs opinions, ils essayent de convaincre leurs plus proches voisins. Un module global/local est également introduit dans le modèle. C'est-à-dire qu'à chaque itération, on sélectionne un certain nombre de paires d'agents de manière aléatoire, s'ils ont la même opinion, chacun d'entre eux convainc ses plus proches voisins. Si on introduit un modèle supplémentaire de type « confiance limitée », un agent ne pourra être affecté seulement par une opinion de différence + ou - 1 de sa propre opinion. La publicité est également utilisée, où chaque agent possède 10 % de chances d'adopter indépendamment une opinion. Dans le monde virtuel, il existe un nombre Q d'opinions. Au départ, les opinions sont réparties aléatoirement. L'association de l'interaction globale/locale reste de loin supérieure à l'interaction simple des plus proches voisins.

Nous remarquons clairement que tous les travaux exposés précédemment ne prennent pas en compte l'espace. Maintenant que nous avons exposé les différents apports des recherches sur la diffusion de l'innovation par les systèmes multi-agents, expliquons en détail notre modèle.

## **II) Construction et justification d'un modèle individu-centré**

### **A) Hypothèses, choix et objectifs**

Le modèle multi-agents comporte de nombreuses hypothèses, conduisant à des choix. La justification de chacun d'entre eux est primordiale pour bien saisir le contenu du modèle.

Mais avant cela, il est nécessaire de rappeler en quoi consiste un modèle. Au sens de François Durand-Dastès, « un modèle est une représentation schématique de la réalité élaborée en vue d'une démonstration ». La simplification du réel reste le point essentiel d'un modèle. En conséquence, toutes les dynamiques et tous les mécanismes ne sont pas pris en compte.

La baisse de fécondité en Inde peut être assimilée à une diffusion spatiale spécifique à la fécondité car le phénomène n'est pas seulement ancré à la géographie historique et sociale de l'Inde, mais semble plus fortement organisé autour du principe de proximité spatiale [Guilmoto C.Z., 2005]. Notre modèle part de l'hypothèse que l'hétérogénéité des comportements individuels demeure le moteur du processus de diffusion. Ainsi, vient la nécessité d'étudier le phénomène à l'échelle individu-centrée, parce que la majorité des études faites sur la baisse de fécondité en Inde ont été effectuées à l'échelle agrégée (cf. Chapitre 1, III). De plus, l'importance primordiale de la prise en compte du réseau social dans les modèles de diffusion de l'innovation [Steyer A., Zimmermann J.B., 2004] justifie également l'intérêt de penser le phénomène à l'échelle individu-centrée.

Les SMA sont de bons outils pour simuler les phénomènes de diffusion spatiale, telles que l'innovation ou les épidémies [Daudé E., 2003 ; Langlois P., Daudé E., 2004 ; Langlois P., Daudé E., 2007]. Pour ce dernier cas, nous pouvons citer comme exemple les études menées sur la peste à Madagascar [Badariotti D., Banos A., Laperriere V., 2005] ou encore le rôle des mobilités dans le cas virtuel d'une épidémie en ville [Eliot E., Daudé E., 2005 ; Eliot E., Daudé E., 2006]. Notre modèle se donne donc pour objectif de comprendre les processus de la baisse de fécondité en Inde.

Premièrement, il se limitera à un espace virtuel, et non à la reproduction d'un espace particulier tel un district ou une région indienne. La raison de ce choix tient essentiellement aux limites matérielles informatiques actuelles, notamment pour les temps de calculs. En effet, les ordinateurs actuels ne permettent aucunement de simuler une diffusion spatiale telle que nous la concevons dans ce modèle, avec un milliard d'agents. Contrairement au modèle de Sznajd, les agents sont spatialisés.

Nous émettons également l'hypothèse selon laquelle Lorsque Chris Wilson et Gilles Pison établissent le constat que la diffusion est un processus par lequel les comportements démographiques sont affectés par ceux des gens avec qui un individu est en contact. Ainsi, nous postulons que les réseaux d'interactions des individus sont formés par la proximité sociale et spatiale [C.Z. Guilmoto, 2005], et qu'ils composent le moteur principal de la diffusion du nouveau comportement malthusien. Une analogie peut être faite établie avec

les pratiques de discrimination de genre en Inde, déterminées premièrement par la proximité géographique, et de manière secondaire par la proximité sociale [Guilmoto C.Z., 2008]. Il serait intéressant de regarder si le même phénomène est observable avec la baisse de fécondité simulée à l'échelle individuelle.

A partir de cette hypothèse, le modèle met particulièrement l'accent sur la manière dont se forment ces réseaux d'interactions, et laissent de côté la prise en compte de la propagande étatique de contrôle de natalité. De cette manière, les agents sont différenciés dans un premier temps par leur religion. Nous n'en considérons que quatre : l'hindouisme, la communauté tribale, l'islam et le christianisme. Bien évidemment, nous sommes conscients du fait qu'il en existe d'autres en Inde, mais ne sont choisies que les quatre religions représentatives dans la société indienne.

La proximité sociale est donc retranscrite à travers les communautés religieuses : un individu ressemble socialement à un autre individu s'ils appartiennent tous les deux à la même communauté religieuse. Nous ne prenons pas en compte le système de castes ou distinction de genre entre les agents, les rendant alors asexués, comme dans le modèle de S. Gonzalez-Bailon et T. Murphy. De la même manière, les dynamiques de mariages et de stérilité ne sont pas considérées. Ces choix représentent des simplifications du réel.

Nous émettons l'hypothèse selon laquelle il existe une différence de réaction face à l'innovation sociale de comportement malthusien de fécondité entre les différentes religions. En effet, nous considérons qu'un musulman aura moins de chance d'adopter l'idée de faire moins d'enfants qu'un hindou. Ainsi, dans le modèle, l'hindouisme et le christianisme sont appelés des religions de type A, alors que l'islam et la religion « tribale » sont des religions de type B. Les agents de religion type A auront globalement plus de chance d'adopter l'innovation démographique que les agents de religion type B. En fonctionnant de cette manière, les agents de religion type B ne sont pas considérés comme des individus possédant plus de chances d'avoir une haute fécondité, mais simplement comme moins enclin à modifier leurs comportements de fécondité : cela permet d'éviter tout déterminisme des agents.

Le modèle ne se limitera pas à une simple diffusion d'opinion, mais prendra en compte l'effet direct de la diffusion sur le taux de fécondité de l'espace virtuel. Pour cela, les agents pourront se reproduire et « donner naissance » à d'autres agents. Le système de reproduction sera conçu de manière simplifiée. Tous les agents donnent naissance à des enfants, simplement avec des probabilités différentes selon les agents. On ne prend pas en compte la possibilité qu'un agent ne puisse pas avoir d'enfants.

Dans le modèle, l'alphabétisation est une variable à part entière, mais les mécanismes d'alphabétisation progressive de la population ne sont pas intégrés. Ainsi, une fois un taux d'alphabétisation choisi au début d'une simulation, le seul moyen pour un agent d'être alphabétisé est d'avoir des parents alphabétisés. Nous savons pertinemment qu'il ne s'agit aucunement de la réalité des choses, mais nous simplifions le réel car a priori les processus d'alphabétisation n'intéressent pas les mécanismes de diffusion de la baisse de fécondité.



De la même façon, les probabilités d'adoption données dans le modèle ne sont aucunement basées sur des données réelles. Il ne s'agit que d'un paramètre variable.

Nous justifions le fait qu'il n'y ait pas plus de variables mises en jeu par le fait que certaines de ces variables sont fortement corrélées entre elles statistiquement : il s'agit d'une redondance d'information. Deuxièmement, il reste difficile de connaître les effets de chaque variable socio-économique à l'échelle individuelle. En somme, une variable socio-économique ajoutée à celles déjà présentes ne ferait que modifier la probabilité d'adoption des agents, mais ne changerait pas fondamentalement le modèle. Ainsi, lorsque nous prenons en compte l'alphabétisation, il sera difficile de réellement tirer des conclusions sur le rôle de l'alphabétisation car elle agira seulement sur les probabilités d'adoption des agents.

De la même manière, le temps présent dans les systèmes multi-agents ne représente pas le temps réel. Il est juste bon pour comparer les simulations entre elles, mais ne peut en aucun cas être assimilé à un temps réel de diffusion. Cette vision simpliste du facteur temps peut représenter une faiblesse du modèle et nous nous en rendons bien compte, malgré l'importance qu'il représente dans l'étude des phénomènes complexes de diffusion [Amblard F., Dumoulin N., 2004]. De la même manière, le timing et le ciblage énoncés par M. Edwards, S. Huet, F. Goreaud et G. Deffuant, ne sont pas pris en compte du fait de la non-présence d'une quelconque propagande ou publicité dans le modèle.

Finalement, l'objectif sera d'analyser quelles sont les variables les plus influentes sur la diffusion du nouveau comportement démographique.

## **B) La structure du modèle de base**

Pour comprendre le modèle de base, nous choisissons d'exposer tous ses différents aspects en abordant d'abord les variables, dans un deuxième temps les caractéristiques des agents, puis l'initialisation, et pour terminer le déroulement d'une simulation. A noter que le modèle décrit par la suite a été codé sous le logiciel NetLogo, et la programmation se trouve à l'annexe n°41.

### **1) Les variables**

Le nombre de variables est fixé à dix. Etudions-les une par une.

La première variable est le nombre d'agent de chaque religion. Ainsi, le simulateur peut choisir le nombre d'hindous, de tribaux, de musulmans et de chrétiens pour chacune de ses simulations. Bien évidemment, le nombre d'agents de chaque religion peut être différent. Par exemple, pour une simulation, il est possible de disposer 400 agents de religion « tribale » et « hindouiste », mais seulement 100 agents de religion « musulmane » et 50 agents de religion « chrétienne ». De cette façon, le modèle fournit au simulateur la

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

possibilité de personnaliser son espace virtuel en termes de présence religieuse et de proportion d'agents.

La deuxième variable est le taux de fécondité. Elle représente, pour un tour de simulation, la proportion de nouveau-nés par rapport au nombre d'agents au début du tour, et cela quelle que soit la religion des agents. Prenons un exemple : il y a 10 000 agents au début d'un tour de simulation, qui font naître 400 agents. Le taux de fécondité est dans ce cas-là de 40 pour mille (ou 4 %). Avec cette variable, le simulateur décide de la valeur exacte de la reproduction des agents de son espace virtuel.

Le taux de mortalité constitue la troisième variable. Elle montre, pour un tour de simulation, la proportion d'agents qui meurent par rapport au nombre d'agents présents au début du tour. Ne sont pas considérés par le taux de mortalité, les agents mourant en atteignant l'âge de 50 ans.

Si 100 agents meurent alors qu'il y avait 20 000 agents au début du tour, le taux de mortalité est de 20 pour 1000 (ou 2 %). Le simulateur, de la même façon que le taux de fécondité, peut choisir la proportion d'agents qui meurent à chaque tour et donc de personnaliser un système de génération selon le choix des valeurs de ces deux variables.

La quatrième variable est la probabilité d'adoption. Cette variable représente le nombre de chances que les agents de l'espace virtuel ont d'adopter un message malthusien quand il leur en est communiqué par un de leurs contacts. Imaginons un cas où la variable est fixée à 4%. De cette façon, lorsqu'un agent reçoit un message anti-nataliste de la part d'un agent appartenant à son réseau de connaissances et ayant adopté le nouveau comportement démographique, il possède 4% de chances d'adopter le message.

La cinquième variable est la différence entre religions. Cette variable propose au simulateur la possibilité d'introduire une différence entre les religions de type A et de type B. La valeur choisie pour cette variable représente la différence entre les probabilités d'adoption des agents de religion type A et les agents de religion type B. Par exemple, si la différence entre religions est fixée à 12 %, cela veut dire que les agents de religion type A et les agents de religion type B posséderont des probabilités d'adoption d'un écart de 12 %, par exemple 2 % et 14 %. Quand la variable est fixée à 0 %, par conséquent il n'y a aucune différence entre les probabilités d'adoption des agents, quelle que soit leur religion.

La sixième variable est le nombre de liens. Il s'agit ici de déterminer de combien d'agents seront composés les réseaux individuels de chaque agent de l'espace virtuel. Un nombre de liens fixé à cinq veut dire que chaque agent possèdera son propre réseau, composé de cinq autres agents. En toute logique, le nombre de liens montre également le nombre d'agents avec qui l'agent pourra communiquer.

La septième variable est le pourcentage de contacts intracommunautaires. Elle représente la proportion d'agents de même communauté religieuse parmi le réseau de chaque agent de l'espace virtuel. Par exemple, si le nombre de liens est fixé à 10 et le pourcentage de contacts intracommunautaires à 50 %, cela implique qu'un agent aura un réseau de connaissance de 10 agents, dont 5 de la même communauté religieuse, et par conséquent 5 agents d'une autre communauté religieuse que la sienne.

La huitième variable est la distance des liens. Cette variable représente la distance maximale pour qu'un agent fasse partie du réseau de connaissance d'un autre agent. Par exemple, si la distance des liens est fixée à 6, cela veut dire qu'un agent ne peut prendre dans son réseau que des agents se trouvant dans un rayon de 6 patches autour de lui. En sachant que le monde virtuel fait 32 patches de largeur et de longueur, et qu'il est considéré comme fermé, si la variable est fixée à 16, alors un agent peut prendre n'importe quel agent du monde virtuel dans son réseau de connaissance. La notion de distance dans ce cas précis est alors biaisée.

La neuvième variable est le pourcentage d'alphabétisation, qui fixe la proportion d'agents considérés comme alphabétisés au début de la simulation.

La dernière variable est l'influence de l'alphabétisation. Lorsqu'un agent est alphabétisé, sa probabilité d'adoption sera multipliée par la valeur prise par cette variable. Par exemple, si la variable « influence de l'alphabétisation » est fixée à deux, cela veut dire qu'un agent alphabétisé verra sa probabilité d'adoption multipliée par deux, contrairement à celle d'un agent non alphabétisé qui ne sera pas modifiée.

Les agents créés par la suite, seront liés aux valeurs prises par ces différentes variables. En effet, chaque agent possède un profil particulier, avec des caractéristiques déterminées par les variables ci-dessus.

## 2) Les caractéristiques des agents

Chaque agent possède dix caractéristiques.

- Type d'agent : cette caractéristique renseigne si l'agent a adopté le message (type B) ou non (type A). Tous les agents commencent la simulation en tant qu'agent de type A. Une fois qu'ils adoptent le message, ils deviennent agent de type B.
- Religion : Chaque agent possède une religion parmi l'hindouisme, le christianisme, la communauté tribale et l'islam.
- Alphabétisé : Un agent est soit alphabétisé soit non alphabétisé.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

- Age : Chaque agent possède un âge, qui progresse au fur et à mesure de la simulation.
- Probabilité d'avoir un enfant : cette valeur est la même que le taux de fécondité. C'est-à-dire qu'un agent, à chaque tour de simulation, a 6 chances sur 1000 d'avoir un enfant pour un taux de fécondité fixé à 6 pour mille.
- Probabilité d'adoption : La probabilité d'adoption n'est pas la même s'il s'agit d'un agent de religion de type A ou de type B. Pour un agent de religion de type A, la probabilité d'adoption est obtenue grâce au calcul suivant, qui fait appel à la variable « Probabilité d'adoption » et « Différence entre religion » :

$$[\text{« Probabilité d'adoption »} + (\text{« différence entre religion »} / 2)]$$

Par contre, s'il s'agit d'un agent de religion type B, le calcul est le suivant :

$$[\text{« Probabilité d'adoption »} - (\text{« différence entre religion »} / 2)]$$

- Nombre d'enfants : il s'agit du nombre d'enfants que possède chaque agent. Dès qu'un agent fait un enfant, cette caractéristique augmente de 1.
- Nombre d'enfants maximum : cet attribut montre le nombre d'enfants idéal de l'agent. Il s'agit d'une limite que l'agent ne pourra pas dépasser : il n'est pas possible qu'un agent ait plus d'enfants que cette caractéristique.
- Nombre de liens même religion : il s'agit du nombre d'agents de la même communauté religieuse qui feront partie du réseau de l'agent en question. Ce sera le résultat de l'opération suivante qui utilise les valeurs des variables « Pourcentage contact intracommunautaires » et « Nombre de liens » :

$$[\text{« Pourcentage contact intracommunautaires »} * (\text{« nombre de liens »} / 100)]$$

- Nombre de liens autre religion : il s'agit du nombre d'agents d'une autre communautés religieuses qui feront partie du réseau de l'agent en question. Ce sera le résultat de l'opération suivante :

$$[\text{« Nombre de liens »} - \text{« nombre de liens même religion »}]$$

### 3) La phase d'initialisation

Le modèle démarre par une phase d'initialisation, elle-même composée de trois étapes.

La première est la création des agents. Le programme crée un nombre d'agents de chaque religion correspondant à la variable liée. Une fois les agents créés, ils sont placés de manière aléatoire dans l'espace virtuel. Ensuite, les caractéristiques individuelles de chaque agent sont fixées selon les variables déterminées au départ. Tous les agents sont de type A, c'est-à-dire qu'aucun n'a adopté le message.

La deuxième étape met en place le système social. Concrètement, un réseau est créé pour chaque agent, selon les caractéristiques « Nombre de liens même religion », « Nombre de liens autre religion » et la variable « distance des liens ». Le programme crée des liens entre l'agent et X agent de même religion, Y agent de religion différente et se trouvant dans un rayon Z.

La dernière étape consiste à choisir un agent au hasard, et qu'il devienne un agent de type B, autrement dit qu'il adopte le message. Par conséquent, il commencera à communiquer l'innovation à partir du tour suivant.

#### **4) Le déroulement d'un tour de simulation**

Une fois initialisé, le programme est prêt à effectuer une simulation. A chaque tour de simulation, il exécute trois modules successifs : la communication, la reproduction et la mort.

Le premier représente le moment où les individus parlent entre eux. Les individus ayant déjà adopté le comportement démographique essaient de convaincre les autres individus auxquels ils sont reliés. Pour simplifier le programme en terme de temps de calcul, on considère que seuls les agents de type B communiquent. C'est-à-dire qu'un agent de type A reçoit un message anti-nataliste pour chaque agent de type B qu'il possède dans son réseau. Pour prendre un exemple, regardons la figure 11. Recevoir un message, pour un agent de type A, revient à faire un test de probabilité. En effet, cela permet de tester si l'individu, une fois qu'il a reçu le message malthusien, adopte le message ou non. Le test se fait sur la probabilité d'adoption de l'agent. Un nombre est tiré aléatoirement entre 0 et 100. S'il est inférieur à la probabilité d'adoption, alors le test réussit, engendrant une adoption du message de la part de l'agent. En conséquence, il devient un agent de type B. Ses caractéristiques sont alors modifiées : sa « probabilité de faire un enfant » et son « nombre d'enfants maximum » sont divisés par deux. Cette modification symbolise l'action directe de l'agent sur sa fécondité : il revient à la baisse le nombre idéal d'enfants pour une famille et essaie de réguler sa fécondité par des moyens de contraception. L'agent ayant adopté le message pourra communiquer le message à son réseau à partir du tour suivant. Par contre, si le test échoue, l'agent reste agent de type A et n'adopte pas le message.

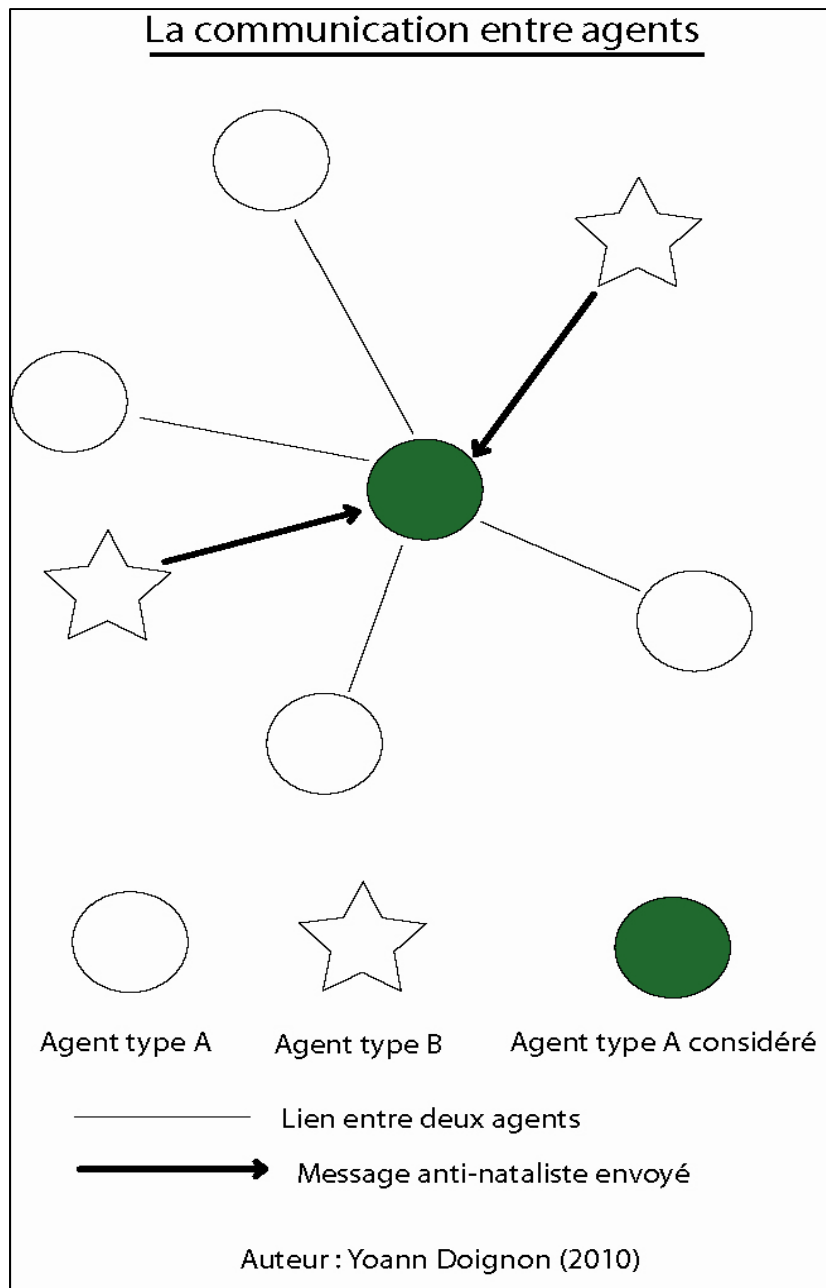


Figure 11 : La communication entre agents  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

Le deuxième module aborde la reproduction concrète des agents. Pour qu'un agent puisse se reproduire, il faut qu'il réunisse deux conditions. Tout d'abord qu'il ait un âge entre 20 et 40 ans. Ce choix d'âge se justifie principalement par le fait que cet intervalle revient à l'âge moyen observé pour avoir un enfant. La deuxième condition est que le « nombre d'enfants » de l'agent soit strictement inférieur à son « nombre d'enfants maximum ». Si ces deux conditions sont remplies, alors sur le même mode de fonctionnement que les tests d'adoption du message, l'agent fait un test sur sa « probabilité de faire un enfant » pour réussir à se reproduire à ce tour de la simulation. Si le test échoue, il ne se passe rien. Si le test réussit, l'agent augmente son « nombre d'enfants » de un et un nouvel agent est créé à proximité de l'agent d'origine. Le nouvel agent possèdera les mêmes caractéristiques que

l'agent d'origine à l'exception de quelques-unes qui sont réinitialisées. Tout d'abord l'âge et le nombre d'enfants qui sont fixés à zéro. Ensuite, les caractéristiques « Nombre de liens même religion » et « Nombre de liens autres religions » seront recalculées en fonction du nombre d'agents présents dans le rayon fixé par la variable « Distance des liens ». La dernière étape consiste à créer le réseau du nouvel agent, de la même manière que lors de l'initialisation.

Ce module de reproduction est soumis à tous les agents.

Le troisième module n'est autre que la mort des agents. Tous les agents meurent lorsqu'ils atteignent l'âge de 50 ans. Mais pour représenter les morts intervenant avant, chaque agent effectue un test sur le taux de mortalité. Si le test échoue, rien ne se passe, mais s'il réussit, alors l'agent meurt prématurément, quelque soit son âge.

Le modèle créé fonctionne comme expliqué ci-dessus. Cependant, pour étudier la thématique de la diffusion du comportement malthusien, nous choisissons de décliner ce modèle de trois façons différentes, afin d'obtenir trois types de diffusion différentes.

### Les variables fixées au départ de la simulation

- Nombre de musulmans
- Nombre de tribaux
- Nombre de chrétiens
- Nombre d'hindous
- Taux de fécondité
- Taux de mortalité intracommunautaire
- Probabilité d'adoption
- Nombre de liens
- Pourcentage d'alphabétisation
- Influence de l'alphabétisation
- Distance des liens
- Pourcentage de contacts

### Les attributs de chaque agent

- **Type d'agent** : type A : qui n'a pas adopté le message / type B : qui a adopté le message
- Religion
- Alphabétisé (ou non)
- Âge
- **Nombre d'enfant** : Nombre d'enfant que possède l'agent. Au départ, fixé à zéro
- **Nombre d'enfant maximum** : Il s'agit du nombre d'enfant idéal que l'agent ne pourra pas dépasser
- **Probabilité d'avoir un enfant** : Fixé par la variable "taux de fécondité"
- **Probabilité d'adoption** : Fixé par la variable "probabilité d'adoption"
- **Nombre de liens autre religion** : Il s'agit du nombre d'agents des autres communautés religieuses auquel sera relié l'agent. La valeur est fixé par le calcul suivant : ("Pourcentage de contacts intracommunautaire") \* [("Nombre de liens")/100]
- **Nombre de liens même religion** : Il s'agit du nombre d'agents de la même communauté religieuse auquel sera relié l'agent. La valeur est fixé par le calcul suivant : ("Pourcentage de contacts intracommunautaire") \* [("Nombre de liens")/100]

### Initialisation

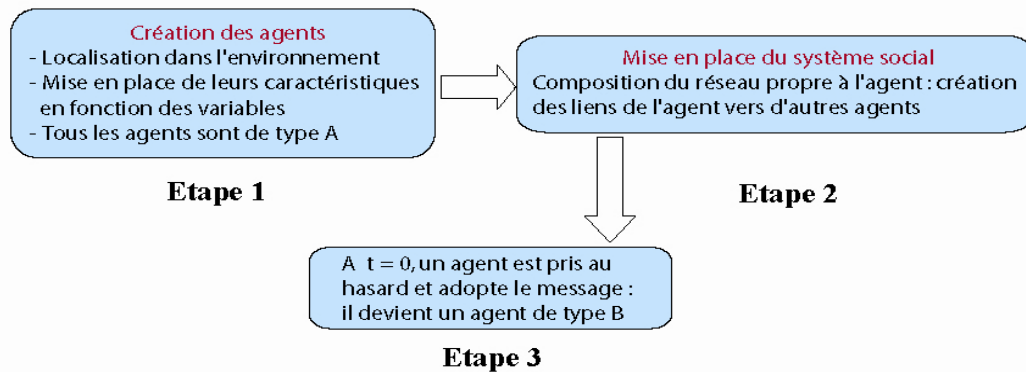


Figure 12 : Structure du modèle et initialisation

Auteur : Yoann Doignon, 2010



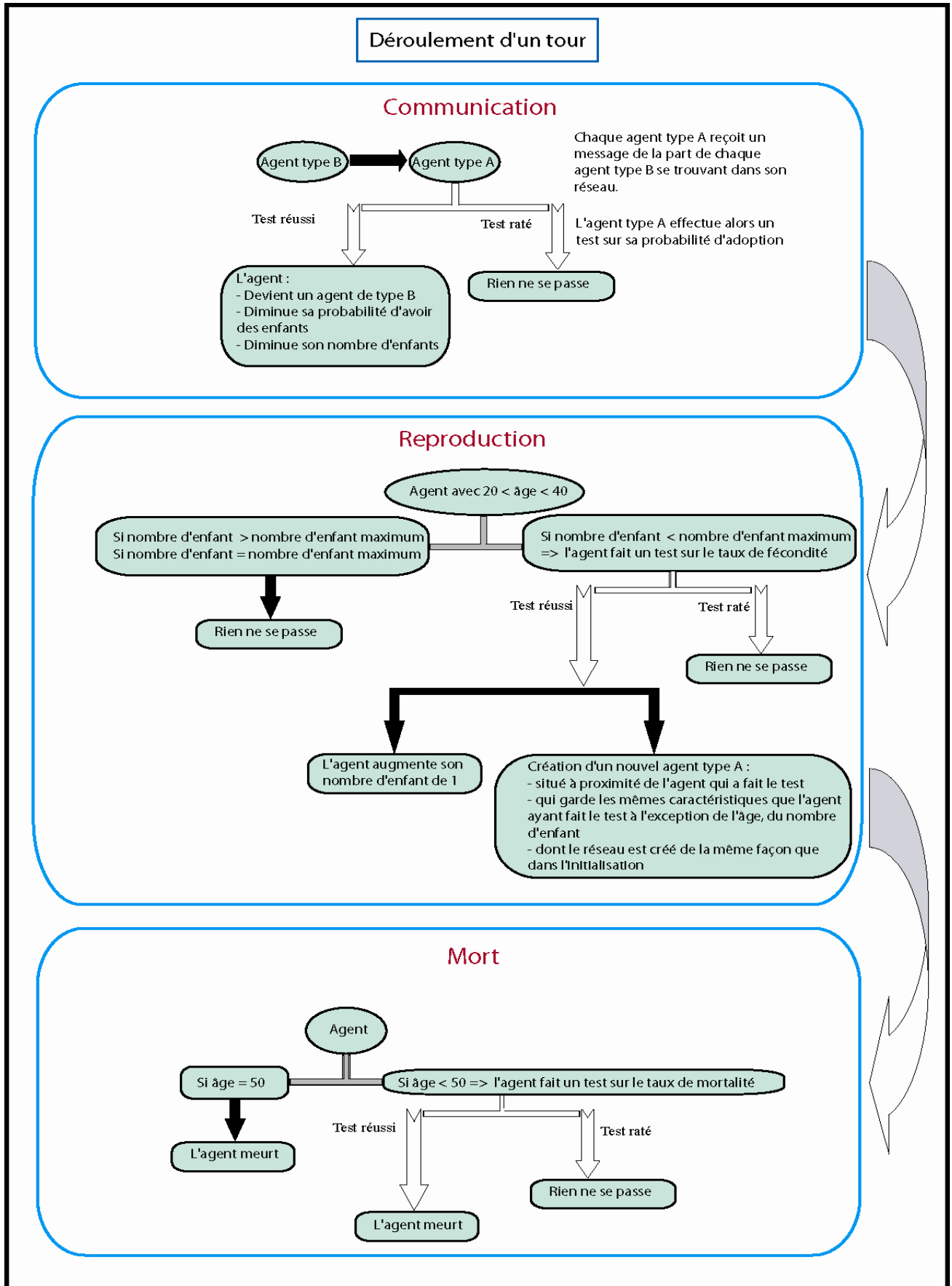


Figure 13 : Déroulement d'un tour de simulation  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### **III) Les déclinaisons du modèle de base**

Plusieurs types de diffusion ont été testés : tout d'abord, la diffusion avec création aléatoire de liens dans un espace à agents homogènes, puis la diffusion avec création aléatoire de liens dans un espace à agents hétérogènes. Pour terminer, nous étudions la diffusion avec création de liens selon une distance dans un espace à agents hétérogènes.

#### **A) Diffusion avec liens aléatoires parmi des agents homogènes**

Dans ce type de diffusion, la variable « distance des liens » est fixée au maximum, c'est-à-dire à 16. Lors de la phase de création des réseaux, un agent peut être relié à n'importe quel agent de l'espace virtuel. De cette manière, la distance n'intervient pas dans la création des liens.

La variable « Différence entre religions » sera fixée à zéro, de manière à ce qu'il n'y ait aucune différence entre les agents de religion type A et type B.

Ce type de diffusion est l'occasion de tester le modèle dans son fonctionnement et d'avoir une première idée de l'influence de chaque variable sur la diffusion.

#### **B) Diffusion avec liens aléatoires parmi des agents hétérogènes**

Ici encore, la distance n'intervient aucunement dans la création des liens. Par contre, la différenciation avec la diffusion précédente réside dans l'hétérogénéité des agents de religion différente : la variable « Différence entre religions » prendra une valeur strictement positive. De fait, les agents de religion de type A et de type B n'auront pas la même probabilité d'adoption. Avec ce type de diffusion, le simulateur pourra apprécier l'hétérogénéité (en termes de probabilité d'adoption du message) dans une diffusion avec liens aléatoires. Cela lui permettra de comparer ce type de diffusion avec le précédent.

#### **C) Diffusion prenant en compte la contrainte spatiale parmi des agents hétérogènes**

Dans ce dernier type de diffusion, les agents seront hétérogènes, comme dans le précédent. La distance, par contre, interviendra dans les liens. La variable « distance des liens » sera toujours strictement positive. Les agents ne pourront alors constituer leurs réseaux qu'avec des agents situés dans un rayon spécifiquement précisé par le simulateur : la création de liens sera contrainte par la distance. Avec cette diffusion, nous nous attendons à observer des formes spatiales, par l'introduction d'une limitation par l'espace. Si un agent ne peut communiquer, donc diffuser l'innovation, uniquement à des agents situés à une certaine distance de lui-même, le front de diffusion sera sûrement identifiable, tout comme d'autres phénomènes spatiaux.



## **Chapitre 3 : Résultats et interprétations**

Dans ce chapitre, nous simulerons les trois diffusions exposées à la fin du chapitre précédent. Les résultats obtenus seront interprétés quantitativement. D'abord, nous expliquerons la démarche de simulation, c'est-à-dire comment les simulations sont effectuées. Puis, les résultats seront mis en avant et approfondis, pour terminer sur les formes spatiales visibles dans les simulations.

### **I) Quelles simulations effectuer ? Que mesurer ?**

Avant de commencer une quelconque simulation, il convient de se poser plusieurs questions. Précédemment, nous avons posé comme objectif d'étudier l'influence des différentes variables sur la diffusion, cependant, nous pouvons nous demander de quelle manière il est possible de le faire.

#### **A) Méthodologie de simulation**

##### **1) Comment apprécier une diffusion ?**

Dans une diffusion, deux aspects apparaissent importants : l'échec et la vitesse. Le premier prend en compte le fait qu'une diffusion échoue dans sa propagation. La vitesse, quant à elle, représente la capacité de la diffusion à se propager chez tous les individus. Deux diffusions sont alors comparables en terme de vitesse : une diffusion peut être plus rapide qu'une autre.

Le premier problème rencontré demeure les différents taux d'adoptions maximum. En effet, pour une diffusion donnée, le taux d'adoption atteint un maximum de 80 % des individus de l'espace virtuel, alors qu'en changeant une variable, il peut dépasser les 90 %. Mais pour les comparer au niveau de la vitesse, nous ne pouvons pas prendre en compte le temps qu'elles ont mis pour toucher 100 % des individus de l'espace virtuel, car la première diffusion n'en touche que 80% maximum.

De fait, comment mesurer la vitesse de diffusion dans une simulation ? De la même manière, comment apprécier l'échec d'une diffusion ?

Concernant l'échec, nous proposons d'établir un « pourcentage d'échecs ». Concrètement, il s'agit d'une proportion d'échecs sur un total de simulations. Les échecs peuvent être appréciés selon un taux d'adoption particulier. Nous nous rendons compte qu'une fois dépassé un taux d'adoption de 2%, une diffusion ne peut plus échouer. Nous considérerons qu'une diffusion n'arrivant pas à atteindre 2 % de taux d'adoption est une diffusion qui a échoué, et dans le cas contraire, une diffusion réussie. Par exemple, si nous effectuons 100 simulations, nous calculons la part d'échecs pour la convertir en pourcentage. Ainsi, il

nous sera possible de comparer les diffusions entre elles et en déduire des conditions initiales plus propices à l'échec de la diffusion que d'autres.

Pour la vitesse, la réflexion n'est pas si aisée. Du fait que les diffusions ne possèdent pas toutes les mêmes taux d'adoption maximum, il nous est impossible de les comparer en relevant le temps pour atteindre 100 % des agents. Un taux de 70 % est alors choisi. Ce choix se justifie par le fait que toutes les diffusions sont capables d'atteindre un tel taux d'adoption.

En conséquence, pour chaque diffusion est noté le temps nécessaire afin d'atteindre 70 % des agents. Cette vitesse permettra de comparer les différentes diffusions.

Maintenant que nous savons comment apprécier les notions de vitesse et d'échec d'une diffusion, analysons la méthodologie utilisée dans la phase de simulation.

## **2) La phase de simulation**

L'objectif reste de déterminer quelles sont les variables qui agissent le plus sur la vitesse et l'échec de la diffusion. Nous concevons alors une notion « d'influence ». Chaque variable peut prendre des valeurs différentes. Le « pourcentage de contacts intracommunautaires » par exemple, varie entre 0 % et 100 %. Selon la valeur prise, chaque variable est capable de faire varier la vitesse et l'échec d'une diffusion. Le but reste de calculer cette variation selon les valeurs de la variable. Prenons un exemple : si une variable arrive à faire varier la vitesse de diffusion du simple au double entre différentes valeurs prises, son taux de variation est de 100%. Si le taux est positif, cela veut dire que plus la variable augmente, plus la vitesse augmente. Quand le taux est négatif, plus la variable augmente, et plus la vitesse diminue. Qu'il soit négatif ou positif, plus le taux de variation est grand, plus forte est l'influence de la variable.

De par ce constat, toutes les simulations sont effectuées par la méthode « toutes choses égales par ailleurs ». Par conséquent, une variable est testée pour chaque valeur qu'elle peut prendre, sans que les autres variables ne soient modifiées. D'ailleurs, ces dernières prendront des valeurs moyennes, et non pas extrêmes. Par exemple, pour une variable testée, la variable « nombre de liens » ne prendra pas la valeur « 1 » ni « 30 », mais plutôt « 8 », afin de ne pas tomber dans un particularisme. Les valeurs moyennes choisies pour les variables non testées sont reprises dans le tableau n°1. De cette manière, chaque variable est simulée pour plusieurs valeurs. Pour les simulations de vitesse de diffusion, chaque valeur d'une variable est simulée 40 fois. Nous choisissons 40 simulations car la théorie des grands nombres fixerait le nombre de simulations à 30 pour que les résultats soient considérés comme significatifs. En fixant une série de simulations à 40, nous nous situons un peu au-dessus de cette limite théorique. A chaque simulation, lorsqu'il s'agit de la vitesse de diffusion, le simulateur note le temps qu'il faut pour atteindre un taux d'adoption de 70 %. Une fois la série de simulations terminée, on vérifie que la série est significative en s'assurant que la fréquence des résultats forme une courbe gaussienne, mais aussi par la valeur du coefficient de variation (écart-type divisé par la

moyenne). Lorsqu'un coefficient de variation est supérieur à 0,4, nous considérons que la série n'est pas significative, et une nouvelle série de simulations est lancée. Si la série est significative, nous faisons la moyenne des vitesses obtenues des 40 simulations. Ainsi, on possède une vitesse moyenne de la diffusion dans les conditions d'expérimentations fixées par le simulateur. En effet, cette moyenne représente le temps que met une diffusion pour atteindre un taux d'adoption de 70%, avec une configuration de variable particulière. Après cela, nous calculons le taux de variation de l'ensemble des vitesses moyennes de chaque valeur prise par chaque variable. Pour terminer, on compare les variables selon ce taux de variation. Pour la diffusion avec des individus homogènes, nous analyserons l'effet de masse. C'est-à-dire que pour chaque variable nous simulerons des diffusions avec 100 agents au départ, puis avec 400 agents. Pour les diffusions avec des agents hétérogènes, nous étudierons l'effet de la différence entre agents de religion de type A et de type B.

Pour résumer, nous effectuons une série de 40 simulations pour chaque valeur prise par chaque variable. Par exemple, pour la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires », nous choisissons cinq valeurs : 5 %, 25 %, 50 %, 75 % et 95 %. Pour chacune de ces valeurs, 40 simulations sont lancées avec 100 agents au départ de la simulation. Une valeur moyenne de vitesse est obtenue une fois que la significativité de la série est vérifiée par l'aspect gaussien de la fréquence et par le coefficient de variation. Nous possédons alors cinq valeurs moyennes de vitesse pour la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires ». A partir de là, le taux de variations des cinq valeurs est calculé, et représente la capacité de la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires » à faire varier la vitesse de diffusion avec 100 agents au départ. Le même protocole est répété mais, par contre, avec 400 agents au départ. Ainsi, il sera possible de conclure sur un possible effet de masse.

En ce qui concerne les échecs, le simulateur note si la diffusion arrive à dépasser un taux d'adoption de 2%, et dans ce cas il s'agit d'une réussite. Dans le cas contraire, il note que la diffusion échoue. Pour les échecs, les séries comportent 1000 simulations. Nous établissons alors un « pourcentage d'échecs », c'est-à-dire la proportion d'échecs des 1000 simulations. De la façon explicitée précédemment, chaque variable sera testée pour envisager son influence sur la diffusion. Mais toutes les étapes décrites sont à effectuer pour chacune des trois diffusions exposées de manière à comparer les influences de variables selon les types de diffusions. A présent, les aspects et la manière d'apprécier la vitesse et l'échec d'une diffusion sont connus. Le modèle décrit dans le chapitre 2 sera le modèle simulé selon un type de diffusion. Cependant, avant de commencer toute simulation, il faut s'assurer que le modèle est bien codé et que les principes de base fonctionnent, sans quoi les simulations effectuées par la suite risqueraient d'être inexploitables.

Valeurs moyennes choisies pour les simulations	
Contacts intracommunautaires (en %)	50
Alphabétisation (en %)	20
Influence alphabétisation	x 3
Nombre de liens	8
Probabilité d'adoption (en %)	4
Fécondité (en pour mille)	50
Mortalité (en pour mille)	20
Distance lien	5
Agents de religion A	200
Agents de religion B	200
Différence entre religion A et B (%)	1 / 10 / 12 / 14 / 15

Tableau 1 : Valeurs moyennes choisies pour les variables non testées

Auteur : Yoann Doignon, 2010

## **B) Calibrage et vérification du modèle**

Dans cette sous-partie, nous vérifions la justesse du modèle codé sous NetLogo. Seront également vérifiés les aspects vraiment nécessaires à la future étude à savoir le mécanisme de fécondité, le système de génération dans son ensemble (fécondité + mortalité) et pour terminer la diffusion où le taux d'adoption en fonction du temps doit correspondre à une courbe logistique.

### **1) Test de la fécondité**

Pour tester la fécondité, le principe est le suivant : avec une population de  $X_1$  individus au temps  $t = 0$ , et un taux de fécondité de  $X_2$  pour mille (noté PM dans la suite du texte), en théorie, on devrait atteindre  $X_3$  individus au bout de 100 pas de temps. Il s'agit d'une valeur théorique, mais si la fécondité est bien codée dans le modèle, alors le nombre d'individus au bout de 100 ticks devrait s'approcher de la valeur théorique. Bien évidemment, le taux de mortalité est fixé à 0 PM, et le code est modifié afin que les agents ne puissent pas mourir, pour ne tester que la fécondité. Dans le cas inverse, les valeurs théoriques ne seraient pas justes et impossibles à vérifier. On effectue trois séries de 30 simulations, dont les résultats sont représentés dans le tableau n°2. Pour chacune, nous relevons le nombre final d'agents. A la fin des 30 simulations, nous faisons une moyenne des relevés. Puis une autre série de 30 simulations est faite avec d'autres conditions initiales.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

Série de simulation n°	1	2	3
Nombre d'agents au départ	100	100	400
Taux de fécondité (PM)	20	60	30
Valeur théorique à 100 ticks	724	7900	7600
Moyenne des 30 simulations	720	7582	7476
Marge d'erreur (%)	0,55	4,03	1,63

Tableau 2 : Résultats des simulations pour le test de la fécondité  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

On peut clairement remarquer qu'avec moins de 5 % de marge d'erreurs, le système de fécondité mis en place dans le modèle peut être considéré comme fiable.

### 2) Test du système de génération

Précédemment, nous avons testé simplement la fécondité. Ici, est ajoutée la mortalité. Pareillement à la partie précédente, des valeurs théoriques sont obtenues selon le taux de fécondité, le taux de mortalité et le nombre d'agents au départ de chaque simulation. Nous effectuons cinq séries de 30 simulations, avec des ajustements de variables différents pour chaque série. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau n°3.

Simulation n°	1	2	3	4	5
Nombre d'agents au départ	100	100	400	400	400
Taux de fécondité (PM)	30	30	30	30	60
Taux de mortalité (PM)	10	20	10	20	20
Valeur théorique à 100 ticks	700	254	2815	1020	8400
Moyenne des 30 simulations	676	257	2752	979	7940
Marge d'erreur (%)	3,43	1,18	2,24	4,02	5,48

Tableau 3 : Résultats des simulations pour le test du système de génération  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

Avec 80 % des marges d'erreurs inférieure à 5 %, le système de génération peut également être considéré comme fiable. Ainsi, les simulations suivantes, reposent sur des bases fiables.

### 3) Test de la diffusion par l'aspect du taux d'adoption en fonction du temps

Si la diffusion du nouveau comportement démographique nous intéresse, il faut bien s'assurer qu'elle s'opère. Pour vérifier cela, l'aspect du taux d'adoption en fonction du temps doit être une fonction logistique, telle qu'elle est présentée par T. Saint-Julien ou T. Hägerstrand.



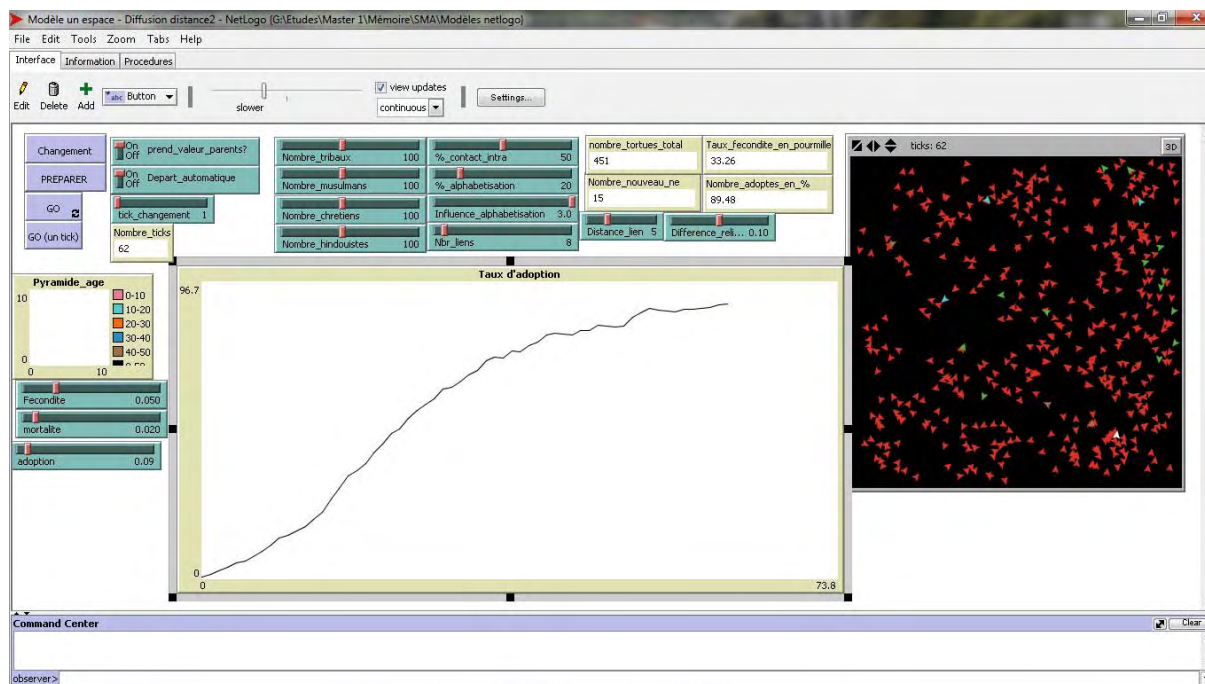


Figure 14 : Aspect logistique du taux d'adoption en fonction du temps  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

Après plusieurs simulations de test, on se rend compte que cela est bien le cas, comme le prouve la figure 14 où l'on observe la fonction logistique sur le graphique du milieu. Selon le réglage des variables, la courbe obtenue n'est pas exactement la même, mais demeure pour autant une courbe logistique. Par conséquent, la diffusion introduite dans le modèle demeure correcte au sens conceptuel.

Ces calibrages et vérifications du modèle nous permettent d'aller plus loin et commencer les séries de simulations de la manière exposée précédemment.

## **II) Etudes quantitatives des résultats**

La phase de simulation génère de nombreux résultats. Grâce à ces derniers, plusieurs aspects sont traités. Le premier analyse l'effet de limite concernant certaines variables. Le suivant reflète l'effet de masse, contrairement au troisième, portant sur l'hétérogénéité. La significativité des simulations sur les échecs doit être mise en avant. Le dernier aspect demeure l'étude de l'influence des variables sur la vitesse et l'échec d'une diffusion.

Par convention, nous appelons « modèle 1 » le modèle de diffusion par liens aléatoires parmi des agents homogènes, « modèle 2 » le modèle de diffusion par liens aléatoires parmi des agents hétérogènes et « modèle 3 » le modèle de diffusion avec les liens contraints par la distance parmi des agents hétérogènes.

### **A) Les effets de seuil sur les variables**

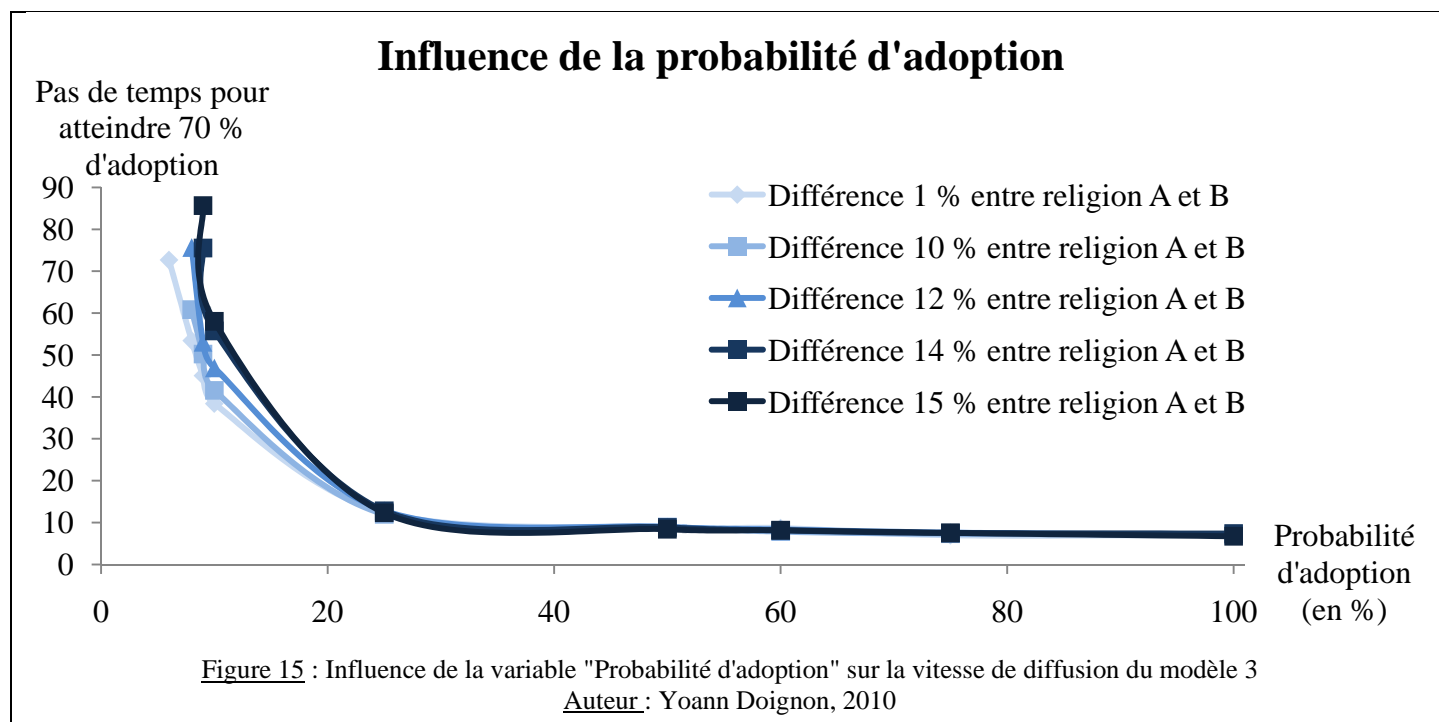
Certaines variables sont soumises à un effet de limite. Il se retrouve sur la vitesse de diffusion, mais aussi sur les échecs d'une diffusion. Pour l'expliquer, prenons l'exemple de l'influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur la vitesse de diffusion du modèle 3, observable sur la figure 15. Dans ce graphique, il est possible de remarquer que le temps nécessaire pour atteindre un taux d'adoption de 70 % avec une probabilité d'adoption fixée à 25 % est sensiblement le même que lorsqu'elle est fixée à 100 %. Concrètement, cela veut dire que sur une population d'agents ayant une chance sur quatre d'adopter l'innovation, ou sur une population d'agents ayant 100 % de chances, il faut le même temps pour que 70 % des agents adoptent. Pour la variable « Probabilité d'adoption », le constat est le même pour les trois types de diffusions en ce qui concerne la vitesse de diffusion mais également l'échec d'une diffusion. De fait, le taux d'échec pour une probabilité d'adoption fixée à 25 % ou à 100 % sera grossièrement le même.

Ce phénomène de limite implique les variables « nombre de liens », « probabilité d'adoption », « distance des liens », et du nombre d'agents au départ de la diffusion.

Pour la vitesse de diffusion, le nombre de liens voit une limite à partir de quinze liens et quel que soit le type de diffusion (Cf. annexes 2, 9 et 16). Au-delà de cette valeur, la vitesse sera globalement la même que celle obtenue pour quinze liens. Par contre, lorsqu'il s'agit des échecs d'une diffusion, l'effet de limite reste beaucoup moins perceptible. En effet, pour le modèle 1, le pourcentage d'échecs diminue de 1,4 % à 0,5 % entre quinze liens et trente liens (Cf. annexe 25). Par contre, pour les modèles 2 et 3, l'effet de limite se ressent davantage, sans pour autant être aussi net que sur les graphiques de vitesse de diffusion. Pour la variable « distance de liens » sur la vitesse de diffusion, la limite se situe à partir de la valeur « 8 » (Cf. annexe 20), limite que l'on ne retrouve pas sur les échecs de diffusion (Cf. annexe 33). Cela veut dire qu'un ensemble d'agents, créant leurs liens avec des agents situés dans un rayon de 8 patches, mettra autant de temps pour atteindre un taux d'adoption de 70 % qu'un ensemble d'agents pouvant choisir n'importe quel agent de l'espace virtuel, telle une diffusion par liens aléatoires. Bien évidemment, cette variable ne peut être observée que sur le modèle 3, car seul celui-ci prend en compte la distance.

En ce qui concerne le nombre d'agents au départ de la diffusion, une limite peut être trouvée dans les simulations sur la vitesse de diffusion du modèle 3 (Cf. annexe 18). En effet, à partir de 1000 agents au début de la diffusion, la vitesse de diffusion ne diminue pratiquement plus. Cela se retrouve également au niveau du pourcentage d'échecs de la diffusion (Cf. annexe 36). On peut en déduire qu'au plus il y a d'agents dans l'espace virtuel, c'est-à-dire qu'au plus la densité augmente, au moins la diffusion nécessite de temps pour s'effectuer. Cette constatation peut apparaître logique car un espace densément peuplé aura plus de facilité à faire propager une innovation du fait de la relative absence de « vides » (par rapport à un espace moins densément peuplé). Ces espaces moins peuplés représentent une barrière à une diffusion, car si aucun individu n'est présent pour diffuser

l'innovation, cette dernière se perd, engendrant l'arrêt de sa propagation. Dans les deux autres modèles de diffusion, le nombre d'agents au départ ne voit pas de limites. Ainsi, nous tentons d'analyser l'effet de masse.



### **B) L'effet de masse**

Par effet de masse, nous considérons que le nombre d'agents peut modifier l'évolution d'une diffusion, en termes de vitesse et d'échec. Pour cela, toutes les simulations du modèle 1 sur la vitesse de diffusion sont effectuées avec 100 et 400 agents. Pour chacune des variables testées, nous pouvons voir que les courbes sont décalées, possèdent la même allure et gardent le même décalage vers plus l'infini (Cf. annexes 1, 2, 3 et 4). Par déduction, le nombre d'agents ne modifie pas l'allure de la courbe de vitesse des variables, autrement dit, il n'y a pas réellement de dynamique propre au nombre d'agents. Pour vérifier cela, regardons les résultats des simulations sur le nombre d'agents au début de la diffusion pour le modèle 1, soit à la figure 16 pour la vitesse de diffusion soit à la figure 17 pour le pourcentage d'échecs. Nous remarquons que la vitesse, à partir de 1000 agents, augmente de manière linéaire. De 0 à 1000 agents, la courbe croît de manière plus exponentielle. Pareillement, à partir de 1000 agents, le pourcentage d'échecs n'évolue quasiment plus. En conclusion, tout effet de masse quelconque est à exclure de l'étude. C'est pour cela que les modèles 2 et 3 ne prennent plus en compte pour chaque variable le nombre d'agents présents au début de la simulation, mais se concentrent plus sur la force différente de l'hétérogénéité entre agents de religion A et B.

### Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion

Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption

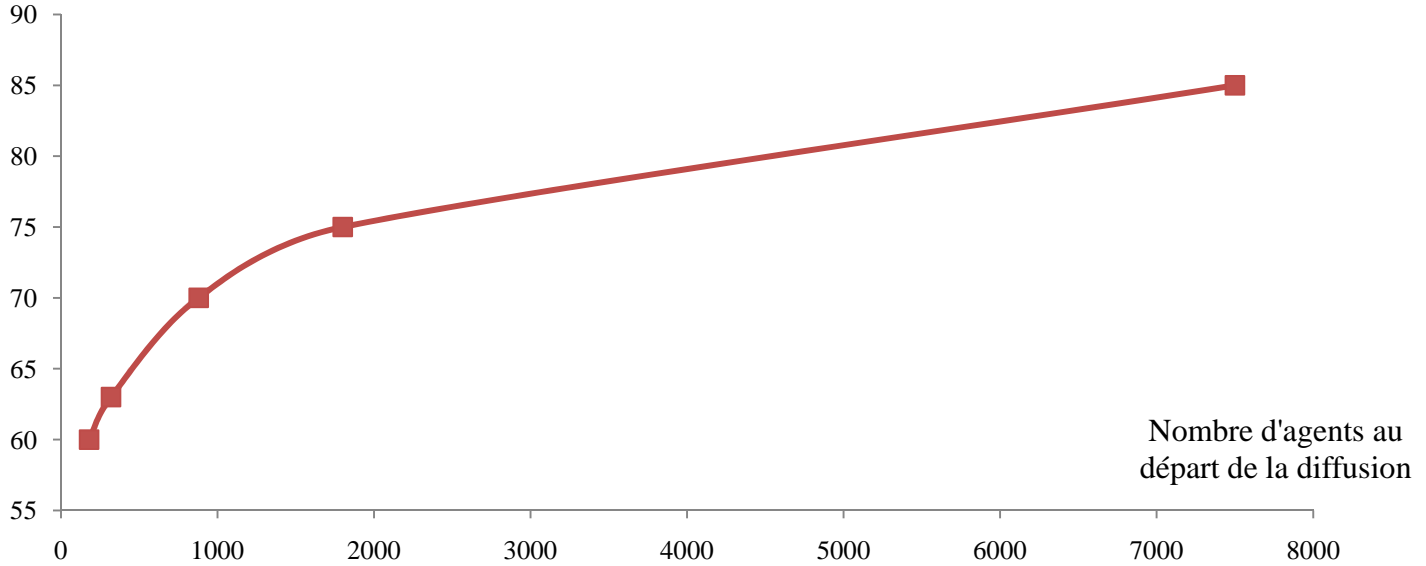


Figure 16 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur la vitesse de diffusion du modèle 1  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion

Echec (en %)

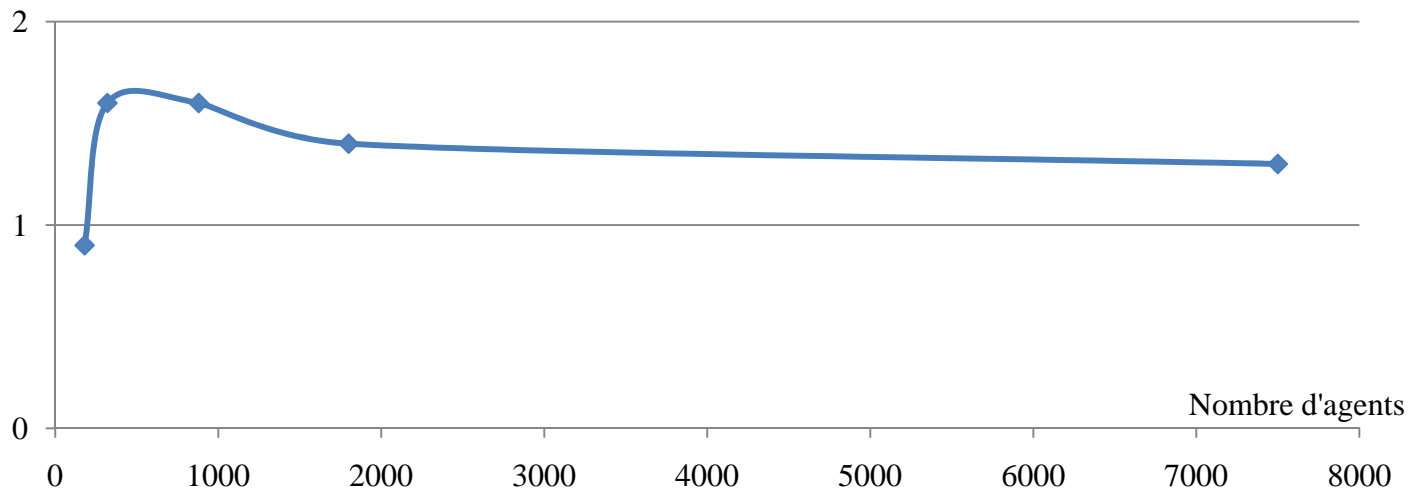


Figure 17 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 1  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

Mais avant cela, précisons une chose importante : le possible manque de significativité des simulations sur l'échec d'une diffusion. Après examen des graphiques des simulations testant l'influence des variables sur le pourcentage d'échecs d'une diffusion (Cf. annexes 21 à 40), nous nous rendons compte que certains apparaissent comme assez

« incohérents ». Les tendances ne sont pas aussi précises que les graphiques des simulations testant la vitesse de diffusion. Pourtant, il s'agit de séries de 1000 simulations. Peut-être que cela n'est pas assez, et dans un travail futur, il faudrait augmenter le nombre de simulations par série. Ainsi, les résultats sur le pourcentage d'échecs de chaque variable sont à prendre avec réflexion et distance : seule la tendance générale doit être prise en compte, et non le particularisme local. Par exemple, prenons le graphique de l'influence du nombre de liens sur le pourcentage d'échecs du modèle 2 (Cf. annexe 27). La courbe de différence 1 % entre religion A et B possède une tendance générale où le pourcentage d'échecs diminue quand le nombre de liens augmente. Pourtant, au point d'abscisse 10, le pourcentage d'échecs est supérieur au point d'abscisse 8. Dans ce cas-là, il s'agit d'imprécision de simulation, en aucun cas il ne faudra conclure qu'il y a moins d'échecs si le nombre de liens est fixé à 8 plutôt qu'à 10.

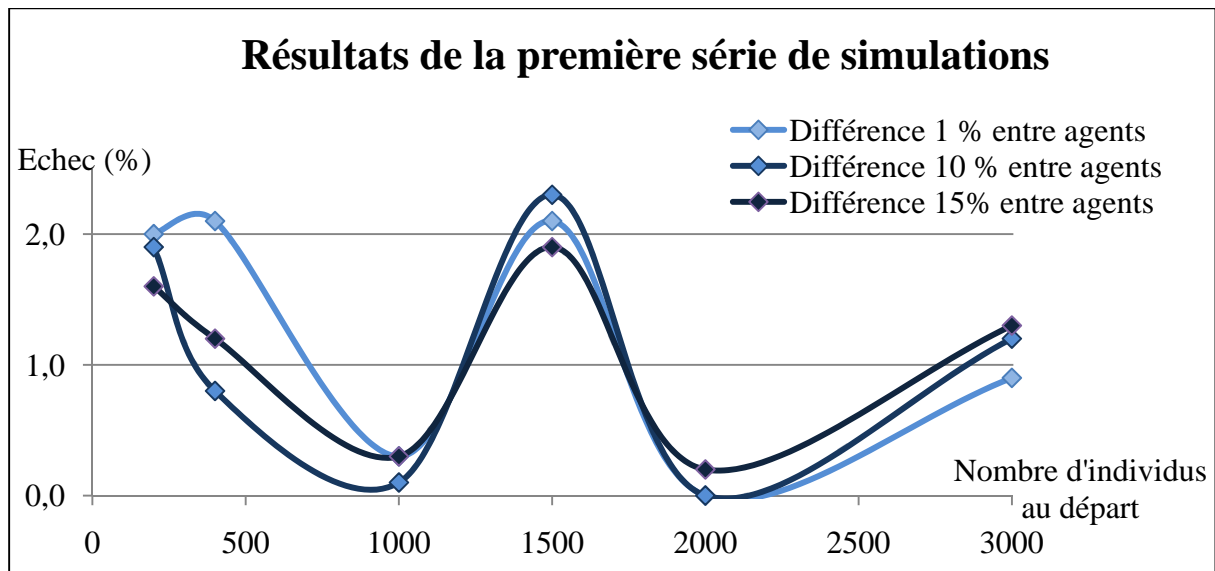


Figure 18 : Première série de simulations du nombre d'individus au départ sur le pourcentage d'échecs du modèle 2

Auteur : Yoann Doignon, 2010

De la même manière, dans certains graphiques, comme celui de l'annexe 33 par exemple, aucune tendance générale ne peut être tirée, à part le niveau maximum du pourcentage d'échecs. Pour illustrer ce problème de significativité des simulations sur l'échec d'une diffusion, nous présentons ci-dessous deux graphiques (figures 18 et 19). La première série laisse apparaître des régularités. Dans le doute, nous effectuons une deuxième série qui ne donne absolument pas les mêmes résultats. Pourtant, ces deux séries comptent 1000 simulations pour chaque valeur moyenne, soit 18 000 simulations par graphique. La seule conclusion possible de ces graphiques reste que quel que soit le nombre d'individus au départ de la simulation dans le modèle 2, le pourcentage d'échecs ne dépasse pas 2,5%. Analysons à présent la force de l'hétérogénéité dans les simulations où elle est prise en compte (modèle 2 et 3).

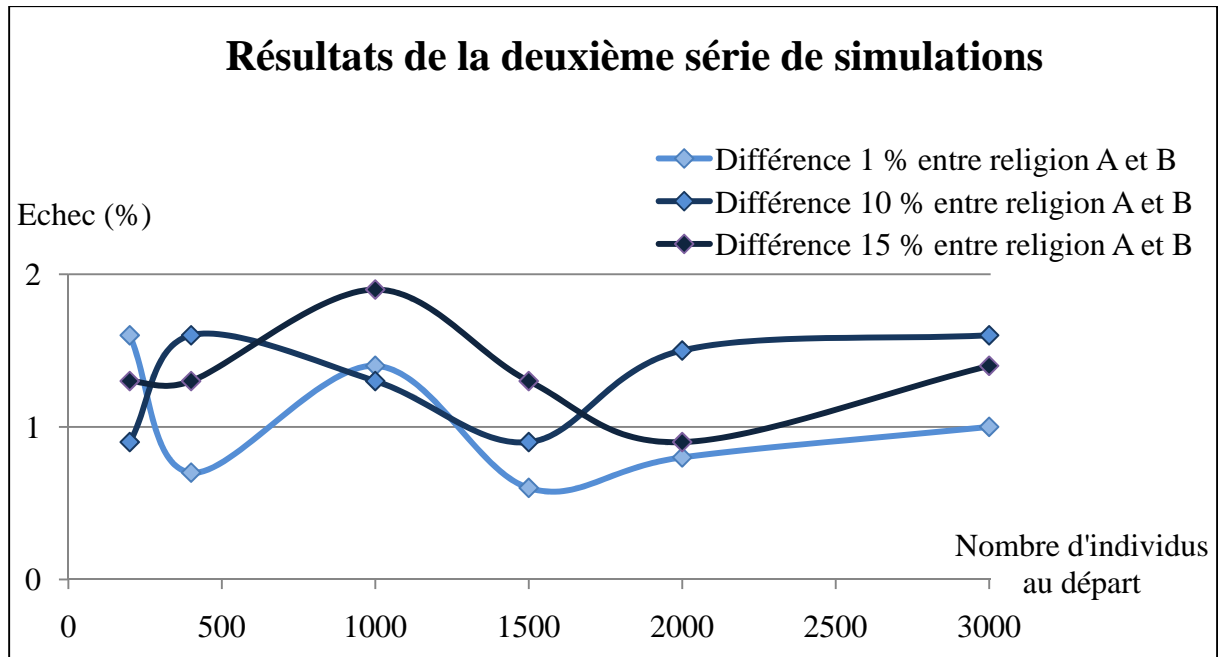


Figure 19 : Deuxième série de simulations du nombre d'individus au départ sur le pourcentage d'échecs du modèle 2

Auteur : Yoann Doignon, 2010

### C) La force de l'hétérogénéité

Une fois exclu l'effet de masse, on peut se pencher sur la force de l'hétérogénéité des agents, c'est-à-dire si les agents de religion A et B ont une probabilité d'adoption peu ou fortement différente. Pour cela, les modèles de diffusion 2 et 3 testent chaque variable avec des valeurs différentes d'hétérogénéité, autrement dit avec des valeurs différentes de la variable « Différence entre religion A et B ». Deux cas de figures peuvent être observés. Tout d'abord, le cas où les courbes d'hétérogénéités différentes possèdent la même allure, mais simplement décalée. Cette situation se retrouve pour les variables « Nombre de liens » (Cf. annexes 9, 16, 27 et 35), « Distance des liens » (Cf. annexes 20 et 33), « Alphabétisation » (Cf. annexes 4, 7, 8, 14, 15, 22, 31, 32, 39 et 40), « Probabilité d'adoption » (Cf. annexes 3, 10, 16, 24, 29 et 38). Dans chacun des cas, l'allure des courbes demeurent assez ressemblante. Le paroxysme de ce constat reste l'influence de la probabilité d'adoption sur la vitesse de diffusion (Cf. annexes 10 et 16) et sur le pourcentage d'échecs d'une diffusion (Cf. annexes 24 et 38), que ce soit dans le modèle 2 ou le modèle 3. En effet, les courbes de cette variable ont la même allure, au point de se confondre sur certains intervalles. Cela prouve que l'hétérogénéité ne joue quasiment pas sur la vitesse de diffusion ou sur le pourcentage d'échecs au niveau de la probabilité d'adoption lorsqu'elle est comprise entre 25 % et 100 %. Précisons tout de même que l'observation de ce phénomène est moins aisée sur les courbes testées sur le pourcentage d'échecs que celle testées sur la vitesse de diffusion, sûrement dû à une imprécision des simulations.

Dans ce premier type de situation, l'hétérogénéité joue sur la vitesse de diffusion et sur le pourcentage d'échecs de manière plutôt linéaire, impliquant qu'une vitesse de diffusion avec une différence de 1 % entre des agents de religion A et B aura quasiment le même taux de variation qu'une simulation avec une différence de 15 %. La meilleure illustration de ce cas de figure reste la variable « Distance des liens » à l'annexe 33. Il est clairement visible que les courbes, correspondant à des hétérogénéités de forces différentes, suivent la même trajectoire tout en gardant le même décalage par rapport à la grandeur de l'axe des ordonnées.

Le deuxième cas concerne les situations où à hétérogénéité variable, les courbes n'accusent pas les mêmes allures. Les variables représentatives de cette situation sont le « pourcentage de contacts intracommunautaires » et la proportion d'agents de religion A et B.

Contrairement au premier cas, les courbes ne suivent pas les mêmes allures, et s'éloignent souvent dans les valeurs extrêmes des variables. Prenons l'exemple de la proportion d'agents de religion A et B testée sur la vitesse d'adoption du modèle 3 (Cf. annexe 37). Il est clairement observable que toutes les courbes démarrent à une vitesse inférieure à 50 pas de temps. Mais au plus la proportion d'agents de religion B augmente, au plus les courbes s'éloignent : celles correspondant à une hétérogénéité faible croissent lentement, a contrario de celles correspondant à une forte hétérogénéité. On peut également remarquer que, pour une proportion d'agents de religion B fixée à 90 %, l'écart entre les courbes de différence 12% et 14% est moins important que l'écart entre les courbes de différences 14 % et 15 %. Cela montre que les courbes d'hétérogénéité différente ne possèdent pas les mêmes allures, mais plus l'hétérogénéité augmente, et plus l'écart entre les courbes s'accroît. La même observation peut être faite sur le graphique d'influence de la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires » à l'annexe 34, entre les courbes de différence 14 % et 15 %. Les écarts sont plus ou moins grands selon les variables et le modèle considérés. De manière générale, ce phénomène s'observe sur la vitesse de diffusion et sur l'échec d'une diffusion pour les variables concernées (Cf. annexes 6, 12, 13, 19, 21, 26, 30, 34 et 37). Tout comme le premier cas, la tendance de cette constatation s'observe beaucoup mieux sur les graphiques d'influence des variables sur la vitesse de diffusion que sur ceux du pourcentage d'échecs. Ce constat sur les écarts reste observable sur les graphiques d'influence des variables (présentés dans le D de cette partie).

Jusqu'à présent, plusieurs variables se sont distinguées comme obéissant à des logiques différentes. Etudions donc les influences des variables sur la vitesse et l'échec d'une diffusion.

#### **D) Les variables les plus influentes ...**

Rappelons tout d'abord que « l'influence » d'une variable est appréciée par son taux de variation, c'est-à-dire sa capacité à faire varier la vitesse et le pourcentage d'échecs d'une diffusion. Dans cet objectif, nous étudions en premier lieu l'influence des variables sur la

vitesse de diffusion, puis dans un deuxième temps, sur le pourcentage d'échecs d'une diffusion.

### 1) ... sur la vitesse de diffusion

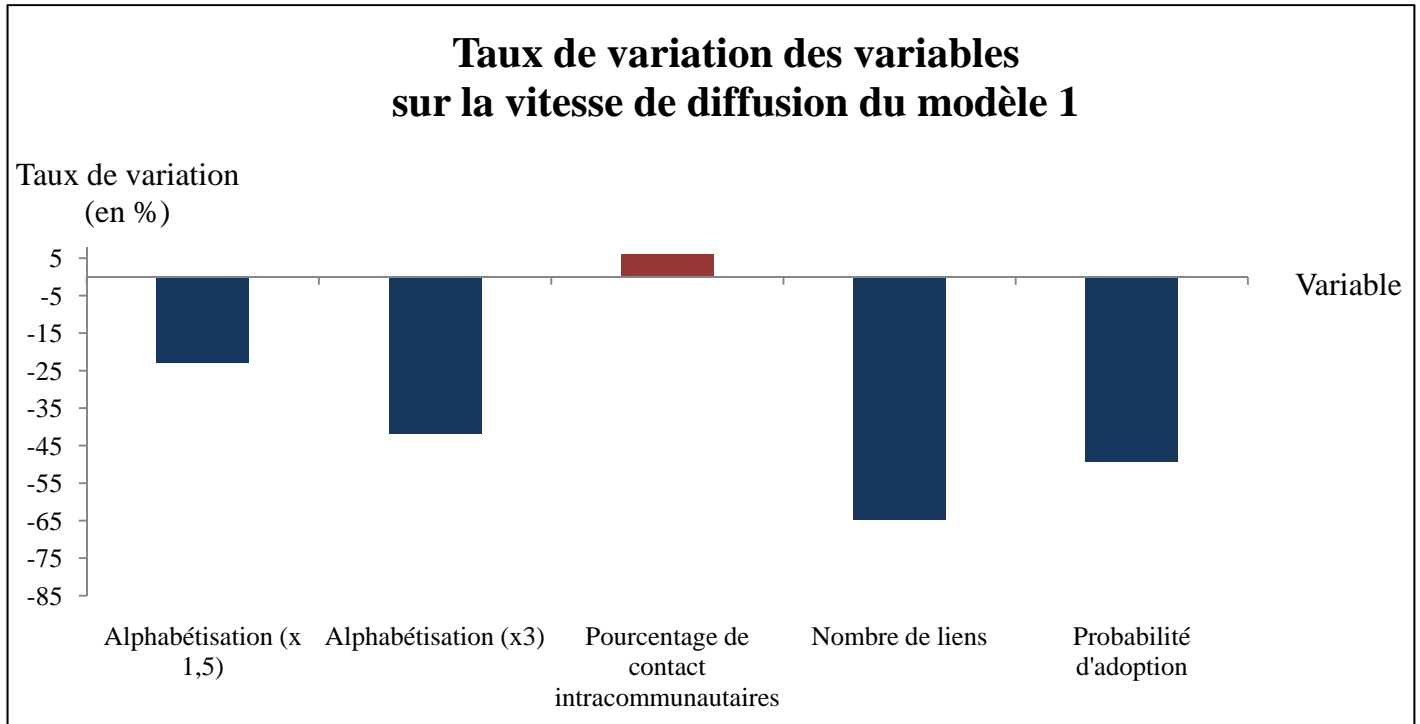
La vitesse de diffusion est influencée différemment selon les variables, mais aussi selon les modèles. Dans le modèle 1, aucune variable ne possède un taux de variation supérieur à 65 % (négatif ou positif), comme il est possible de le remarquer sur la figure 20. En comparant avec les taux de variations des modèles 2 et 3 (figures 21 et 22), les influences des variables du modèle 1 peuvent être caractérisées de « modérées ». D'un point de vue strictement relatif, le nombre de liens apparaît comme la variable prédominante dans la détermination de la vitesse de diffusion, juste avant la probabilité d'adoption. L'alphabétisation influence la vitesse de diffusion, mais tout dépend de l'influence que le simulateur lui a attribuée. La faible influence du pourcentage de contacts intracommunautaires s'explique par le fait que le modèle 1 comporte uniquement des agents homogènes, impliquant aucune différence de probabilité d'adoption entre communautés religieuses. Ainsi, que les agents ne soient reliés qu'à des agents de leurs religions ou non n'influence quasiment pas la vitesse de diffusion. Dans la figure 20 n'est pas représentée l'influence du nombre d'agents au départ de la simulation car nous l'avons exclue de l'étude précédemment. Mais le taux de variation de cette variable est de + 42 %, autrement dit équivalent à l'alphabétisation d'influence x3.

Les résultats des modèles 2 et 3 peuvent être traités en même temps du fait qu'ils se ressemblent beaucoup (Cf. figures 21 et 22). Par rapport au modèle 1, les modèles 2 et 3 ne voient pas les mêmes variables influencer la vitesse de diffusion. La valeur de la variable « différence entre religions A et B » est importante car elle peut changer considérablement le taux de variation des variables.

Dans ces deux graphiques, il nous est possible de retrouver les observations faites sur la force de l'hétérogénéité. Lorsque la différence entre religion est fixée à 1 %, les variables les plus influentes sont quasiment celles du modèle 1, c'est-à-dire le nombre de lien, la probabilité d'adoption et le nombre d'agents au départ de la diffusion. Cela s'explique par le fait qu'avec une différence de 1 %, les agents sont pratiquement homogènes du fait de la faiblesse de l'hétérogénéité. Comme observé dans la partie sur la force de l'hétérogénéité, il existe deux types de variables. Tout d'abord celle qui possède globalement le même taux de variation quelle que soit l'hétérogénéité introduite. Il s'agit du nombre de liens, de la probabilité d'adoption et de l'alphabétisation. Mais il existe un deuxième type de variable, qui voit son taux de variation augmenter ou diminuer au fur et à mesure du fait que la différence entre religions se renforce. La proportion d'agents de religion B, le pourcentage de contacts intracommunautaires ainsi que le nombre d'agents au départ sont concernés par ce phénomène. De façon générale, dans les deux modèles, aucune variable (à l'exception du pourcentage de contacts intracommunautaires et de la proportion d'agents de religion B) ne possède un taux de variation supérieur à | 100 | %. Mais contrairement au modèle 1,



certaines taux de variations atteignent des valeurs extrêmes, comme la proportion d'agents de religion B dans le modèle 3 avec une valeur de + 972 %.



**Figure 20** : Taux de variation des variables sur la vitesse de diffusion du modèle 1

**Auteur** : Yoann Doignon, 2010

Pour la variable « Pourcentage de contacts intracommunautaires » du modèle 2, nous remarquons que l'écart entre le taux de variations des simulations avec une différence de 1% et de 10% est inférieur à celui entre les simulations avec une différence de 10% et 15%. Pourtant, dans le premier cas, il y a 9 % de différence, et dans le deuxième il y en a juste 5 % : cela prouve que l'augmentation de l'influence de cette variable en fonction de l'hétérogénéité n'est pas linéaire.

Les variables les plus influentes sur la vitesse de diffusion dans les modèles 2 et 3 dépendent donc de la force d'hétérogénéité introduite. Pour une hétérogénéité faible, les variables à forte influence sont le nombre de liens et la probabilité d'adoption. Pour une hétérogénéité élevée, les variables les plus influentes sont la proportion d'agents de religion B et le pourcentage de contacts intracommunautaires. Cela semble logique étant donné qu'au plus la proportion d'agents de religion B par rapport aux agents de religion A est élevée, plus il y a d'agents ayant une probabilité d'adoption plus faible, et donc plus de temps sera nécessaire pour atteindre un taux d'adoption de 70 %. Par analogie, plus les agents se ferment - c'est-à-dire le pourcentage de contacts intracommunautaires demeurent relativement élevé - plus il y a de chance que la diffusion soit longue si l'innovation apparaît dans une communauté religieuse de type B. De fait, l'innovation mettra plus de temps à pénétrer dans les autres communautés religieuses.

### Taux de variations des variables sur la vitesse de diffusion du modèle 2

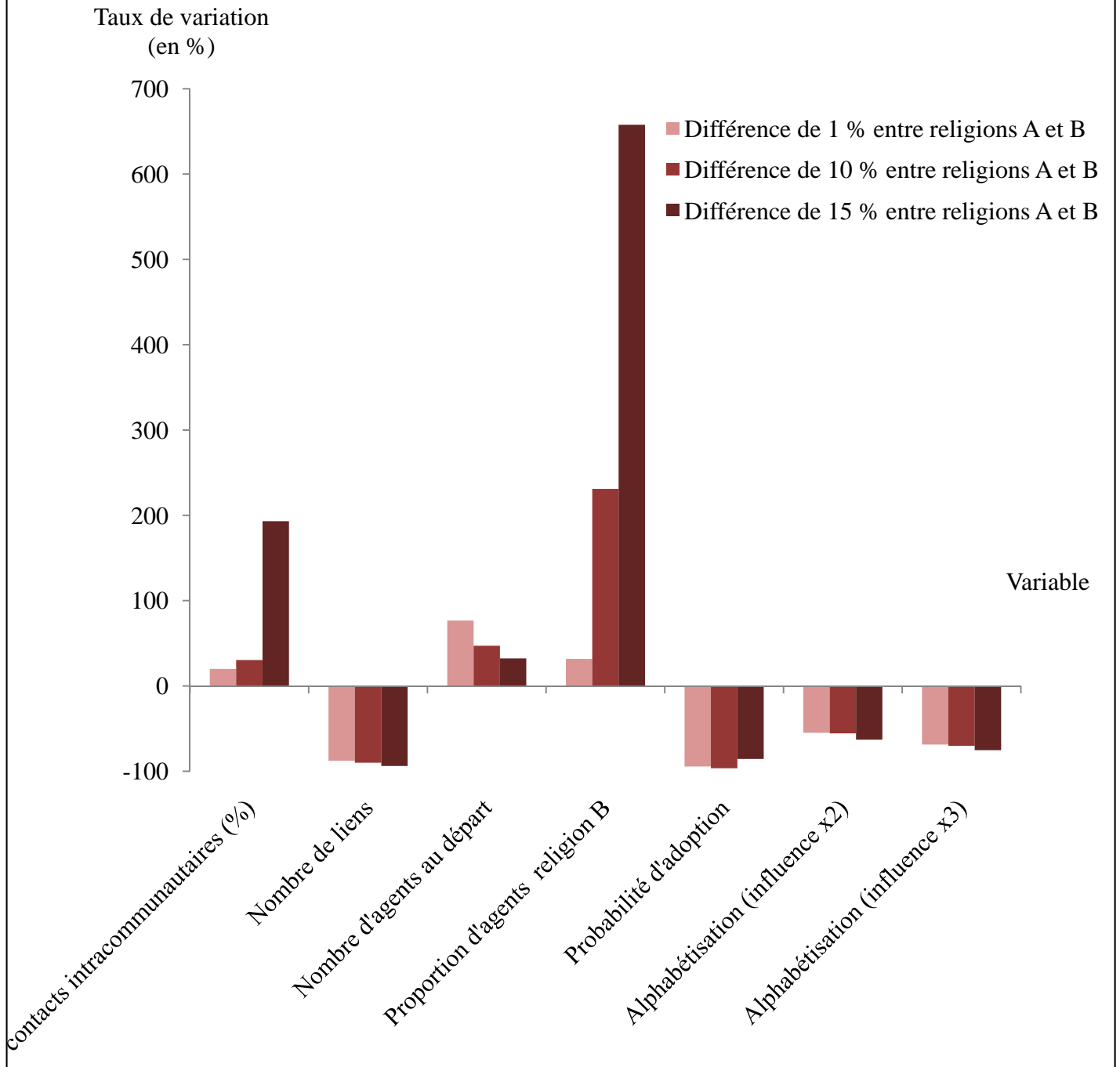


Figure 21 : Taux de variations des variables sur la vitesse de diffusion du modèle 2

Auteur : Yoann Doignon, 2010

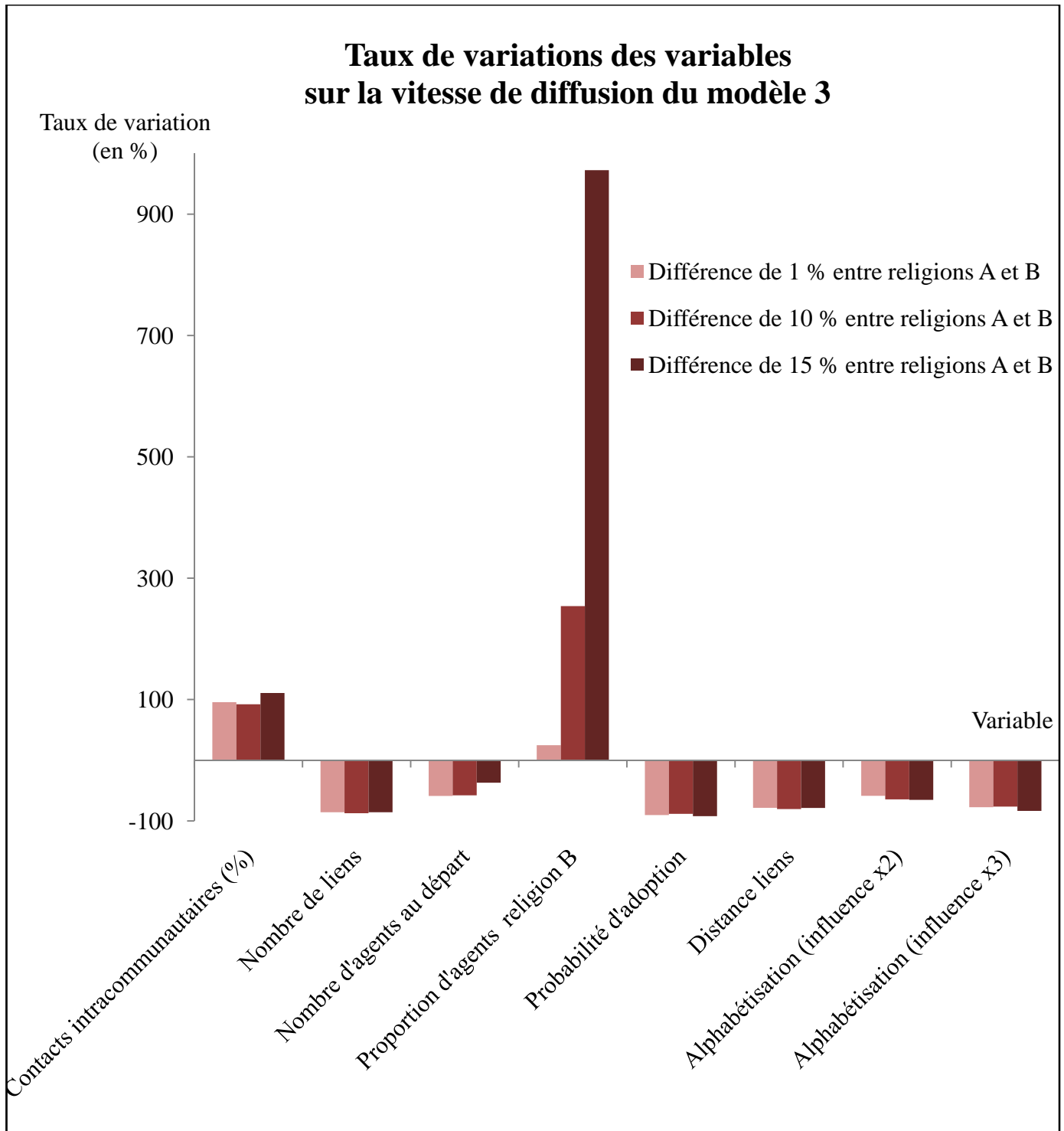


Figure 22 : Taux de variations des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

Malgré cette étude rapprochée des modèles 2 et 3, il persiste plusieurs contrastes notables entre les deux modèles. Premièrement, quand on introduit de la distance dans le modèle (le modèle 3), le taux de variations du nombre d'agents au départ n'est plus positif mais négatif. Dans le modèle 2, plus le nombre d'agents au départ augmente, plus la diffusion sera longue, contrairement au modèle 3 où la diffusion sera plus courte. De fait, nous pouvons supposer que plus il y a d'agents, plus ces derniers auront le choix pour créer des

liens. En conséquence, il y aura de moins en moins d'agents qui ne pourront pas créer tous les liens fixés par la variable « nombre de liens » par le manque d'agents dans le rayon déterminé par la « distance des liens ». Le deuxième contraste entre les deux modèles est que la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires » dans le modèle 3 dispose de taux de variations subégal en fonction de la différence entre religions. Contrairement au modèle 2 où les taux de variations augmentent en fonction de l'hétérogénéité. D'ailleurs, cette variable voit son taux de variations dans le modèle 2 être deux fois plus grand que celui du modèle 3. De la même manière, les taux de variations de la proportion d'agents de religion B dans le modèle 3 demeure toujours plus grands que ceux du modèle 2 : cette variable est donc plus influente sur la vitesse de diffusion dans le modèle 3 que dans le modèle 2, tout en restant dans les deux cas la variable la plus influente du modèle.

Après l'étude des résultats sur la vitesse de diffusion, penchons-nous à présent sur l'influence des variables sur le pourcentage d'échecs d'une diffusion.

## 2) ... et sur le pourcentage d'échecs d'une diffusion

Certaines configurations initiales sont plus propices à l'échec d'une diffusion. En conséquence, certaines variables influencent plus le pourcentage d'échecs que d'autres. Le but de cette partie est de les identifier. Dans le modèle 1, nous retrouvons les variables déjà les plus influentes sur la vitesse de diffusion : la probabilité d'adoption et le nombre de liens. Vient en second plan l'alphabétisation, le nombre d'agents au départ et le pourcentage de contacts intracommunautaires. Tout comme les influences sur la vitesse de diffusion, les taux de variations sur le pourcentage d'échecs demeurent assez « modérés » en comparaison avec ceux des modèles où l'hétérogénéité est introduite (figures 24 et 25). Sur les figures 24 et 25, on peut remarquer un possible manque de précision des simulations concernant le pourcentage d'échecs. En effet, si l'on regarde les taux de variations de la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires » du modèle 2 (figure 24), il nous est possible de remarquer que le taux de variation pour une différence de 10 % est inférieur à celui pour une différence de 1%. Cela semble totalement illogique et renforce la thèse d'un manque de significativité des simulations sur le pourcentage d'échecs.

Globalement, les constats établis dans la partie précédente sur la vitesse de diffusion se retrouvent ici pour les modèles 2 et 3. Le nombre d'agents au départ de la diffusion influence de manière positive le pourcentage d'échecs dans le modèle 2 mais négativement dans le modèle 3. De la même manière, pour une même variable, les écarts entre les taux de variations selon l'hétérogénéité sont plus forts dans le modèle 3 que dans le modèle 2. La variable apparaissant comme déterminante dans les deux modèles est la proportion d'agents de religion B. Mais en terme absolu, elle influence plus le pourcentage d'échecs dans le modèle 3 que dans le modèle 2 : pour une différence de 15 %, le taux de variation de la variable atteint 3742 % dans le modèle 3 contre 2360 % dans le modèle 2.

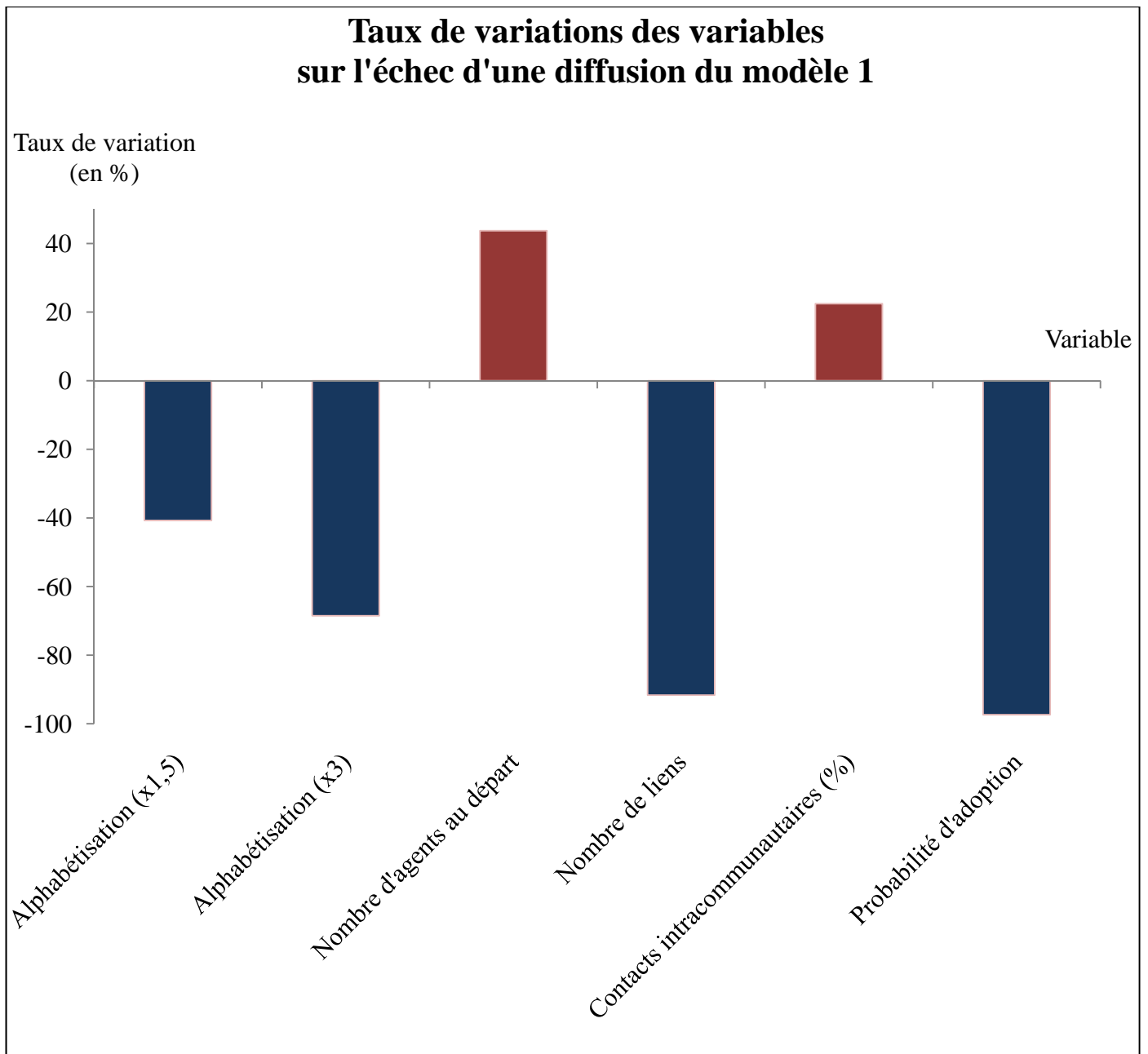


Figure 23 : Taux de variation des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 1  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

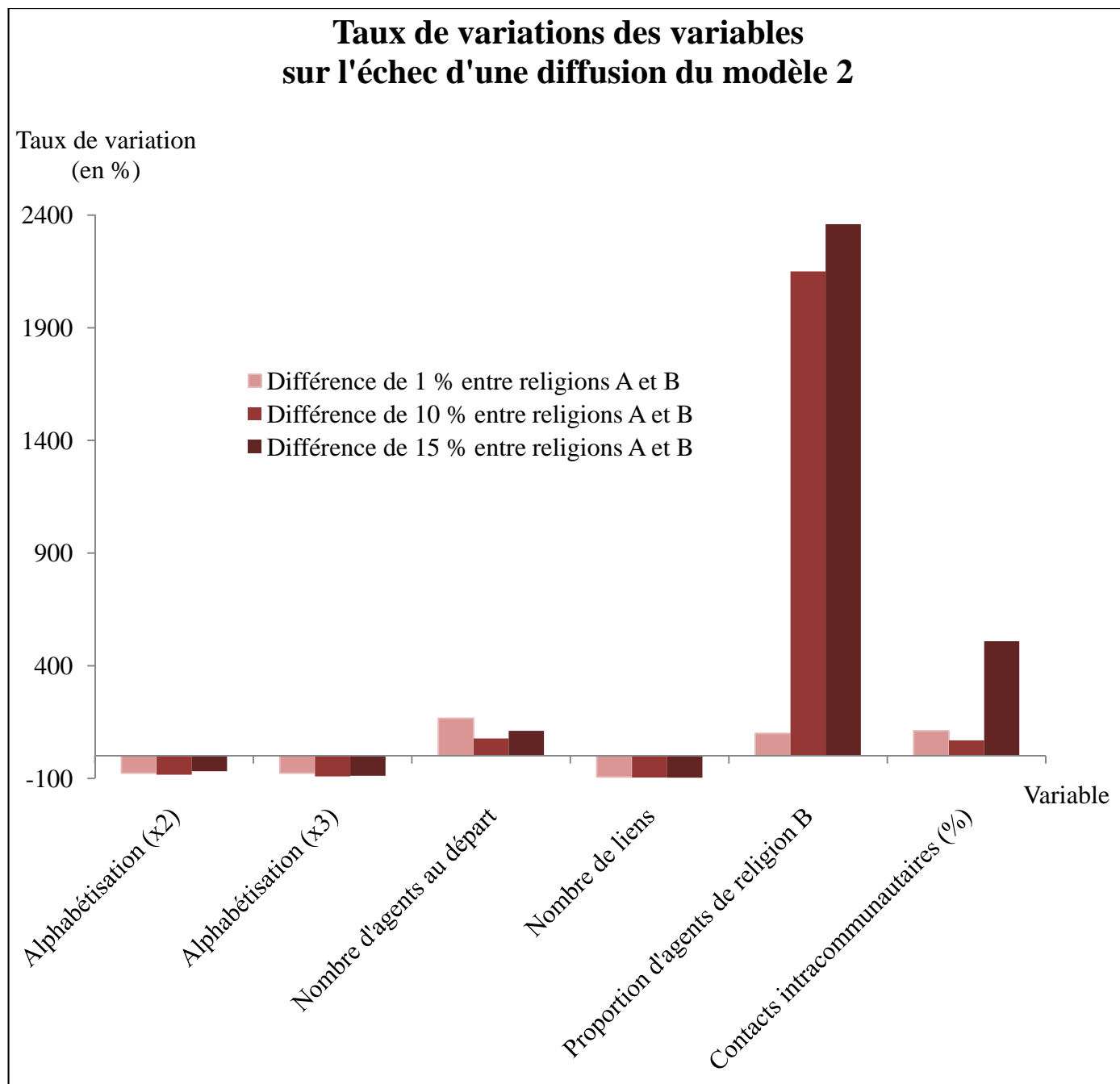


Figure 24 : Taux de variation des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

Maintenant que les deux variables, que sont la proportion d'agents de religion B et le pourcentage de contacts intracommunautaires, sont identifiées comme étant les plus influentes sur le pourcentage d'échecs, il est intéressant de regarder l'influence des autres variables dans les modèles 2 et 3. Pour cela, nous créons deux autres graphiques (figures 26 et 27) où les variables les plus influentes sont exclues, car la lecture des taux de variations sur les figures 24 et 25 n'est pas aisée de par la prédominance de la proportion d'agents de religion B.

Dans le modèle 2, les variables ont quasiment les mêmes taux de variations. La situation se retrouve globalement dans le modèle 3, à l'exception de la variable « distance des liens »

qui demeure la moins influente. Par contre, ces différents graphiques d'influences ne permettent en aucun cas de savoir quel est le pourcentage d'échecs. Pour cela, nous devons regarder les graphiques des annexes 21 aux annexes 40. Globalement, le pourcentage d'échecs ne dépasse pas 5 %. Les seules variables le faisant dépasser cette limite sont le « pourcentage de contacts intracommunautaires » (Cf. annexes 26 et 34) avec une différence entre religion de 15 %, la proportion d'agents de religion B (Cf. annexes 30 et 37) et le nombre d'agents au départ dans le modèle 3 (Cf. annexes 36). Le taux maximum d'échecs est détenu par la proportion d'agents de religion B dans le modèle 3 avec 26,9 % d'échecs (pour une différence de 15%).

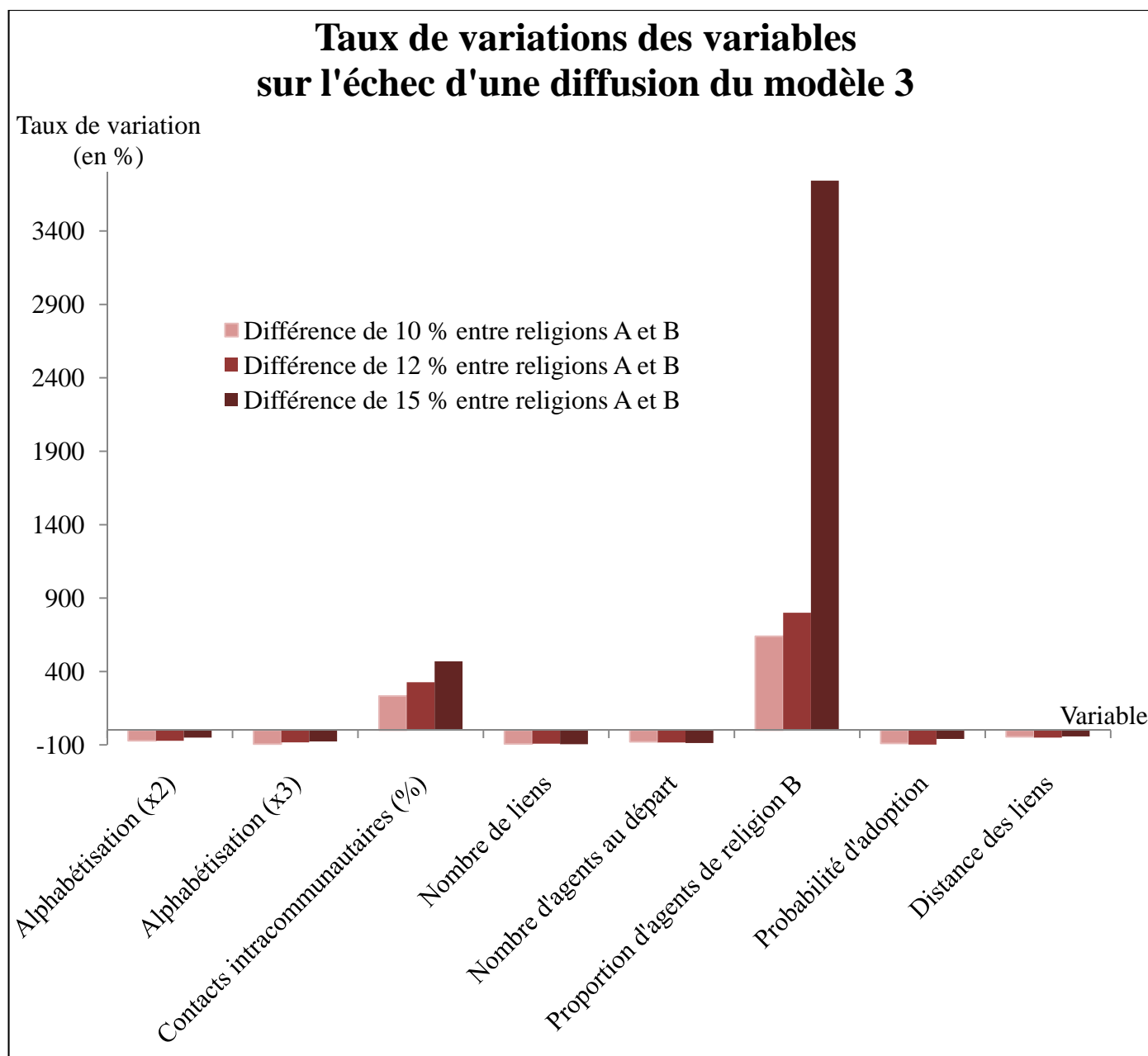


Figure 25 : Taux de variations des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

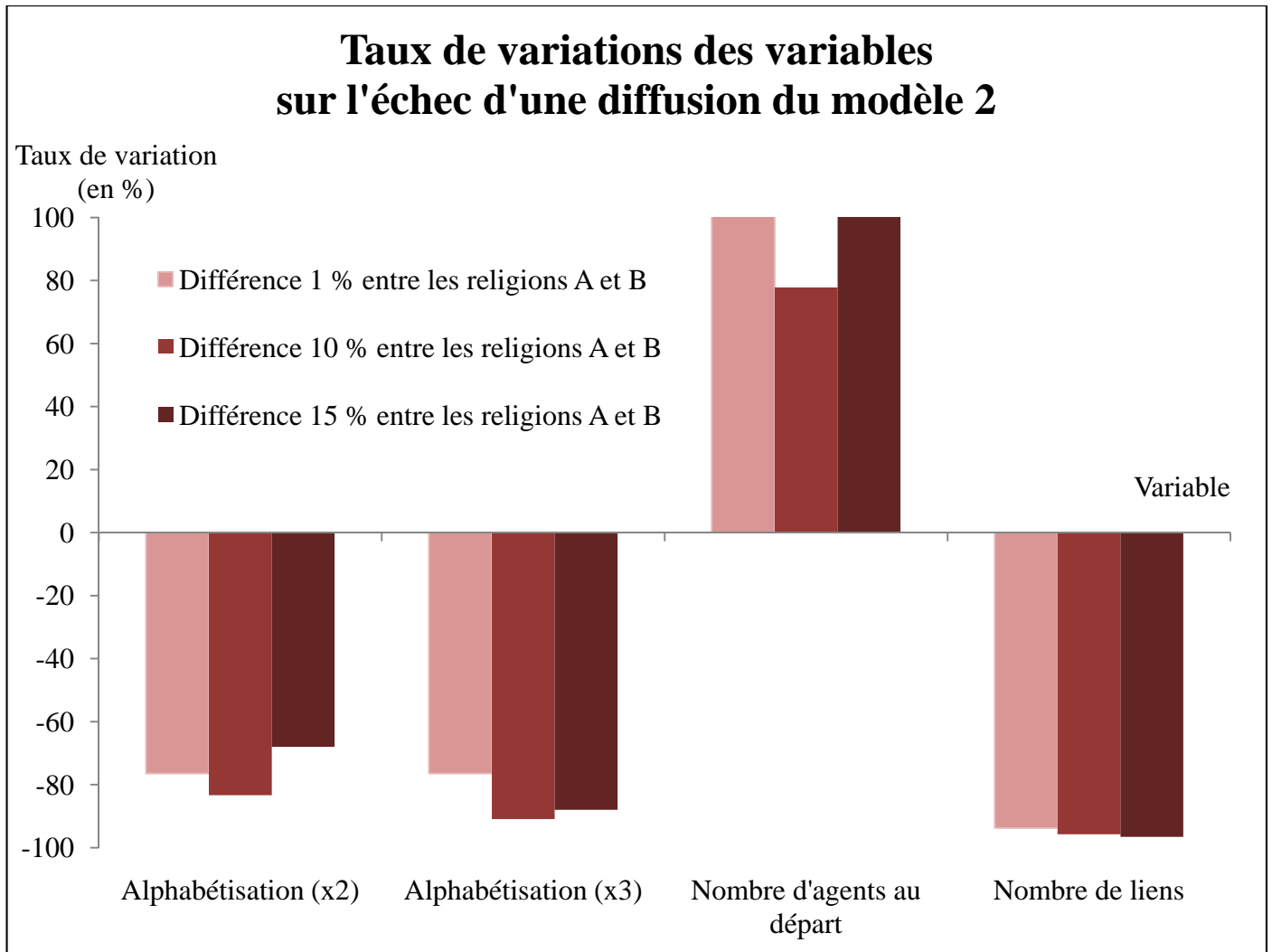


Figure 26 : Taux de variations des variables, excepté les variables extrêmes, sur l'échec d'une diffusion du modèle 2

Auteur : Yoann Doignon, 2010

De la même manière, certaines variables peuvent engendrer un pourcentage d'échecs nul. Il s'agit essentiellement de la probabilité d'adoption quel que soit le modèle (Cf. annexes 24, 29 et 38). Mais il y a également le nombre de liens dans le modèle 2, où le taux d'échecs se rapproche de 0 (Cf. annexe 27), la proportion d'agents de religion B dans les modèles 2 et 3 (Cf. annexe 30 et 37), du nombre de liens dans le modèle 3 (Cf. annexe 35) et l'alphabétisation d'influence x3 (Cf. annexe 32).

Nous comprenons alors pourquoi la proportion d'agents de religion B dans les modèles 2 et 3 possède les plus forts taux de variations étant donné qu'elle arrive, selon sa valeur, à faire chuter le pourcentage d'échecs à pratiquement 0, mais dans le même temps à le faire augmenter à 26,9 %.



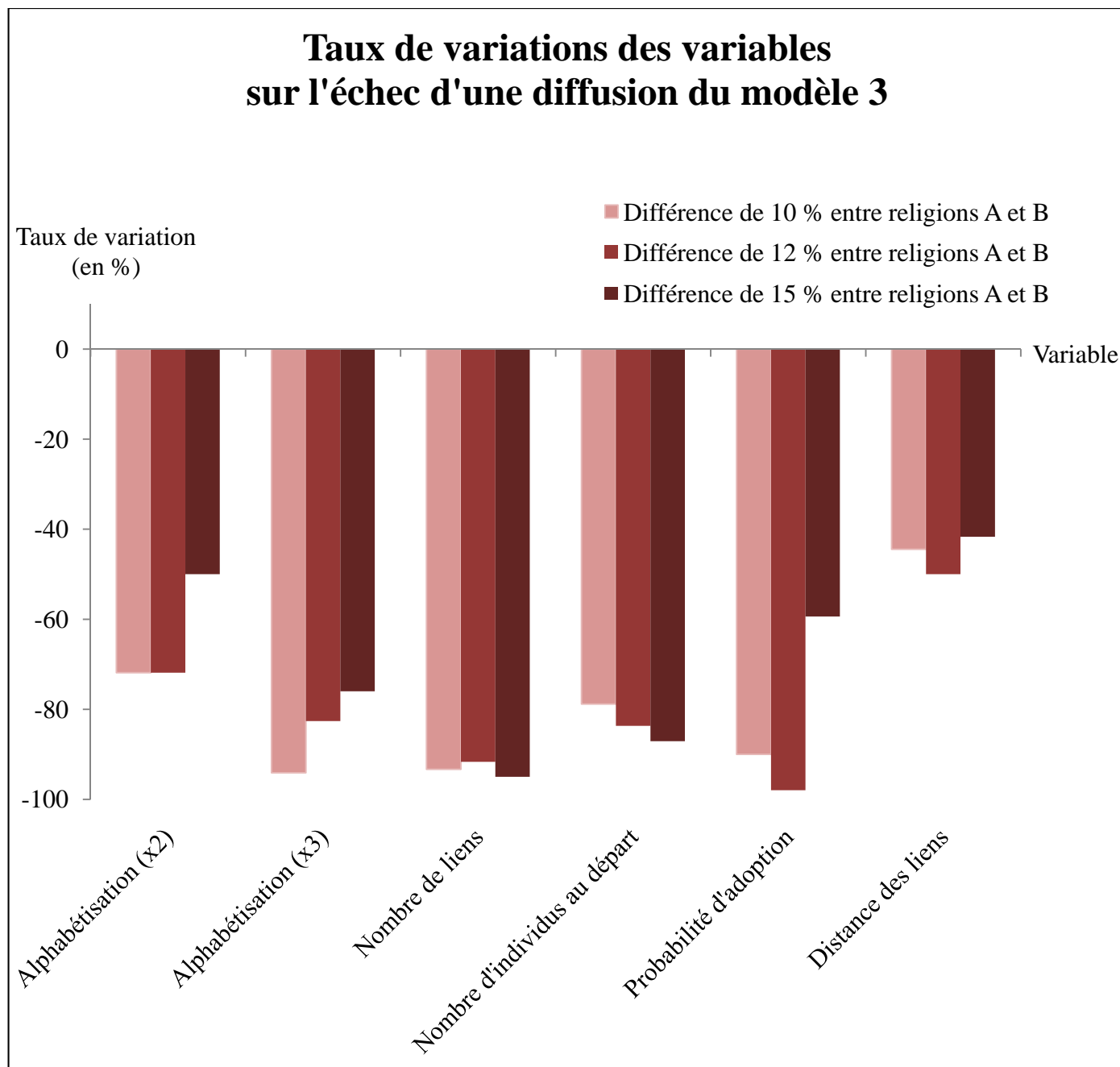


Figure 27 : Taux de variations des variables, excepté les variables extrêmes, sur l'échec d'une diffusion du modèle 3

Auteur : Yoann Doignon, 2010

Nous pouvons conclure que l'hétérogénéité change fondamentalement l'influence des variables sur la diffusion. Mais une fois introduites dans le modèle, les deux variables, se révélant déterminantes, sont la proportion d'agents de religion A et B, et le pourcentage de contacts intracommunautaires.

Maintenant que sont établies les variables les plus influentes sur la vitesse et le pourcentage d'échecs d'une diffusion, concentrons-nous plus amplement sur les formes spatiales de diffusion observées lors des simulations.

### **III) Les formes spatiales observées**

Les séries de simulations produisent des résultats d'ordre quantitatif. L'étude de ces derniers concerne la partie précédente. Mais au cours des simulations du modèle créé, le simulateur a l'occasion de remarquer trois formes spatiales récurrentes. Cette partie n'étudie aucunement les formes spatiales de façon quantitative. Il ne s'agit que d'observations, mais toutefois, leur traitement quantitatif serait intéressant à effectuer dans une étude future. Bien évidemment, certaines formes spatiales ne peuvent se déclencher qu'avec une conjonction de variables réglées d'une certaine manière. Ici encore, nous ne nous attardons pas sur le traitement quantitatif et statistique de cette considération.

#### **A) La nécessaire contrainte spatiale pour observer une diffusion spatiale**

Le premier effet est une comparaison entre la diffusion par liens aléatoires et la diffusion où les liens sont créés selon la distance. Afin de mieux percevoir la différence notable entre les deux, nous utilisons des captures d'écrans de deux simulations : une par type de diffusion. Les images successives ne se suivent pas linéairement dans le temps : elles sont sélectionnées pour leur intérêt. Deux images peuvent très bien être séparées d'un intervalle de temps de 1 tick ou de 100 ticks. Pour rappel, un tick est un pas de temps.

Il est important de noter le fait que le modèle dont il est question dans ce mémoire reste un modèle individu-centré développé dans un Système Multi-Agents. En conséquence, comme cela est bien précisé dans le chapitre 2, les règles de fonctionnement du modèle sont posées à chaque agent. Mais dans le but de mieux se rendre compte de l'aspect spatial de diffusion, nous agrégeons certaines données dans les simulations présentées ici (voir figures 28 et 29) et les agents ne sont pas représentés. Dans les images suivantes, on considère le taux d'adoption de chaque patch (une cellule de la grille de l'espace virtuel). Sur une gamme de rouge, plus le taux d'adoption du patch est élevé, plus la couleur est claire, le maximum étant représenté par la couleur blanche. En toute logique, un taux d'adoption bas se représente par un rouge foncé. Les patches noirs représentent un taux d'adoption nul, et dans certains cas le fait qu'il n'y ait plus d'agents dans le patch. La figure 28 représente une diffusion par liens aléatoires, tandis que la figure 29 montre une diffusion où les liens sont limités par la distance.

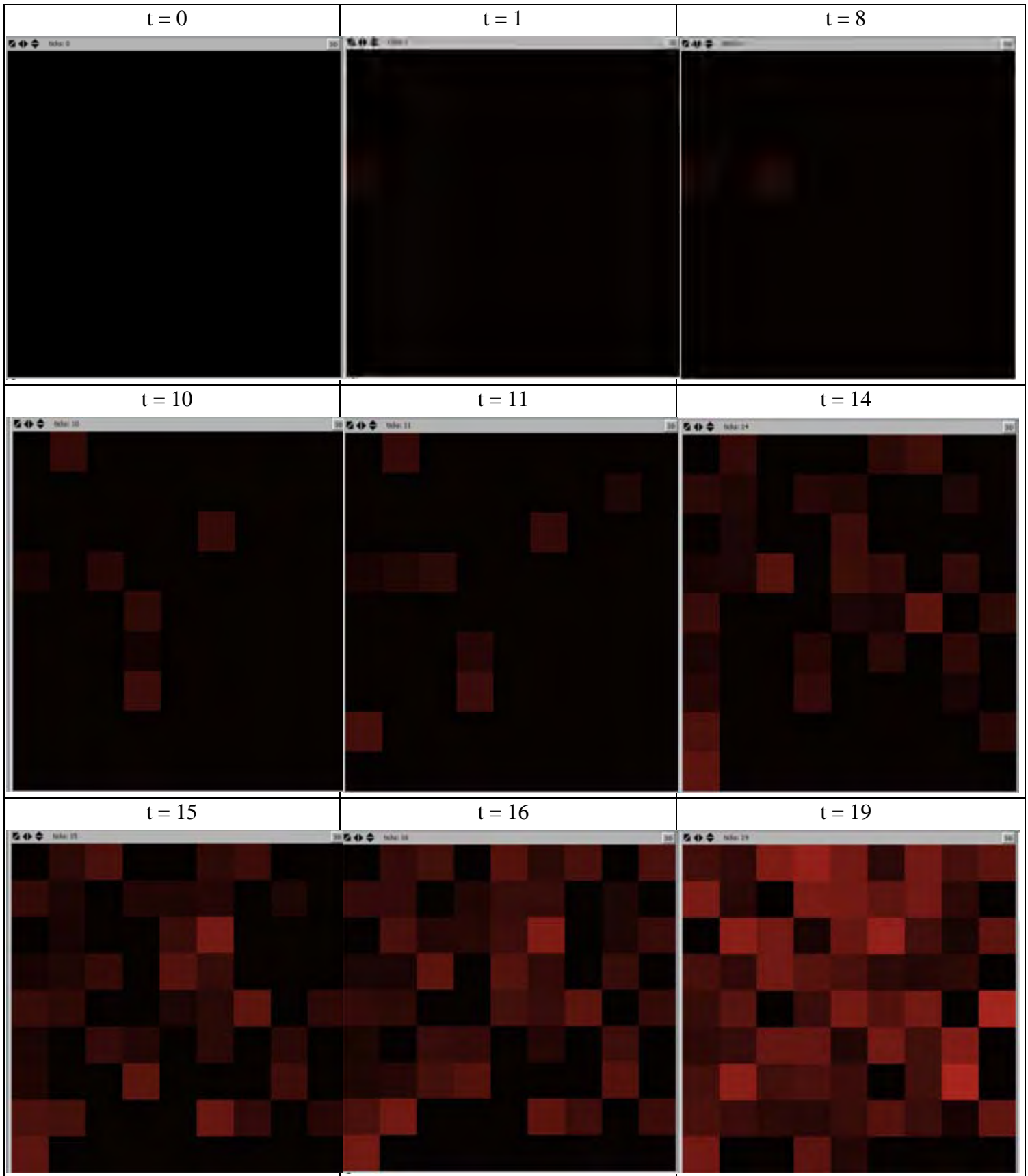
Dans la figure 28, au temps  $t = 1$ , le carré rouge pâle représente le lieu d'apparition de l'innovation. A  $t = 8$ , un deuxième patch voit son taux d'adoption augmenter, impliquant une diffusion du comportement malthusien des agents du premier patch touché à  $t = 1$  aux agents du deuxième patch à  $t = 8$ . Les images suivantes montrent que la diffusion s'effectue dans tout l'espace virtuel. Cependant, les structures et les formes de diffusion spatiales exposées dans le chapitre 2 ne se retrouvent pas dans cette diffusion. En effet, la diffusion de proche en proche n'est pas visible. En théorie, lors d'une diffusion, le lieu

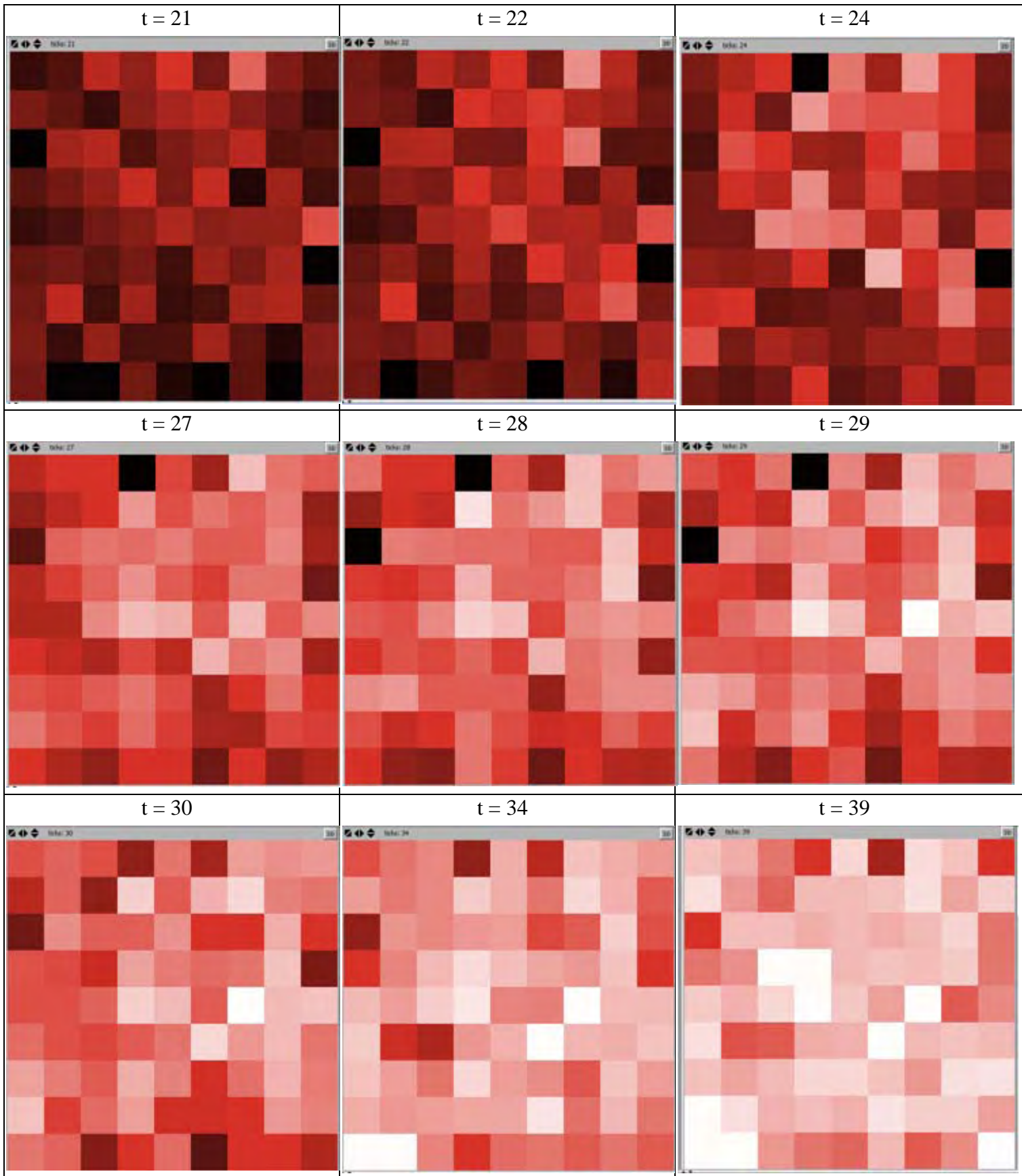
d'apparition de l'innovation voit son taux d'adoption augmenter au fur et à mesure de la diffusion. Ce phénomène possède un effet centrifuge puissant, c'est-à-dire la création de nouveaux centres, en croissance plus rapide dans les zones éloignées et réduction des plus forts contrastes entre le centre initial et les zones éloignées conquises par la suite. Concrètement, il n'y a aucune forme spatiale dans la diffusion par liens aléatoires (figure 28).

La figure 29, quant à elle, prend en compte l'aspect spatial en limitant la création des liens. Comme décrit dans le chapitre 2 (p.65), les liens ne pourront être créés que dans un rayon défini : en conséquence la création des liens est contrainte par la distance. Si nous étudions la figure 29, on peut déjà observer une diffusion par contagion, identifiable facilement jusqu'à  $t = 44$ . L'innovation se propage de proche en proche. Cette simulation fixe à « 1 » la variable « distance des liens », impliquant que les agents d'un patch ne peuvent prendre dans leur réseau uniquement des agents situés dans les patches contigus aux leurs. Nous pouvons facilement remarquer l'effet centrifuge entre  $t = 1$  et  $t = 32$ . En effet, l'innovation se propage dans les patches plus éloignés, et le taux d'adoption augmente dans le centre initial.

En conclusion, nous affirmons que sans contraintes spatiales, il ne peut y avoir de diffusion spatiale.

# Simuler la baisse de fécondité en Inde





Simuler la baisse de fécondité en Inde

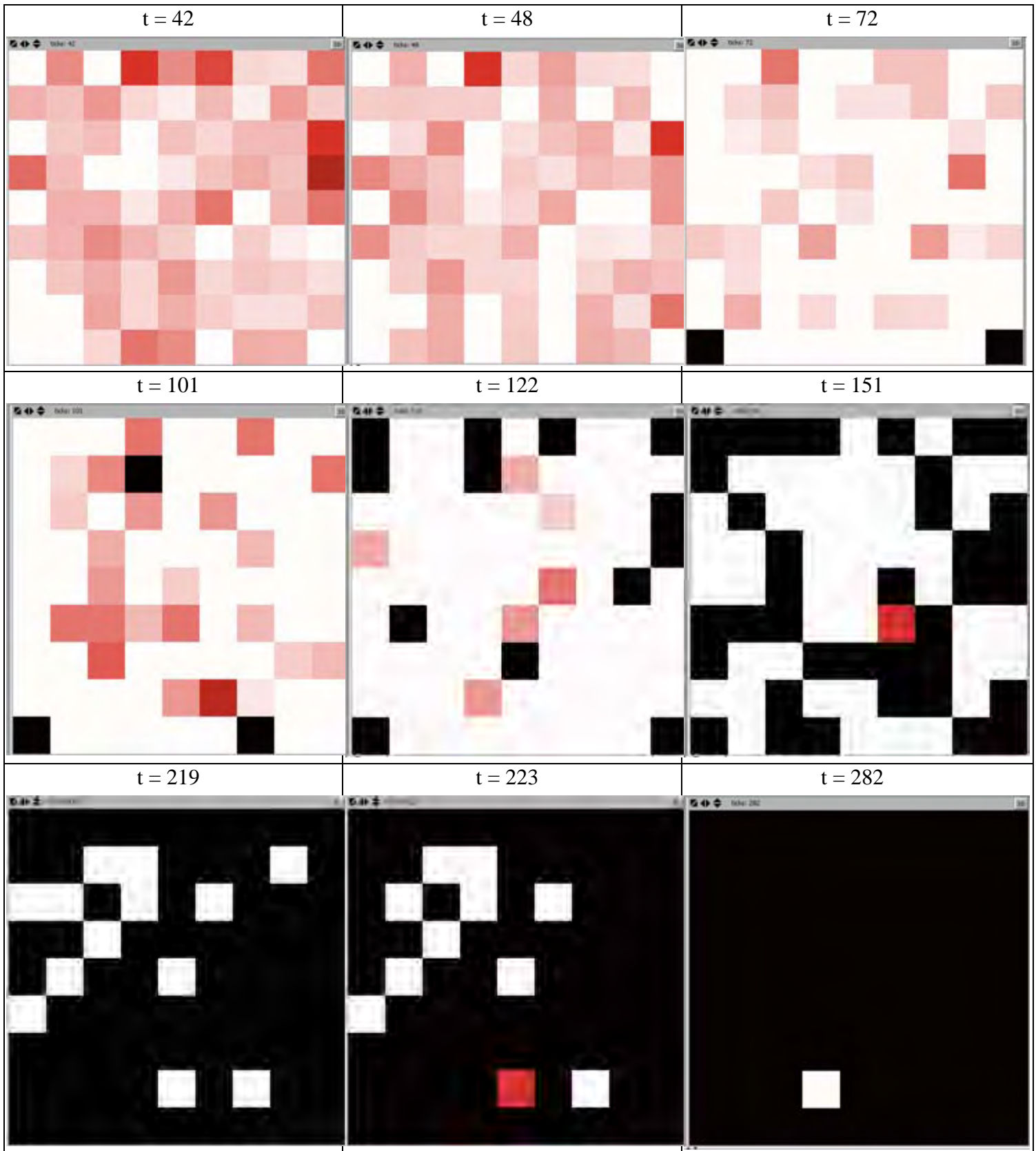
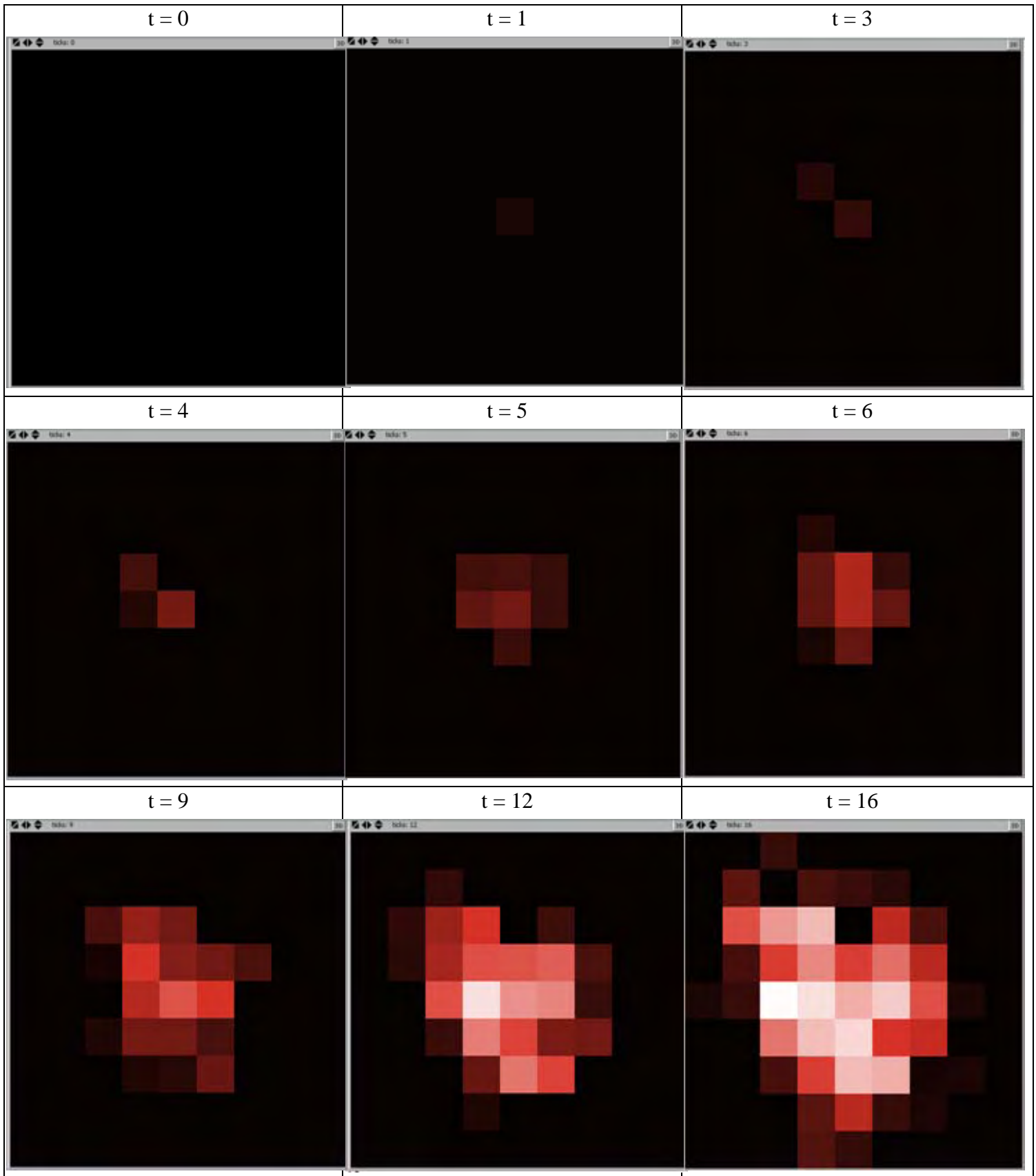


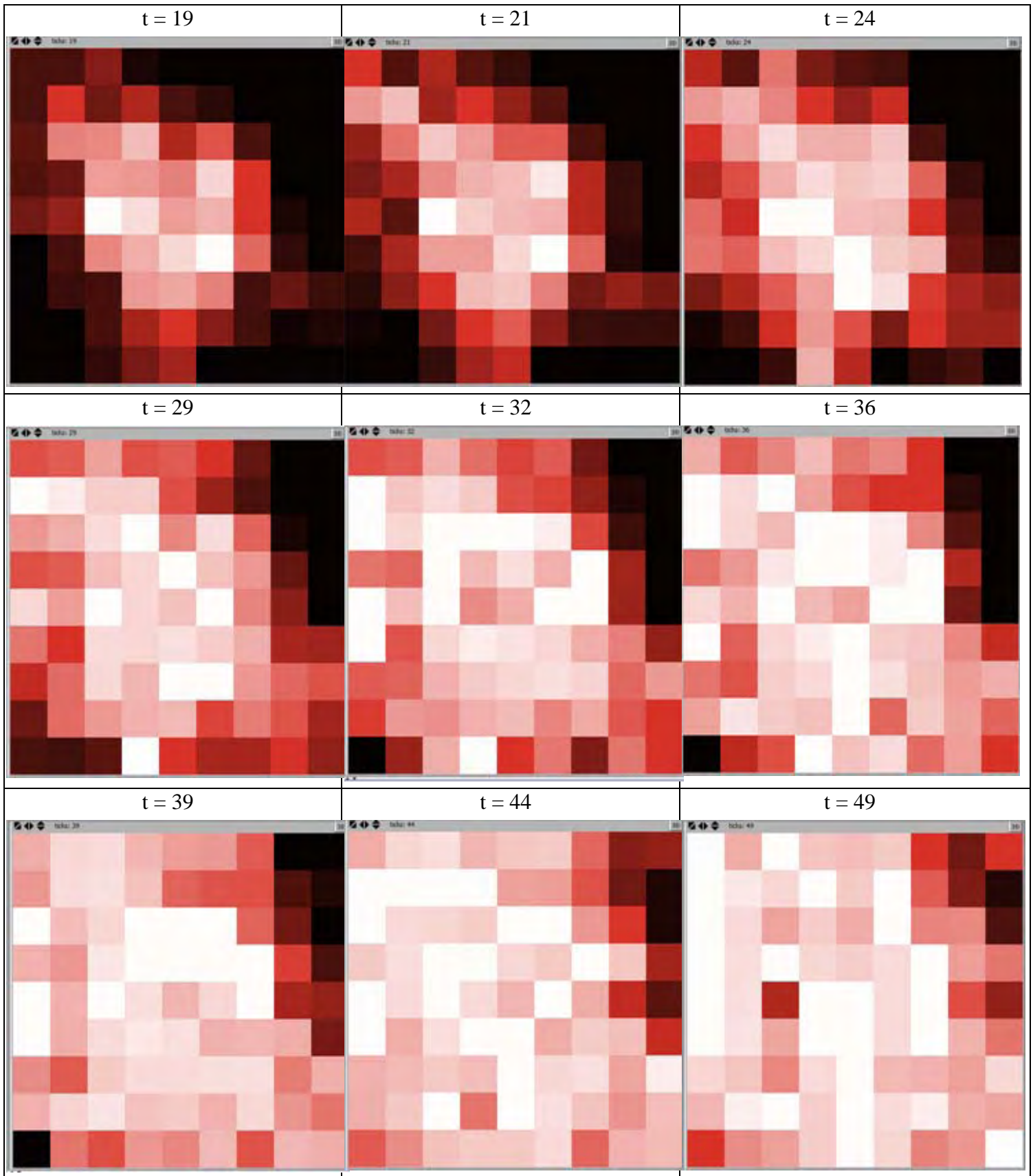
Figure 28: Diffusion par liens aléatoires  
Auteur: Yoann Doignon, 2010



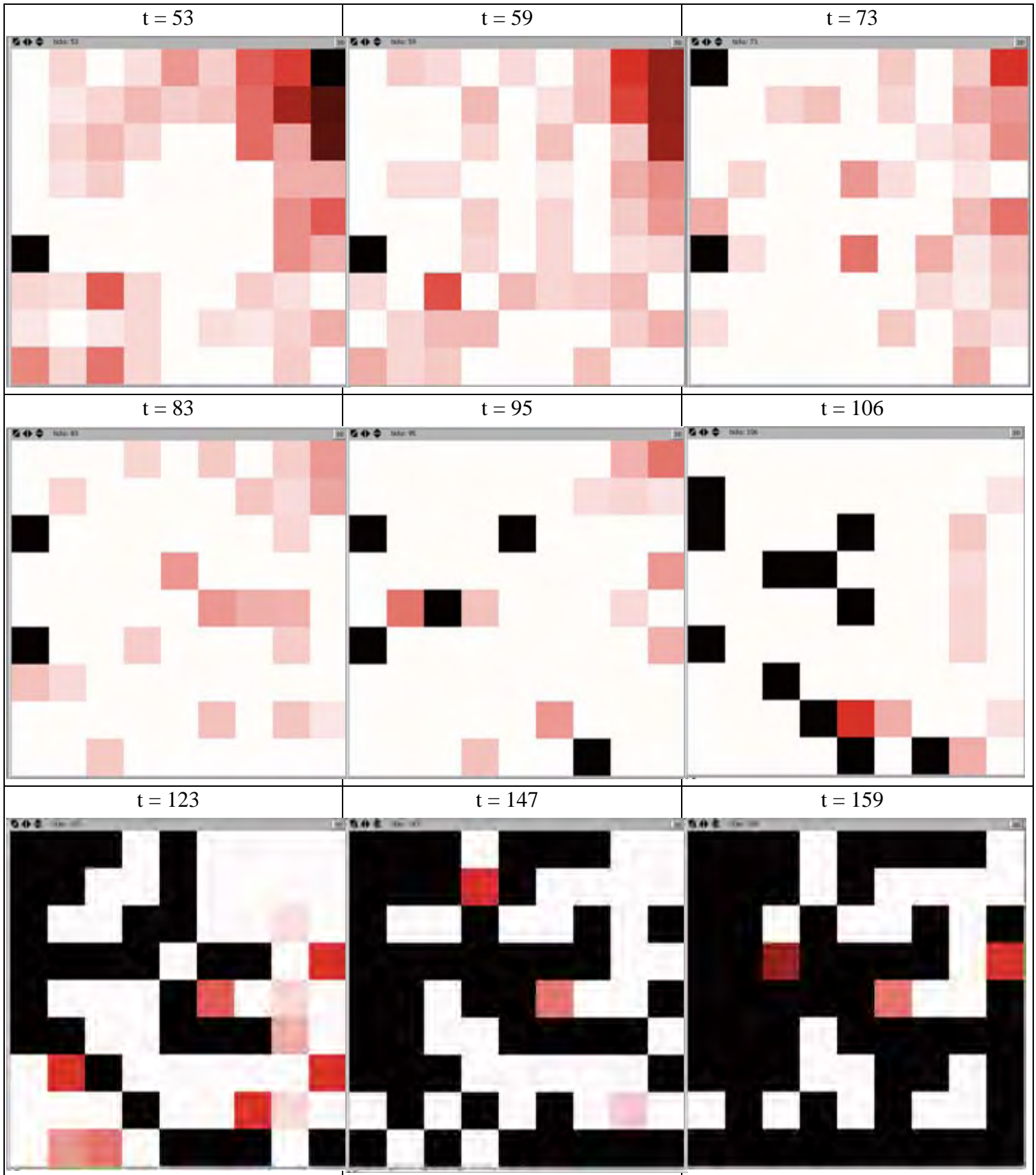
Simuler la baisse de fécondité en Inde







Simuler la baisse de fécondité en Inde



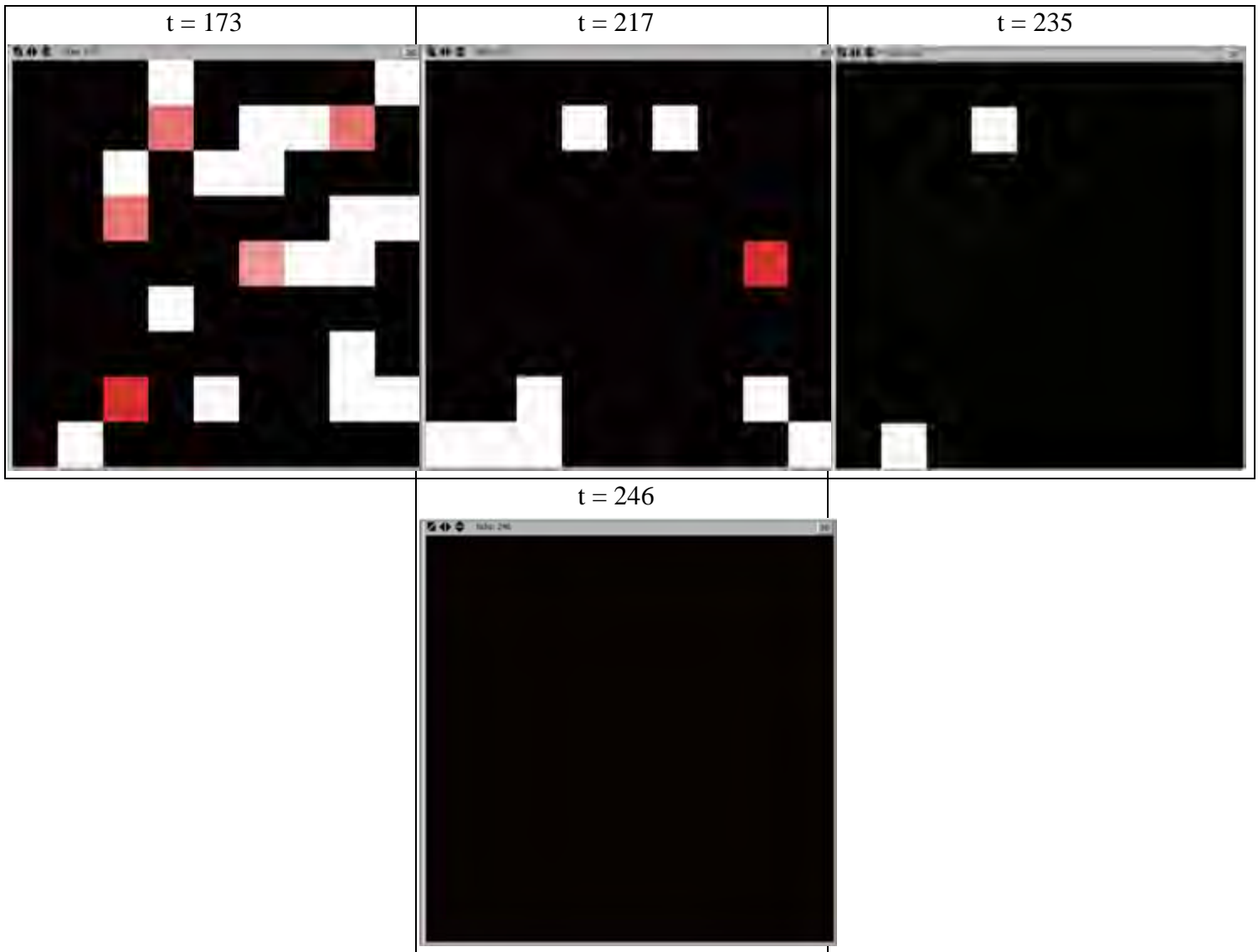


Figure 29 : Diffusion avec liens contraints par la distance  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

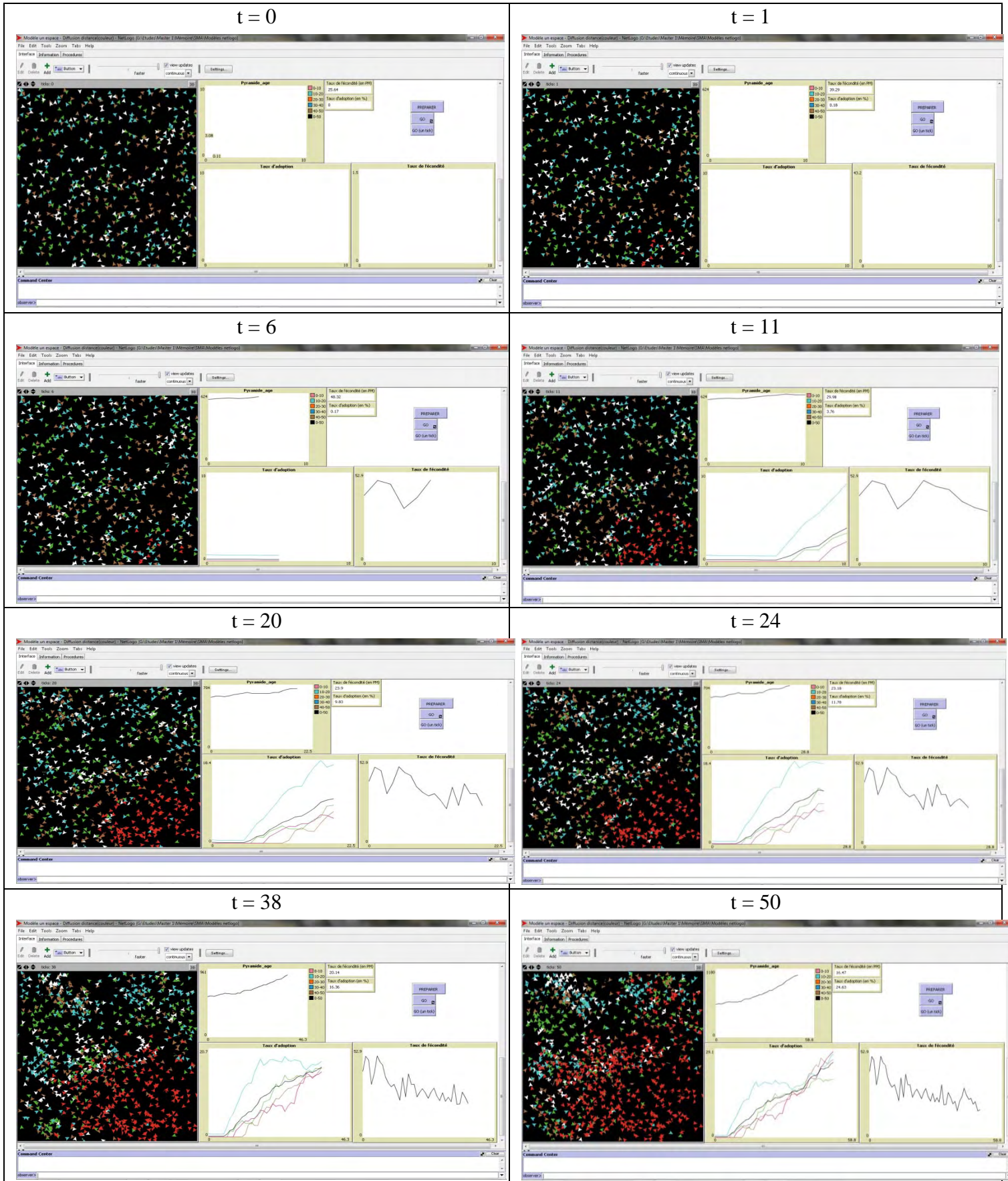
## **B) Le « dépeuplement » de l'espace virtuel**

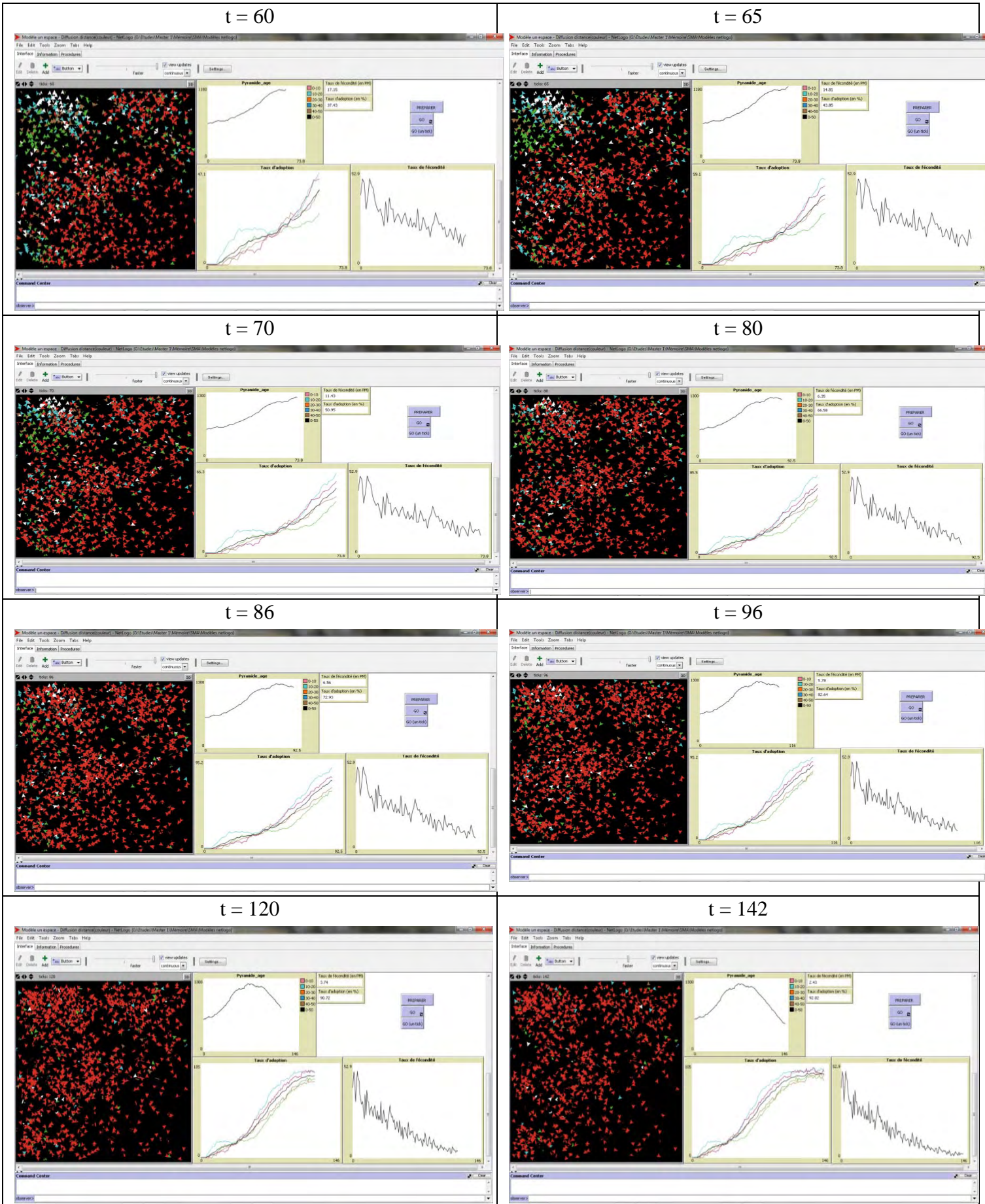
La deuxième forme spatiale ne s'observe que dans le modèle 3, c'est-à-dire avec une contrainte spatiale. Contrairement aux deux simulations présentées précédemment, l'aspect de la simulation suivante ne sera pas agrégé : chaque agent sera représenté et non les patches. Chaque agent possède une couleur symbolisant sa religion : vert pour les musulmans, marron pour les tribaux, cyan pour les chrétiens et blanc pour les hindous. Quand un agent adopte le message malthusien, il devient rouge.

La figure 30 représente plusieurs étapes d'une diffusion du modèle 3, avec contrainte spatiale pour la création des liens. Dans chaque image, l'espace virtuel avec les agents se trouve à gauche. Plusieurs graphiques sont visibles. Tout d'abord, le graphique en bas à droite représente le taux de fécondité en pour mille. Celui en bas à gauche trace le taux d'adoption par religion et le taux d'adoption général. La courbe cyan montre le taux d'adoption des chrétiens, la courbe marron celui des tribaux, la verte celui des musulmans, la violette celui des hindous, et la noire le taux d'adoption général (toutes religions confondues). La forme spatiale observée ici est un dépeuplement progressif de l'espace virtuel, mais spatialement organisé. En effet, la zone d'apparition de l'innovation sera la première à se dépeupler, puis les premières zones touchées par la vague de diffusion, pour terminer par les dernières zones dont les agents ont adopté le message. Ce dépeuplement s'explique par le fait que les agents « nouveau-nés » prennent le même « nombre d'enfants maximum » que leurs parents. Mais étant donné qu'ils ne naissent pas en ayant déjà adopté le message, s'ils l'adoptent par la suite, ils diviseront à nouveau leur « nombre d'enfants maximum » et leur « probabilité de faire un enfant » par deux. A partir de quelques générations d'agents, le « nombre d'enfants maximum » des agents sera inférieur à 1, engendrant une non-reproduction. En conséquence, l'espace concerné par ce type d'agents se dépeuplera petit à petit. Dans la figure 30, à  $t = 1$ , l'innovation apparaît en bas à gauche de l'espace virtuel. Dans les pas de temps suivants, la diffusion s'opère selon les processus étudiés dans le concept du chapitre 2. Le dépeuplement suit la vague de diffusion mais de manière décalée. Le premier dépeuplement se voit à  $t = 80$  en bas à gauche de l'espace virtuel, lieu d'apparition de l'innovation. Il est intéressant de noter que le dépeuplement s'effectue alors que toutes les parties de l'espace n'ont pas adopté le message malthusien. L'espace continue à se dépeupler dans le sens de la diffusion, ici dans le sens « nord-ouest ». A  $t = 253$ , les dernières zones encore peuplées d'agents sont celles qui ont été touchées en dernier par la diffusion (observable à  $t = 86$ ). La mort de tous les agents représente la situation finale à  $t = 505$ . Ce dépeuplement progressif symbolise un cas de figure que l'on peut retrouver au Japon, et dans une moindre mesure, en Allemagne. Dans ces pays, l'accroissement naturel est négatif et sans immigration, la population serait en décroissance chaque année. L'évolution des mentalités et des comportements reproducteurs en est la cause : les personnes de ces pays font de moins en moins d'enfants, au point de passer sous le seuil de remplacement. Sur le long terme, un pays où la

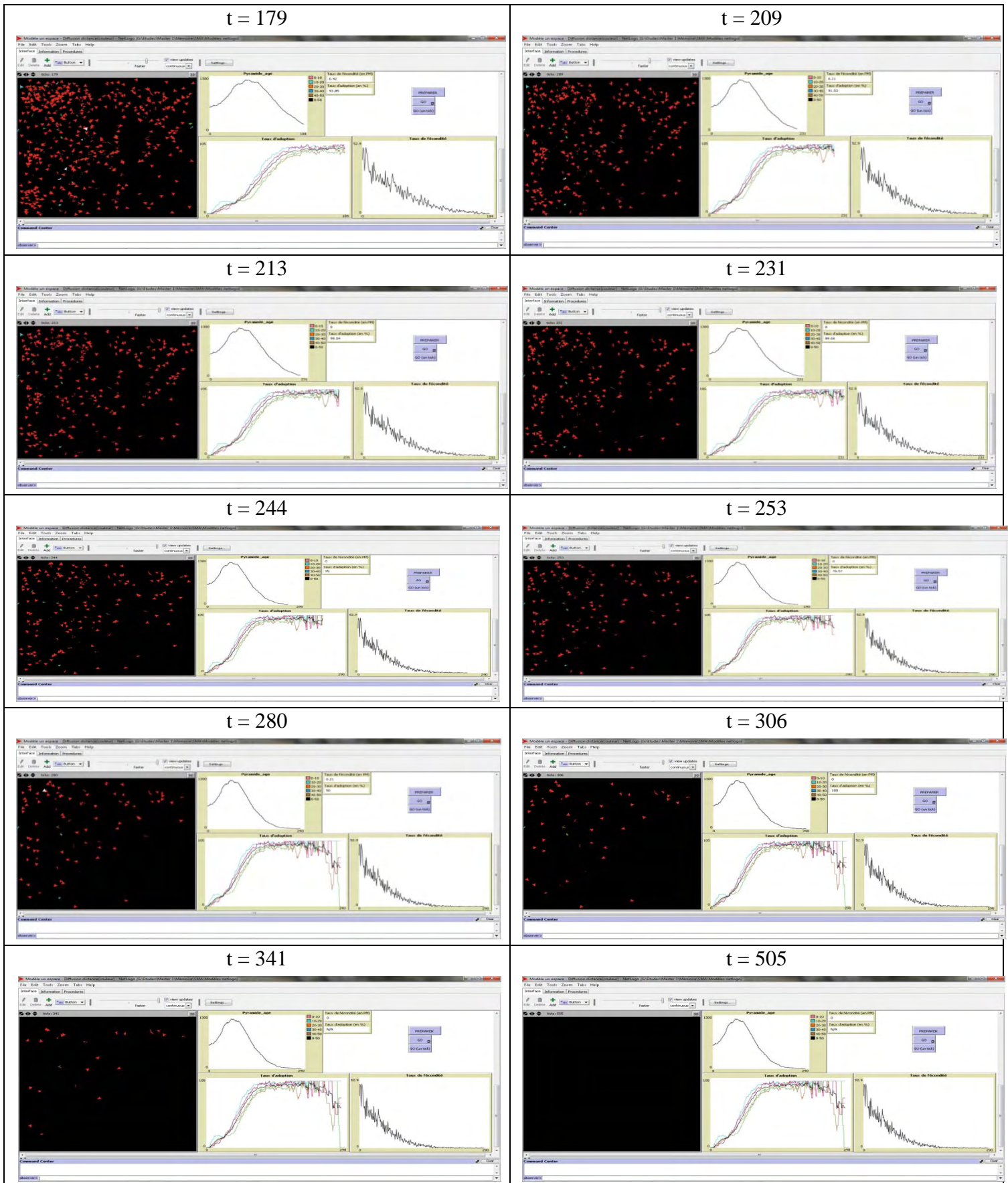
fécondité persiste sous le seuil de remplacement, ne peut que voir sa population diminuer à grande échelle. Ce phénomène spatial étudié, penchons-nous sur le dernier phénomène que nous étudierons : le « repeuplement » de l'espace après la vague de diffusion.

# Simuler la baisse de fécondité en Inde





## Simuler la baisse de fécondité en Inde



**Figure 30** : Diffusion par contrainte spatiale mettant en évidence le dépeuplement progressif  
Auteur : Yoann Doignon, 2010





### **C) La recolonisation de l'espace**

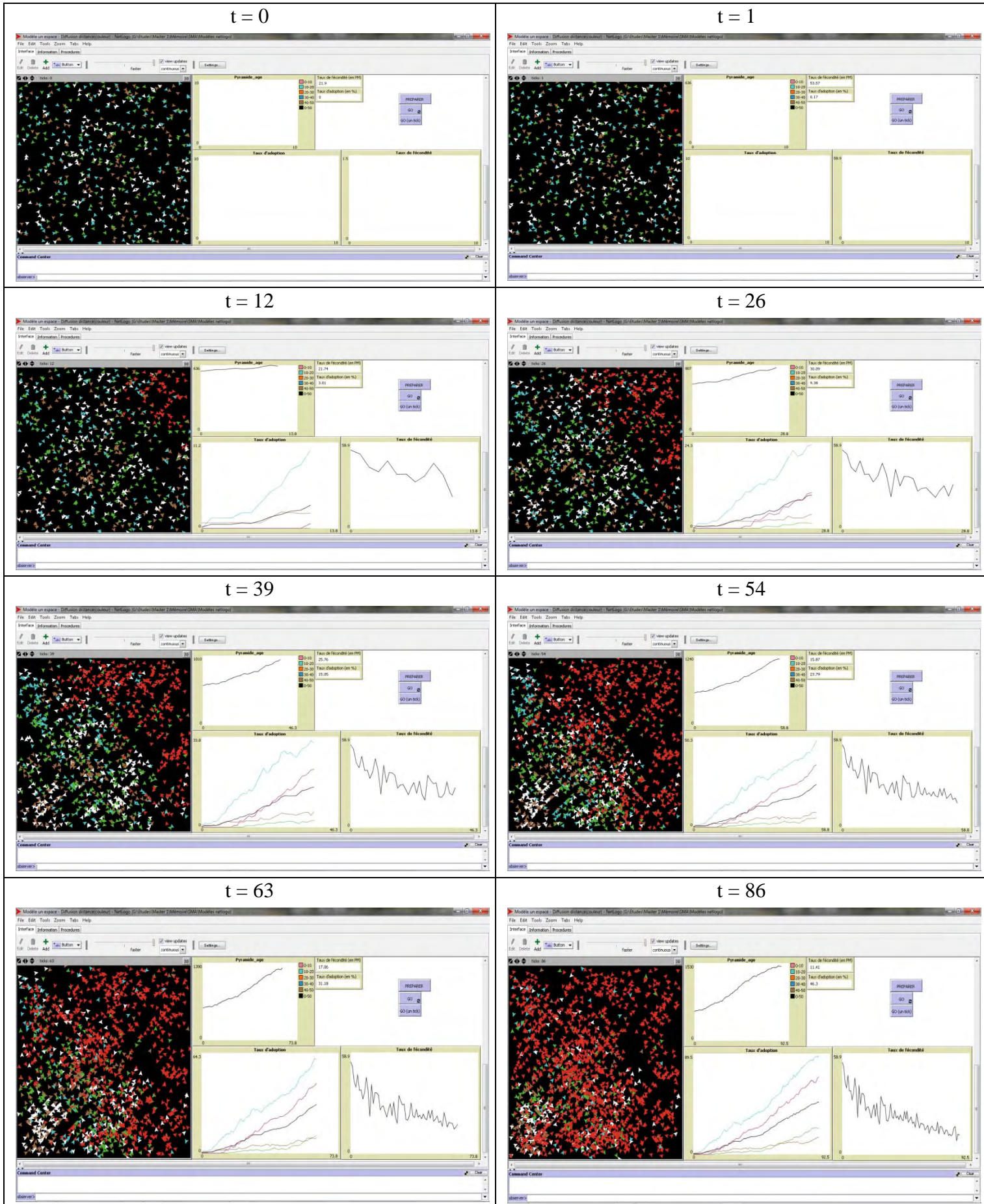
La dernière forme spatiale est un « repeuplement » de l'espace après la vague de « dépeuplement » engendrée par la diffusion. Ce phénomène se produit essentiellement dans certains types de paramétrages. En effet, par démarche expérimentale, nous avons remarqué qu'il se produisait plus souvent quand la « distance des liens » et la « probabilité d'adoption » étaient faibles et la « différence entre religions A et B » assez forte. En clair, les agents de religions A et B seront très hétérogènes de par leur probabilité d'adoption opposée : les hindous et les chrétiens auront tendance à accepter le message plus facilement, contrairement aux tribaux et musulmans qui le rejeteront plus durement.

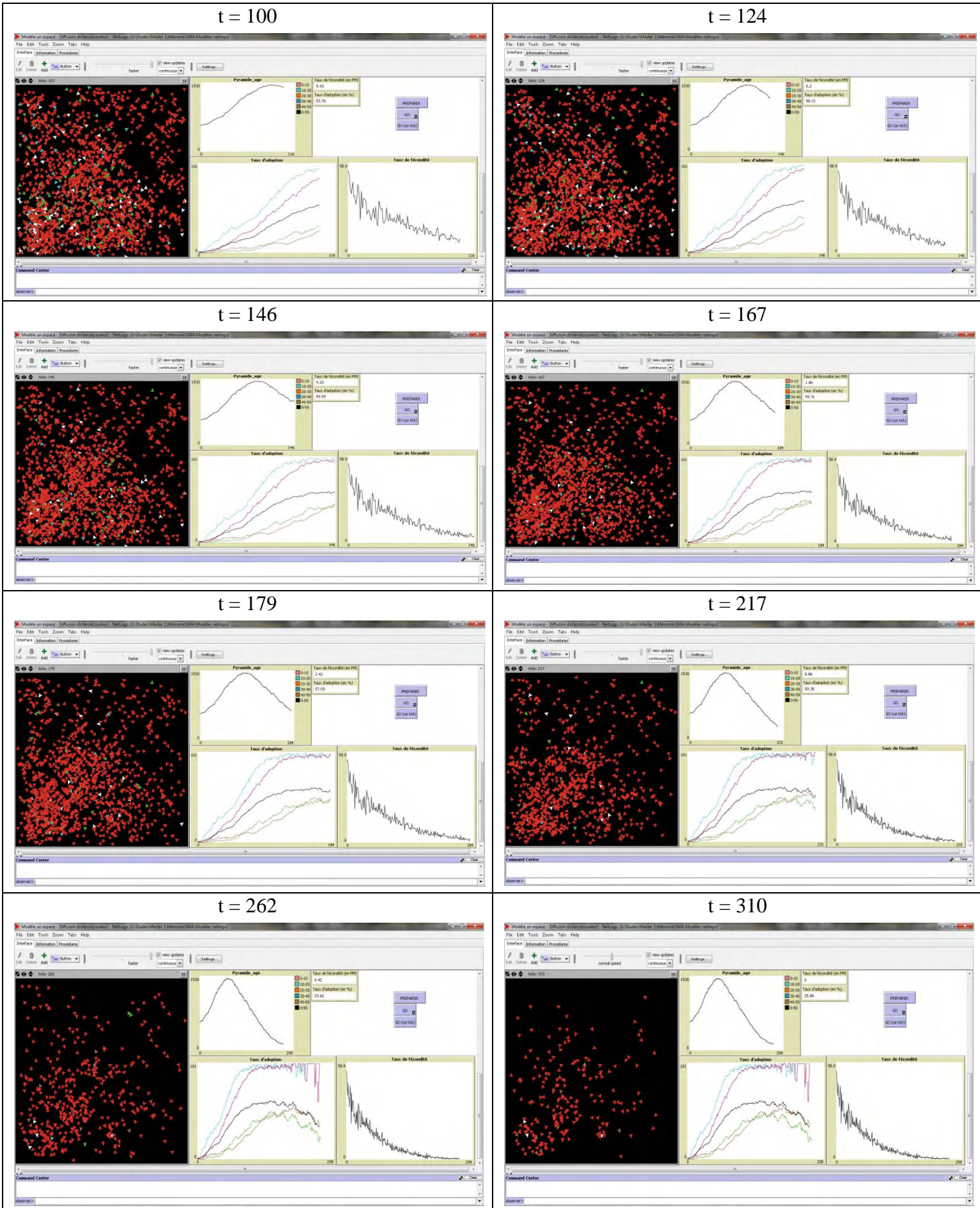
Le fait que « la distance des liens » soit faible renforce l'importance de l'isolement de certains agents : étant donné que la distance pour créer des liens est assez faible, il y a plus de chances qu'un agent ne soit à distance d'aucun agent, engendrant qu'il ne pourra pas diffuser le message malthusien s'il l'a adopté, mais dans le sens inverse également, il sera dans l'incapacité de le recevoir et de l'intégrer. De ce fait, cet agent continuera à faire plus d'enfants que les autres agents ayant adopté le message anti-nataliste. Et les enfants de cet agent, auront également plus de chance de ne pas être à distance d'un agent possédant le message. Nous l'avons bien compris, si un agent est isolé et qu'il n'a pas adopté le nouveau comportement démographique, il fera des enfants et « repeuplera » une partie de l'espace virtuel. Cet effet se combine évidemment avec la forme spatiale vue précédemment : la diffusion de la baisse de fécondité engendre un certain « dépeuplement », accentuant le possible isolement d'agent. Etant donné que les agents de religions B, dans ce cas-là de simulations, sont particulièrement hermétiques à la diffusion, il y a plus de chance qu'il persiste des poches de résistances (ou barrières). Pour observer ce type de forme spatiale, une simulation est effectuée (voir figure 31). Jusqu'à  $t = 355$ , nous remarquons surtout la forme spatiale de dépeuplement, suivant l'axe de diffusion « nord-est / sud-ouest ». Mais à  $t = 355$ , plusieurs agents tribaux subsistent au message en bas à gauche de l'espace virtuel. Ces agents font des enfants au fil des ticks, qui eux-mêmes se reproduisent. A  $t = 439$ , on se rend bien compte qu'ils sont plus nombreux que les agents ayant adopté le message et à  $t = 566$ , il ne reste plus qu'eux. A  $t = 705$ , la « recolonisation » est déjà en marche de par le quart de l'espace virtuel occupé par les agents de communauté tribale.

Concrètement, cela montre qu'une communauté religieuse trop différente des autres, n'ayant que des interactions locales et ne possédant pas les mêmes normes sociales que le reste du système social, aura une tendance à rejeter une nouvelle norme démographique, ou du moins, à l'accepter plus difficilement. A long terme, cette communauté aura plus de chance de « survivre » du fait qu'elle gardera une fécondité supérieure au seuil de remplacement, pendant que les autres communautés se dépeupleront. Bien évidemment, ce type d'interprétation n'est pas ajustable à la réalité, ce n'est qu'une tendance à ne considérer à long terme.

Il serait intéressant d'étudier plus en détail cette forme spatiale, de manière plus quantitative, afin de déterminer quels sont les paramètres qui influencent la production de ce phénomène, ou encore quel en est palier de paramétrage.

# Simuler la baisse de fécondité en Inde





## Simuler la baisse de fécondité en Inde

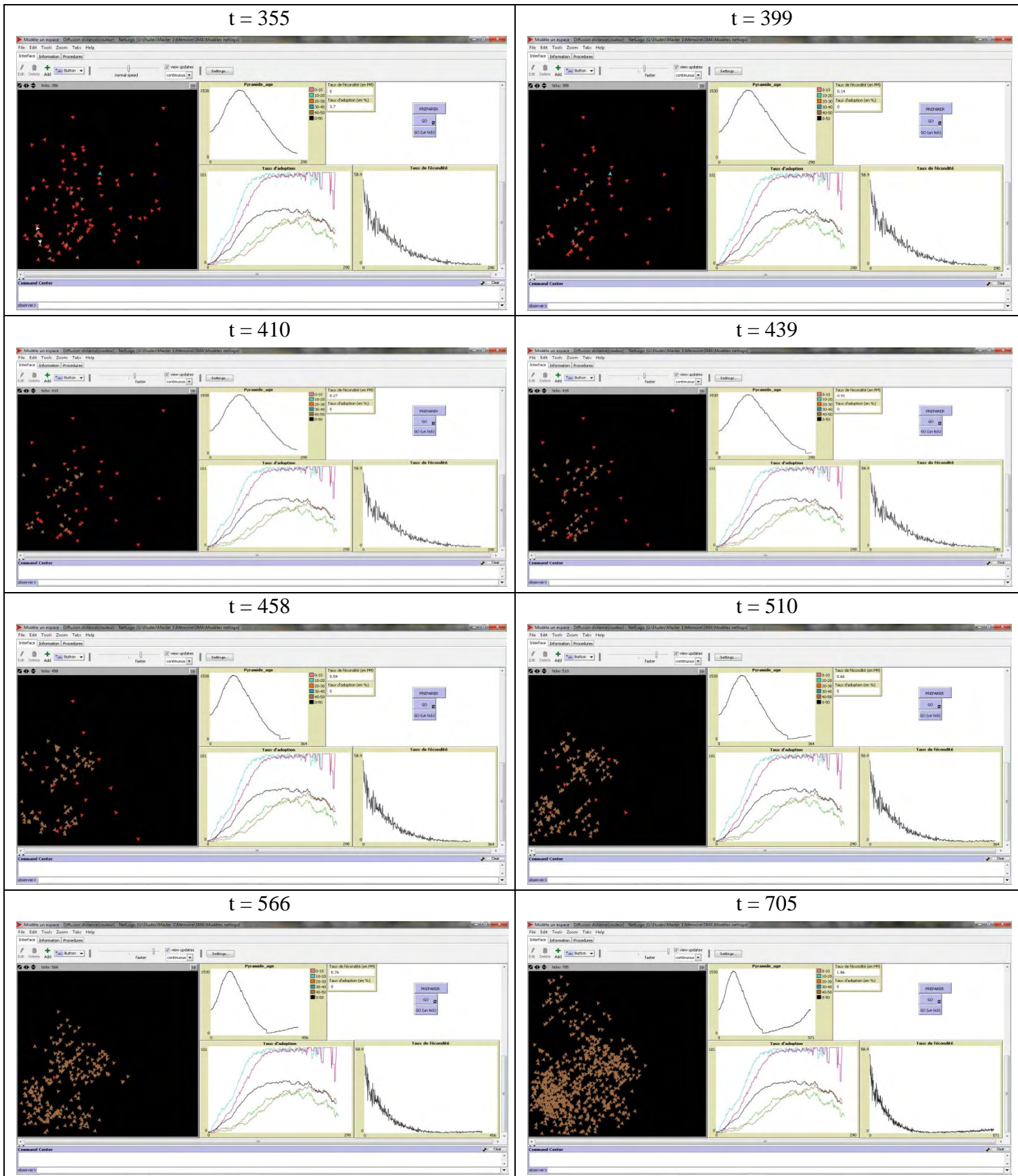


Figure 31 : Le "repeuplement" après la diffusion

Auteur : Yoann Doignon, 2010



## **Conclusion**

Le modèle présenté ici reste discutable par ses choix et ses prises en compte. Il ne reproduit pas le réel, car ce n'est pas son objectif. Etudier une diffusion spatiale à l'échelle « individu-centrée » reste pertinent. Dans ce cas-là, l'utilisation des Systèmes Multi-Agents apparaît justifiée et judicieuse.

Les apports de ce mémoire restent plus théoriques que thématiques. En posant des règles de comportements à l'échelle individuelle, il est possible de simuler une diffusion spatiale de l'innovation. De la manière dont est codé notre modèle Multi-Agents, plusieurs points sont à noter.

Premièrement, l'hétérogénéité des individus demeure essentielle dans l'étude d'une diffusion de l'innovation à l'échelle individu-centrée. Nous l'avons remarqué avec un basculement des variables les plus influentes sur la diffusion une fois l'hétérogénéité introduite dans le modèle. Il s'agit de variables utilisant la différence entre les deux types de religions : la proportion d'agents de chaque religion et le pourcentage de contacts intracommunautaires. De cette façon, il est aisé de signaler qu'au plus une communauté se renferme sur elle-même, c'est-à-dire au plus ses membres n'interagissent qu'avec des individus de la même communauté, au plus la diffusion nécessitera de temps pour atteindre tous les individus.

Deuxièmement, nous avons mis en évidence le rôle de la force de l'hétérogénéité. Elle modifie l'influence des variables sur la diffusion. Mais les variables ne réagissent pas de la même manière à une force d'hétérogénéité différente. Certaines influencent de façon linéaire la diffusion, alors que d'autres ne le font pas proportionnellement.

Simuler la diffusion du comportement malthusien à l'échelle individuelle nous permet d'observer plusieurs formes spatiales. Tout d'abord, le constat peut être fait que sans contrainte spatiale, il ne peut y avoir de diffusion spatiale telle qu'elle est conceptualisée chez Thérèse Saint-Julien.

La deuxième forme spatiale est le « dépeuplement » progressif de l'espace virtuel. Ce phénomène suit généralement le sens de la vague de diffusion, mais avec un temps de retard, le temps que le comportement malthusien entraîne une fécondité inférieure au seuil de remplacement.

La dernière forme spatiale observée est la possible « recolonisation » de l'espace après la vague de diffusion et le « dépeuplement ». Cette forme spatiale ne peut s'obtenir qu'avec une configuration spécifique des variables. Elle met en évidence la tendance qu'une communauté relativement fermée sur l'extérieur, et trop différente des autres communautés, aura tendance à accepter plus difficilement le comportement malthusien, gardant ainsi une haute fécondité.



Il faut cependant bien comprendre que ces formes spatiales ne doivent pas être transposées à la réalité. Les phénomènes existent déjà, mais s'effectuent sur le long terme. Il est donc impossible de prédire quoique ce soit sur l'avenir démographique de l'Inde, et cela pour deux raisons. Tout d'abord parce que le modèle n'a pas été créé dans un objectif prédictif. La seconde raison est que le modèle ne prend pas en compte les possibles réactions des gouvernements et des hommes face à ce problème de la régulation démographique afin d'atteindre l'équilibre du seuil de remplacement.

Par contre, plusieurs faiblesses de ce travail doivent être signalées.

Nous avons calculé l'influence des variables avec un taux de variation dépendant de simulations effectuées selon une méthode « toutes choses égales par ailleurs ». Mais il serait intéressant, et plus juste, d'étudier l'influence d'une variable sur la diffusion, en faisant varier toutes les variables à la fois.

Le modèle, tel qu'il est conçu, pourrait être utilisé pour étudier la transformation des structures familiales par la transition démographique et plus largement, l'étude de ses conséquences. Nous ne l'avons pas fait ici, mais il serait utile d'y penser dans un travail ultérieur.

Enfin pour terminer, nous n'avons pas quantifié ni rationalisé les formes spatiales. Il serait judicieux de regarder quels sont les paramétrages des variables afin d'obtenir une forme spatiale spécifique.

Toutes ces faiblesses demanderaient plus de temps dans le but de les traiter.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde



## **Bibliographie**

AMBLARD F. (2010), « Construire des sociétés artificielles pour comprendre les phénomènes sociaux réels », *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*

AMBLARD F., DUMOULIN N. (2004), « Mieux prendre en compte le temps dans les simulations individus-centrées », in *11<sup>ème</sup> Journées de Rochebrune, rencontre interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, le Temps dans les systèmes complexes*, Rochebrune, France, pp. 13-26

BADARIOTTI D., BANOS A., LAPERRIERE V. (2005), « Vers une approche individu centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 13 p.

BADARIOTTI D., BANOS A., MORENO D. (2007), « Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 16 p.

BONNEFOY JL, BOUSQUET F., ROUCHIER J. (2001), « Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents, pâture en forêt virtuelle », *Espace Géographique*, 1-2001, pp. 13-25

BONNEFOY J.L. (2005), *Étude de géographie théorique et expérimentale*. HDR de l'Université de Provence (3 vol.)

BOUSQUET F., GAUTIER D. (1999), « Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs" », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 13 p.

BRUNET R. (2005, 1<sup>ère</sup> édition 1992), « Diffusion » in BRUNET R., FERRAS R., THERY H. (2005, 1<sup>ère</sup> édition 1992), *Les mots de la géographie : dictionnaire critique*, Reclus-La Documentation Française, Collection Dynamiques du territoire, 518 p.

CLIFF A.D., ORD J.K., HAGGETT P., VERSEY G.R. (1981), *Spatial Diffusion : An Historical Geography of Epidemics in an Island Community*, Cambridge University Press, 248 p.

DAUDE E. (2003a), « Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 16 p.

DAUDE E. (2003b), *Modélisation de la diffusion d'innovation par la simulation multi-agents. L'exemple d'une innovation en milieu rural*, thèse, université d'Avignon et des pays du Vaucluse, 328 p.

DAUDE E, ELIOT E. (2005), « Exploration de l'effet des types de mobilités sur la diffusion des épidémies », *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, 17 p.

DEFFUANT G., AMBLARD F., BUBOZ R., RAMAT ERIC (2003), « Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée », *10èmes Journées de Rochebrune : Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, Epistémologie de la Simulation*, Rochebrune, Mégève, France, ENST Editions, pp. 45-64

DELRE, JAGER, BIJMOLT, JANSSEN (2007), « Targeting and timing promotional activities: An agent-based model for the takeoff of new products », *ScienceDirect, Journal of Business Research* 60, pp. 826–835

DE ROSNAY J. (1975), *Le microscope*, Seuil, 337 p.

DUMOLARD P. (2008), « Distances, accessibilité et diffusion spatiale » in THERIAULT M., DES ROSIERS F. (dir.), *Information géographique et dynamiques urbaines 2 : Accessibilité, environnement, paysage et valeur foncière*, Hermès, Lavoisier, 263 p.

EDWARDS M., HUET S., GOREAUD F., DEFFUANT G. (2003), « Comparaison entre un modèle individu-centré de diffusion de l'innovation et sa version agrégée dérivée par champ moyen pour des simulations à court terme », in HERZIG A., CHAIB-DRAA B., MATHIEU P. (2003), *Modèles formels de l'interaction, Actes des Secondes Journées Francophones*, Cépaduès, pp. 91-100.

ELLIOT E., DAUDE E. (2006), « Diffusion des épidémies et complexités géographiques : perspectives conceptuelles et méthodologiques », *Espace populations sociétés*, 2006.2-3, pp. 403-416

FERBER J. (1995), *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, 522 p.

GIRAUT F. (2009), « Innovation et territoires : les effets contradictoires de la marginalité », *Revue de Géographie Alpine*, 5 p.

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

GONZALEZ-BAILON S., MURPHY T. (2008), « When smaller families look contagious a spatial look at the French fertility using an agent-based simulation », *Discussion Papers in Economic and Social History*, n°71, 30 p.

GRINBLAT J. A. (2008), « L'évolution de la fécondité dans le monde depuis 1965 et ses conséquences », *Monde en développement* 2008/2, n° 142, pp. 13-22.

GUILMOTO C.Z. (1986), « Transition démographique en Inde du Sud : une exception « à la française » », in *Les Changements ou les Transitions Démographiques dans le Monde Contemporain en Développement*, Editions de l'ORSTOM, Paris, pp. 51-66

GUILMOTO C.Z. (1997a), « La géographie de la fécondité en Inde (1981-1991) », *Espace, populations, sociétés*, 1997-2-3, pp. 145-159

GUILMOTO C.Z. (1997b), « La population de l'Inde évolution historique et tendances contemporaines », *Historiens et géographes*, n°356, 26 p.

GUILMOTO C.Z. (2002), « Une lecture géographique des mécanismes de baisse de la fécondité en Inde », *Documents de recherche*, n° 1.2002, 23 p.

GUILMOTO C.Z. (2005a), « Fertility decline in India : maps, models and hypotheses », in GUILMOTO C.Z. and IRUDAYA RAJAN S., *Fertility Transition In South India*, Sage, New Delhi 452 p.

GUILMOTO C.Z. (2005b), « An analysis of the determinants of fertility behaviour in South India at the Village level », in GUILMOTO C.Z. and S. IRUDAYA RAJAN, *Fertility Transition in South India*, Sage, New Delhi, 452 p.

GUILMOTO C.Z. (2008), « L'inscription spatiale de la discrimination de genre en Inde. Effets de distances sociale et géographique », *Espace géographique*, 2008/1 – Tome 1, 15 p.

GUILMOTO C.Z., IRUDAYA RAJAN S. (2005), « Spatial patterns of fertility transition in Indian districts » in GUILMOTO C.Z. and IRUDAYA RAJAN S., *Fertility Transition In South India*, Sage, New Delhi 452 p.

HÄGERSTRAND T. (1953), *Innovation diffusion as a spatial process*, University of Chicago press, Chicago, 334p.

HÄGERSTRAND T. (1962), « The propagation of innovation waves », in WAGNER, MIKESELL (1962), *Readings in cultural geography*, Chicago, pp.355-368

HAGGETT P. (1968), « Mouvement et temps : le concept de diffusion » in HAGGETT P. (1968), *L'analyse spatiale en géographie humaine*, Armand Colin, Collection U, Paris pp. 67-72

HERAN F. (2005), « La population du monde pour les trois siècles à venir - explosion, implosion ou équilibre », *Population et sociétés*, n°408, janvier 2005, 4 p.

HUET S., DEFFUANT G., JAGER W. (2007), « Des dynamiques de différenciations individuelles peuvent accroître le conformisme global », ARCo'07 Cognition – Complexité – Collectif, 28-30 Novembre, Nancy

LANGLOIS P., DAUDE E., (2004), « Les formes de diffusion », *Geopoint* 2004, 5 p.

LANGLOIS P., DAUDE E. (2007), « Concepts et modélisations de la diffusion géographique », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 24 p.

LEVY M.L. (1986), « Les transitions démographiques », *Population et sociétés*, n°207

LEVY M.L. (1994), « Anthropologie statistique », *Population et sociétés*, n°295

OLIVEAU S. (1999), « Etude géographique d'un phénomène démographique : la baisse de la fécondité au Tamil Nadu (Inde) », DEA Géographie et pratique du développement dans le Tiers Monde, Université de Paris X Nanterre, Juin 1999

OLIVEAU S. (2005), « Mapping out fertility in South India » in GUILMOTO C.Z. and IRUDAYA RAJAN S., *Fertility Transition In South India*, Sage, New Delhi 452 p.

OLIVEAU S., CHASLES V. (2005), « Sur les chemins de l'école : accessibilité et alphabétisation dans le monde rural Sud-indien », *Espace populations sociétés*, 2005/3, pp. 453-464

OLIVEAU S., GUILMOTO C.Z. (2005), « Spatial correlation and demography. Exploring India's demographic patterns », Communication à la XXVth IUSSP International Population Conference, 18-23 juillet 2005, Tours.

PISON G., BELLOC S. (2005), « La population mondiale... et moi ? Une exposition à la Cité des sciences et de l'industrie à Paris », *Population et sociétés*, n°412, mai 2005, 4 p.

RAFFESTIN C. (1991), « La diffusion », in BAILLY et Al. (1991), *Les concepts de la géographie humaine*, Masson Paris, Chapitre 19, pp. 189-193

ROCHE S., HUMEAU J-B (1999), « La diffusion spatiale des technologies de l'information géographique en France », *Mappemonde*, n°53, pp. 20-25

ROGERS E. (1995, 1ère édition 1962), *Diffusion of innovations*, Free Press, New York, 518 p.

SAINT-JULIEN T. (1985), *La diffusion spatiale des innovations*, Montpellier, GIP RECLUS, 37 p.

SAINT JULIEN T. (1992), « Diffusion Spatiale », in BAILLY A., FERRAS R., PUMAIN D., *Encyclopédie de Géographie*, Paris, Economica, 1992, 2ème éd. 1995, pp. 577-598

SAINT-JULIEN T., (2001), « Processus de diffusion spatiale et modélisations du changement » in SANDERS L. (2001), *Modèles en analyse spatiale*, 328 p.

SCHULZE C. (2004), « Sznajd opinion dynamics with global and local neighborhood », *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 15, No. 6, pp. 867-872

STEYER A., ZIMMERMANN J.B. (2004), « Influence sociale et diffusion de l'innovation », *Math. & Sci. hum. / Mathematics and Social Sciences*, n°168, pp. 43-57

SZNAJD-WERON K., SZNAJD J. (2000), « Opinion evolution in closed community », *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 11, No. 6, pp. 1157-1165

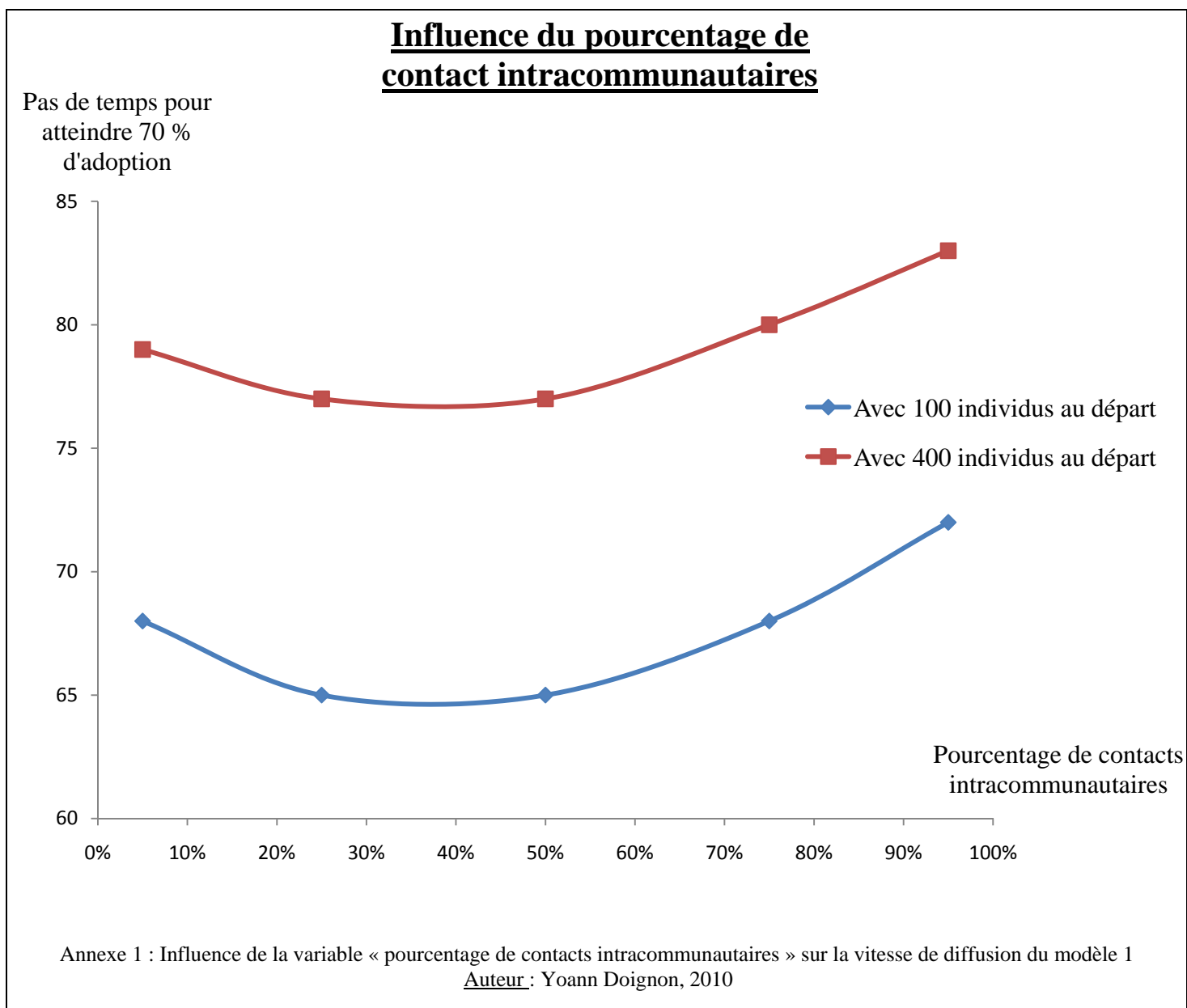


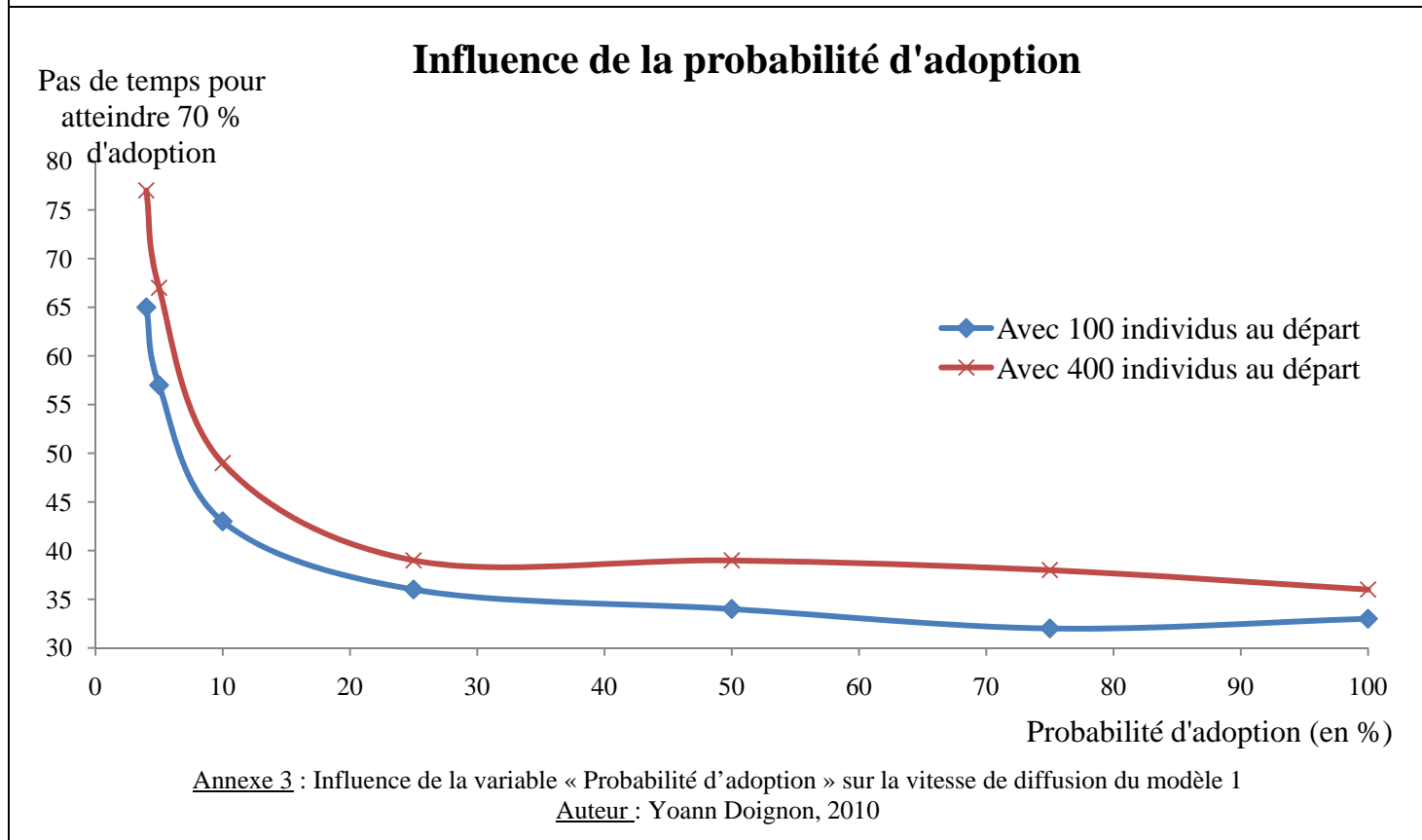
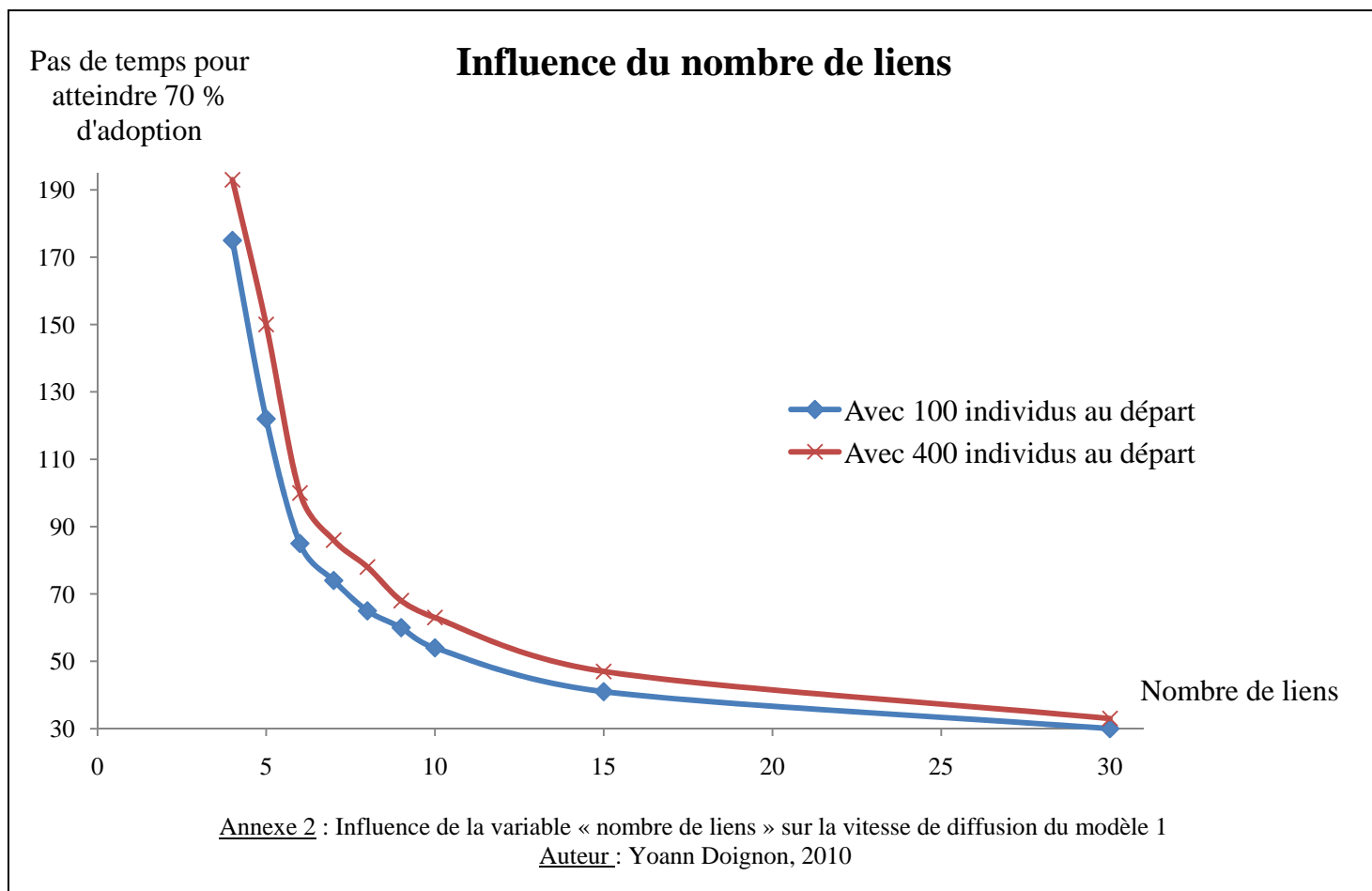


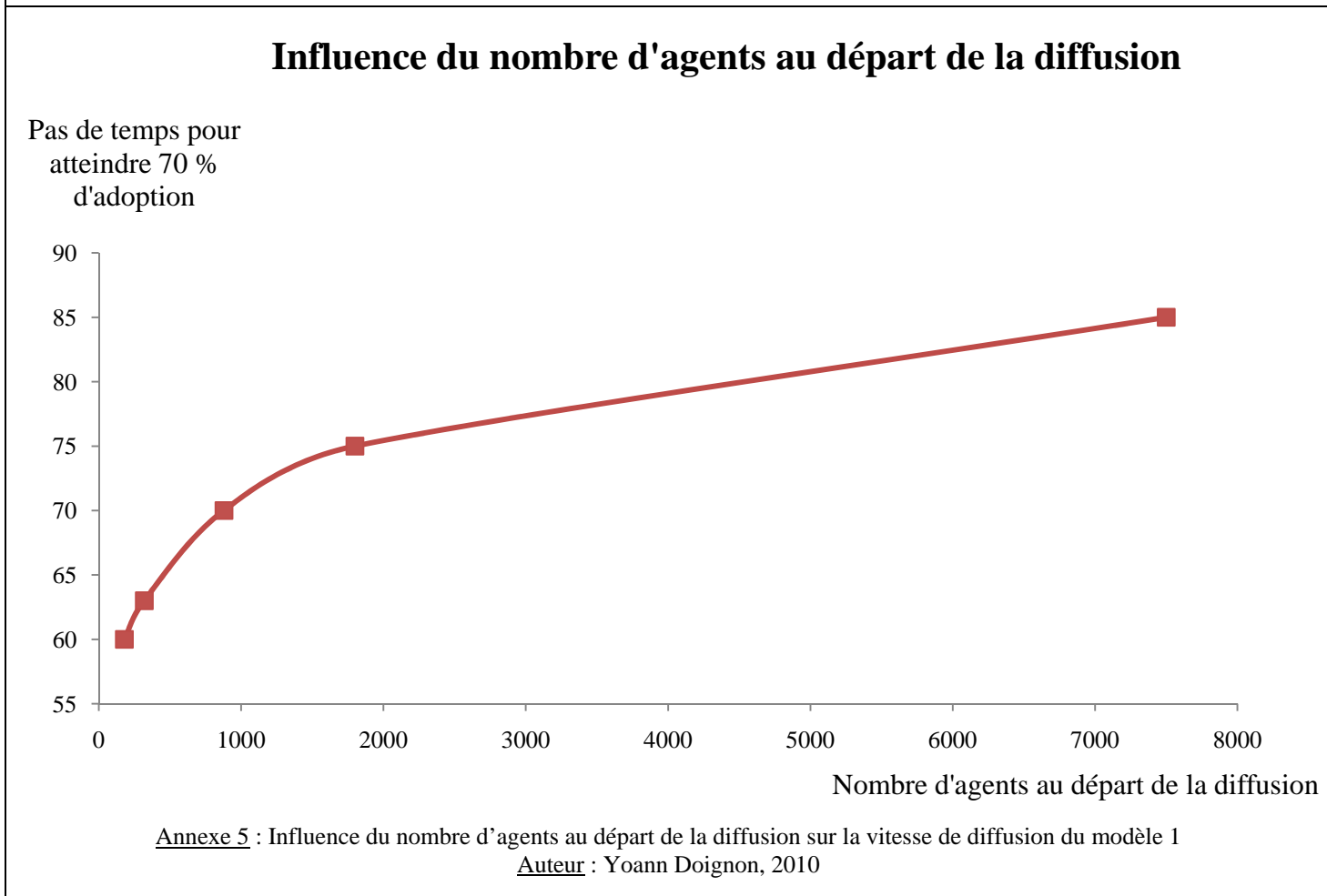
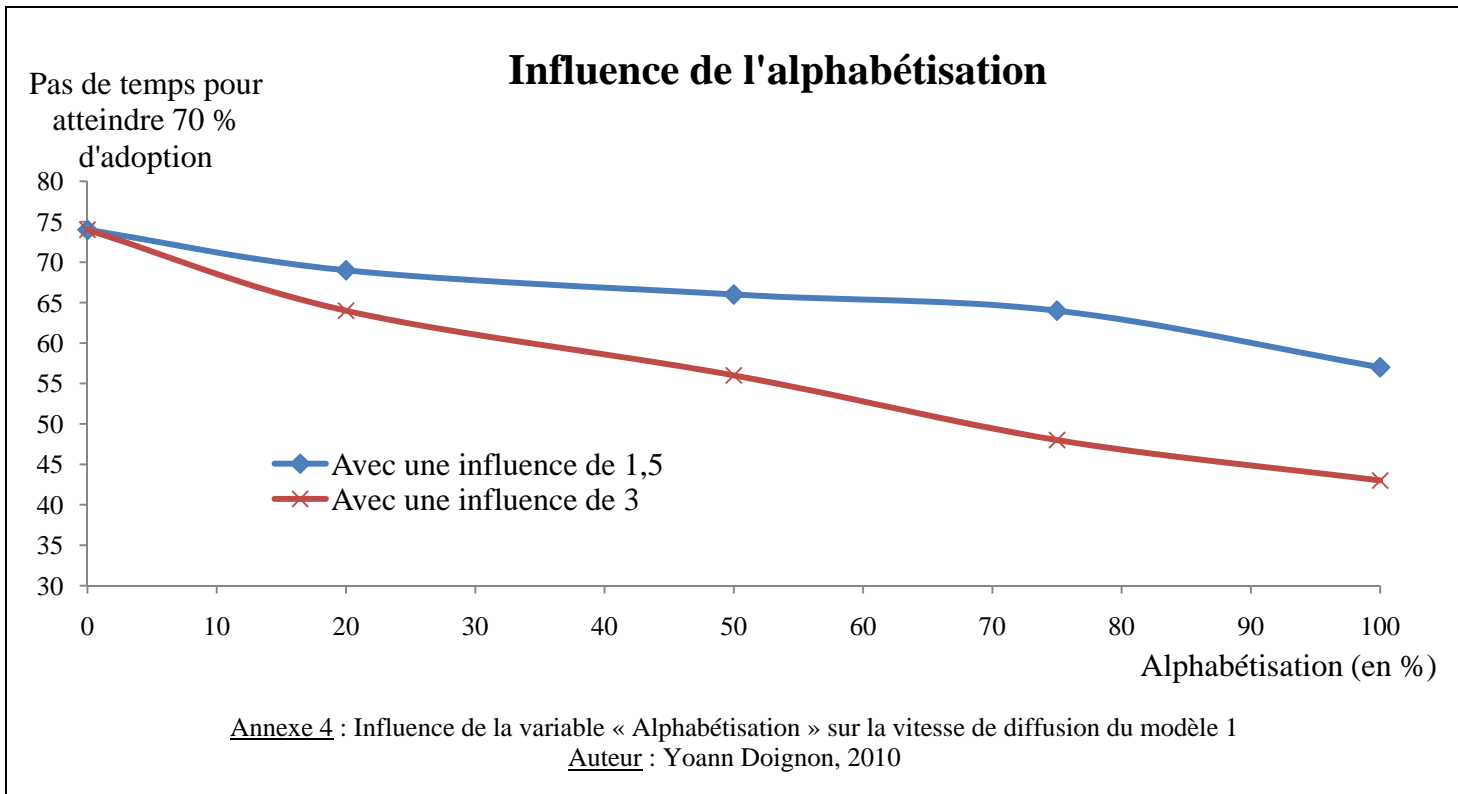
## Annexes

Dans cette partie d'annexes, sont exposés les résultats appelés dans le chapitre 3 du mémoire. Par convention, nous utilisons l'appellation « modèle 1 » pour le modèle de diffusion par liens aléatoires parmi des agents homogènes, « modèle 2 » pour le modèle de diffusion par liens aléatoires parmi des agents hétérogènes et « modèle 3 » pour le modèle de diffusion avec les liens contraints par la distance parmi des agents hétérogènes.

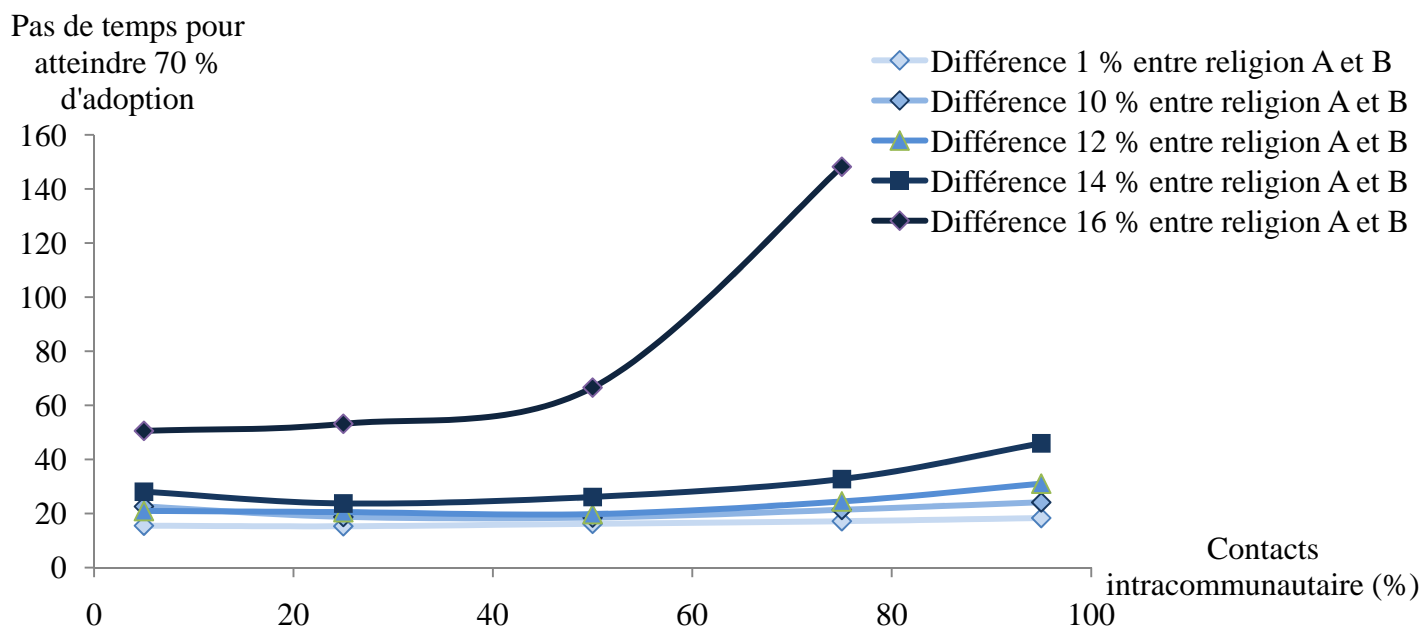
L'intensité de l'hétérogénéité des agents s'apprécie par la variation de la variable « différence entre les religions de type A et de type B ». Dans les modèles 2 et 3, cette variable varie.





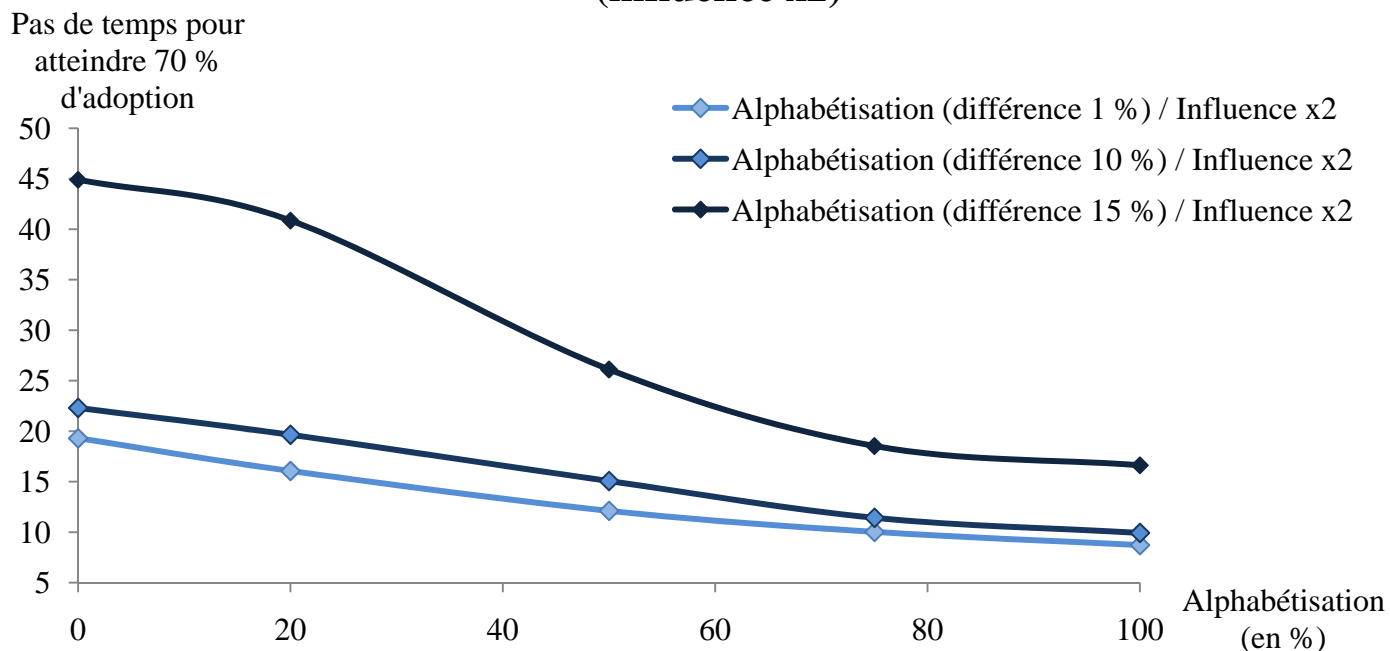


### Influence du pourcentage des contacts intracommunautaires



Annexe 6 : Influence de la variable « Pourcentage des contacts intracommunautaires » sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

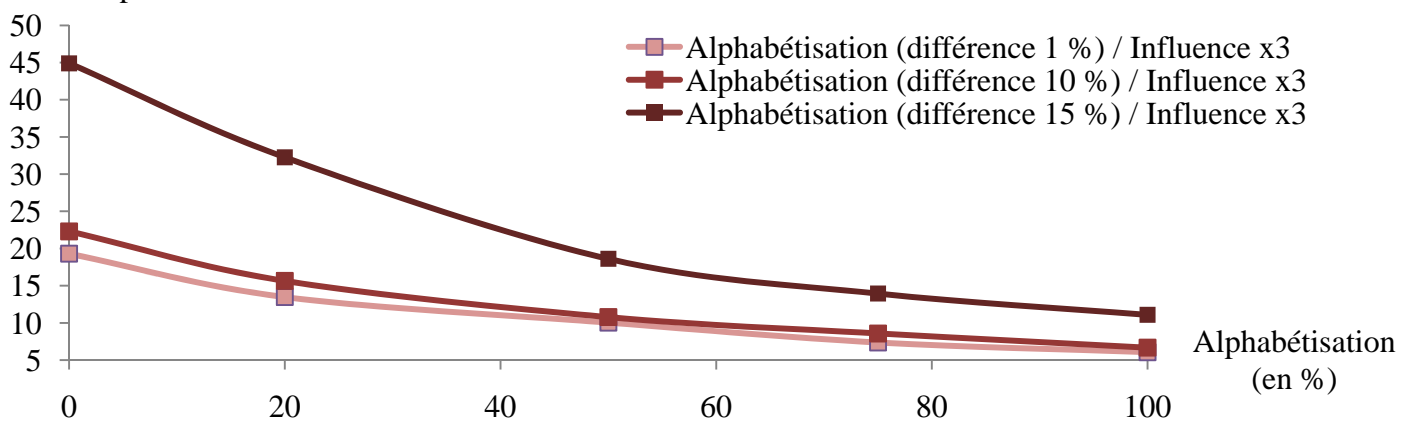
### Influence de l'alphabétisation (influence x2)



Annexe 7 : Influence de la variable « alphabétisation » à influence x2 sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de l'alphabétisation (influence x3)

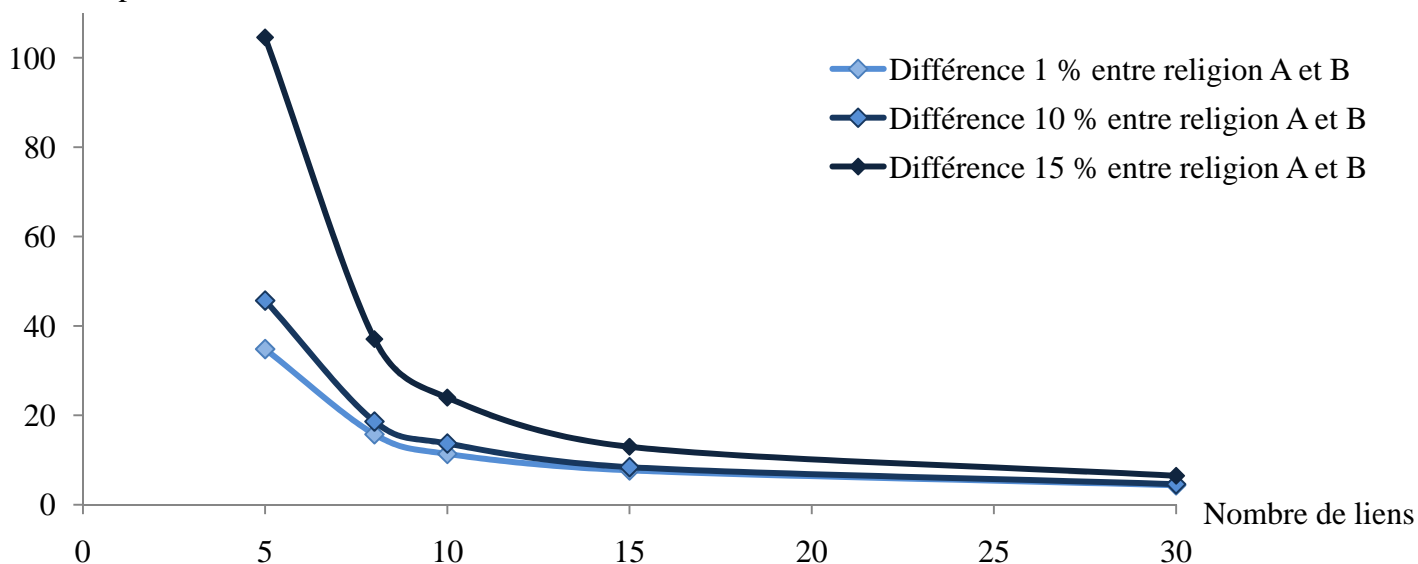
Pas de temps pour  
atteindre 70 %  
d'adoption



Annexe 8 : Influence de la variable « Alphabétisation » à influence x3 sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre de liens

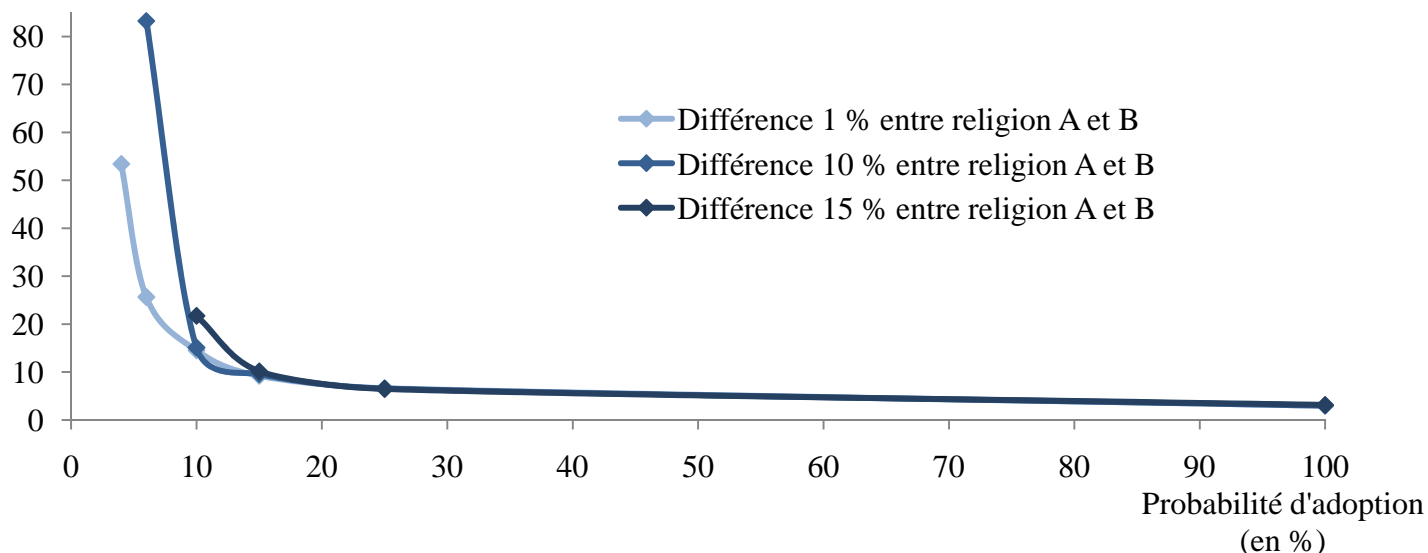
Pas de temps pour  
atteindre 70 %  
d'adoption



Annexe 9 : Influence de la variable « Nombre de liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la probabilité d'adoption

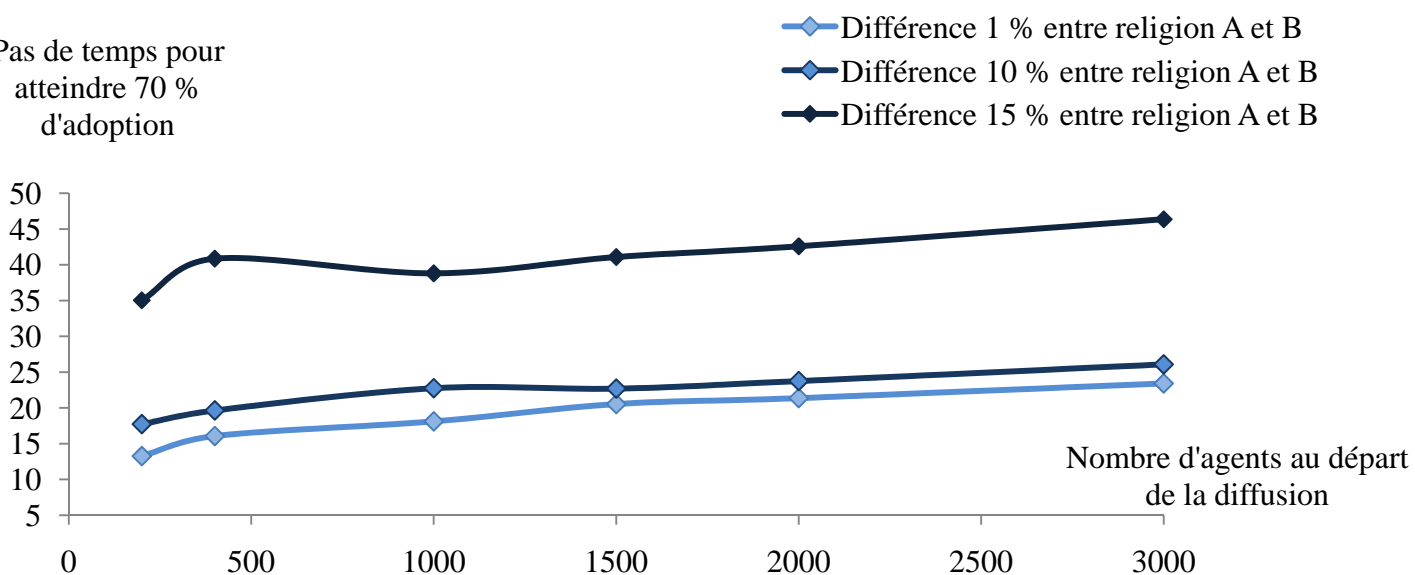
Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption



Annexe 10 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

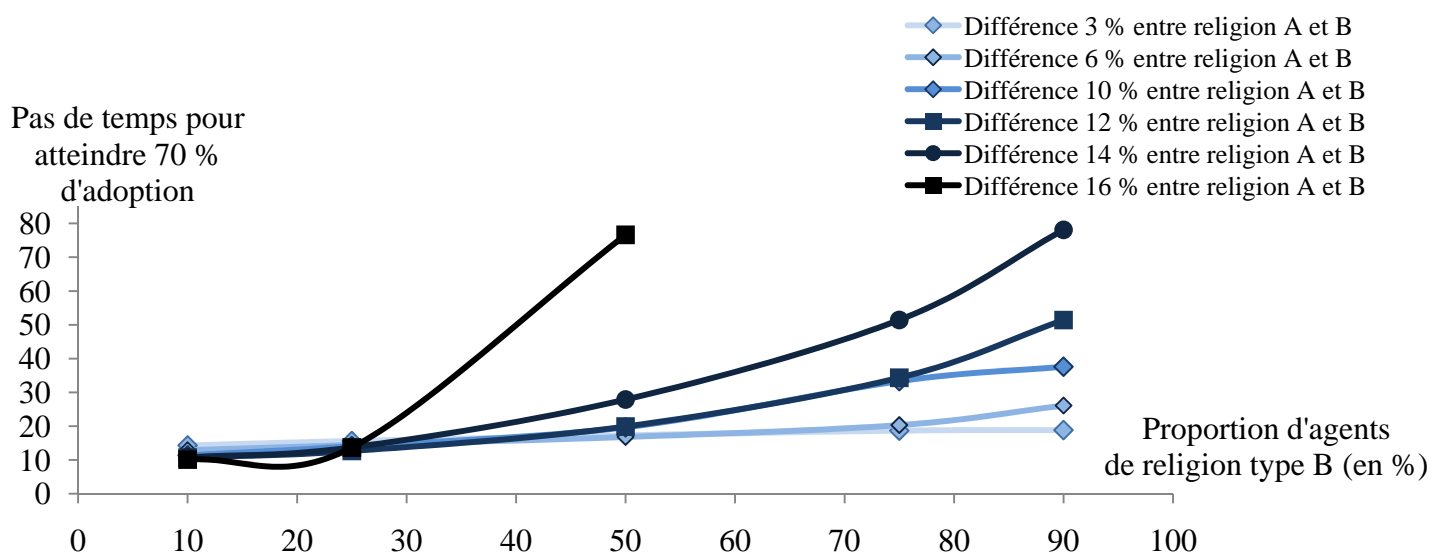
### Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion

Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption



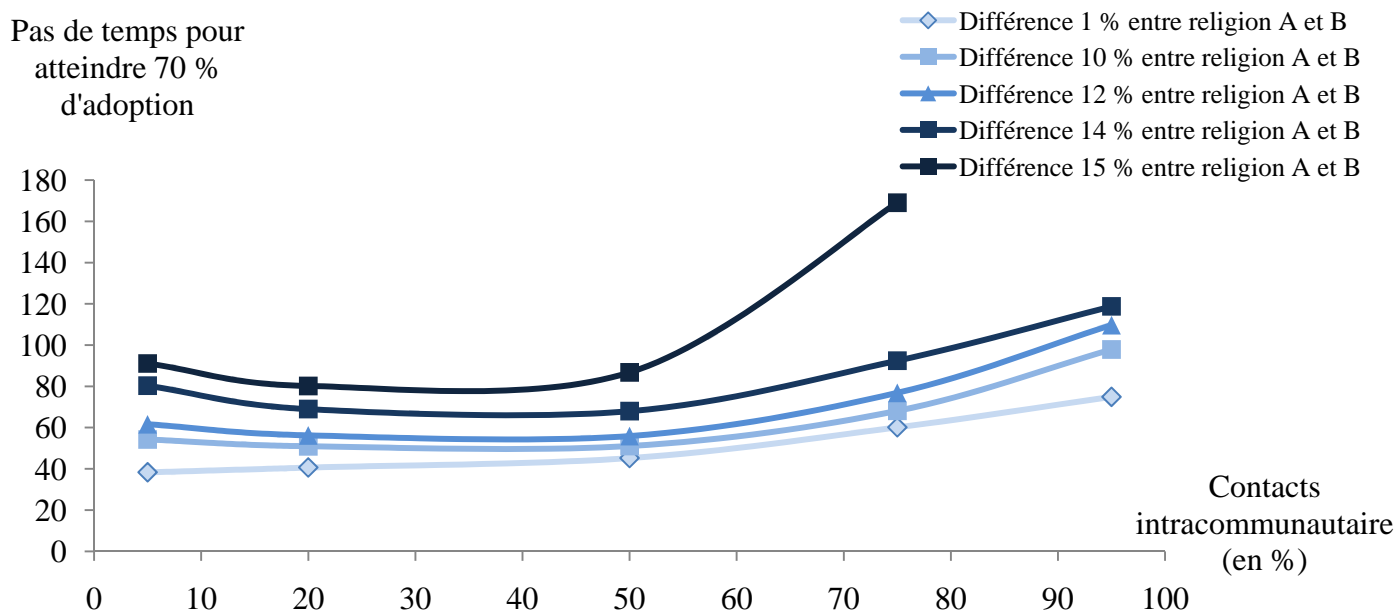
Annexe 11 : Influence du nombre d'agents au départ sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la proportion d'agents de religion type B au départ de la simulation



Annexe 12 : Influence de la proportion d'agents de religion type B au départ de la simulation sur la vitesse de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du pourcentage de contacts intracommunautaire

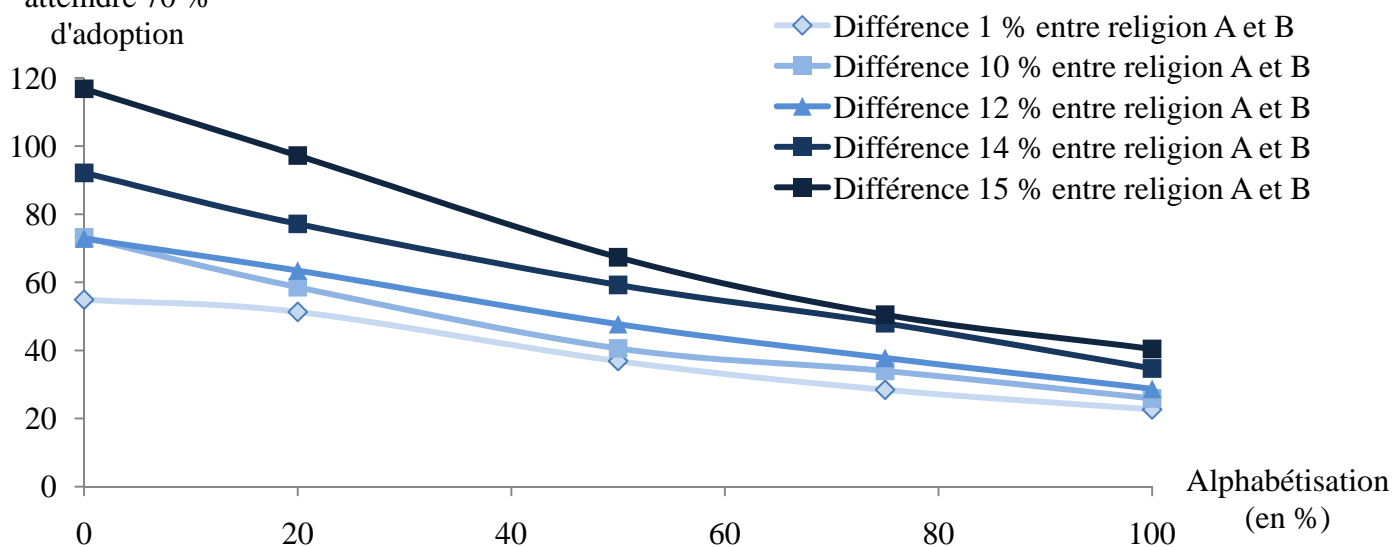


Annexe 13 : Influence de la variable « Pourcentage de contacts intracommunautaires » sur la vitesse de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010



### Influence de l'alphabétisation (influence x2)

Pas de temps pour  
atteindre 70 %  
d'adoption

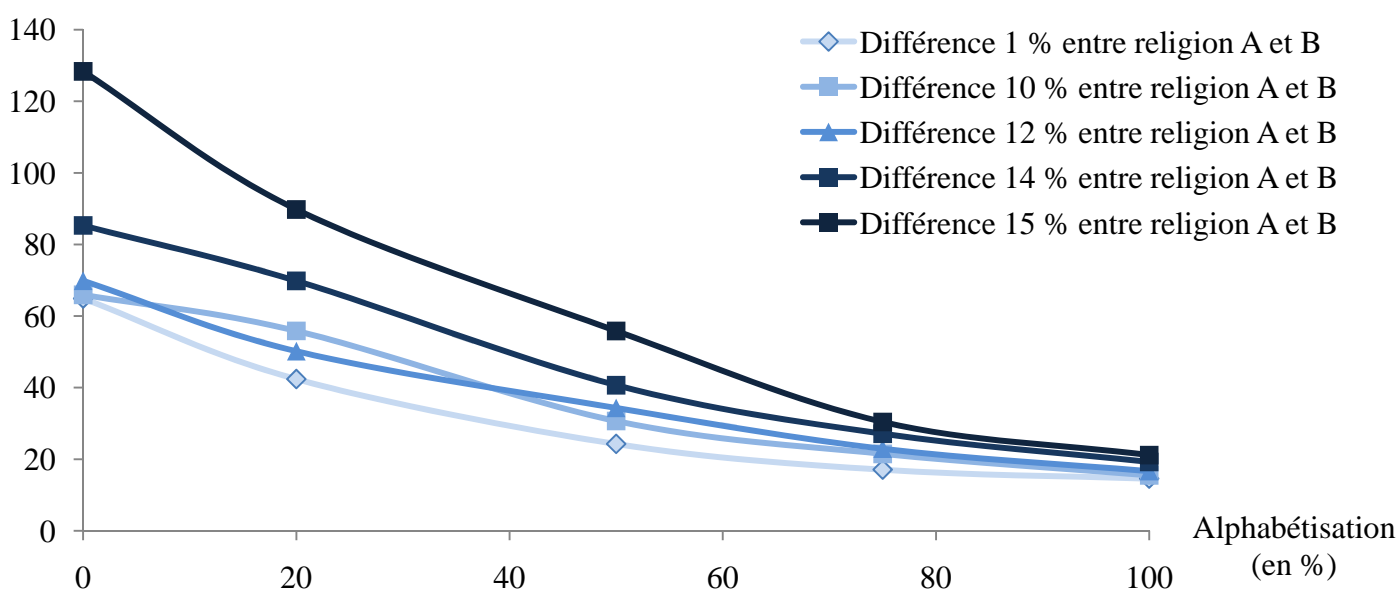


Annexe 14 : Influence de la variable « alphabétisation » à influence 2 sur la vitesse de diffusion du modèle 3

Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de l'alphabétisation (influence x3)

Pas de temps pour  
atteindre 70 %  
d'adoption

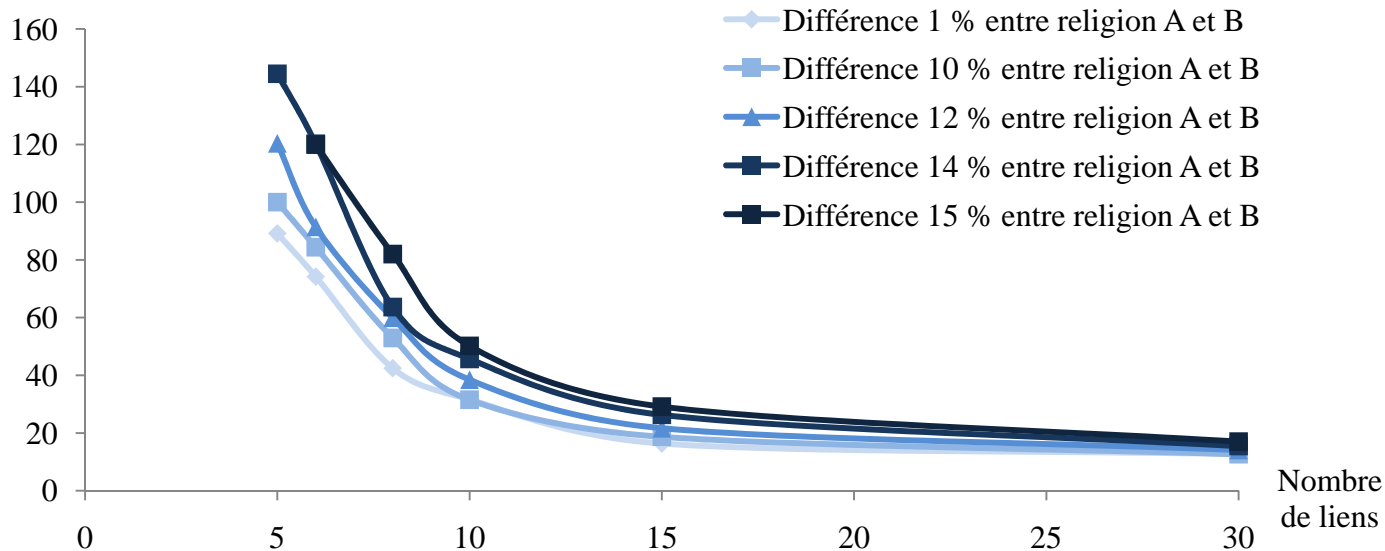


Annexe 15 : Influence de la variable « alphabétisation » à influence 3 sur la vitesse de diffusion du modèle 3

Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre de liens

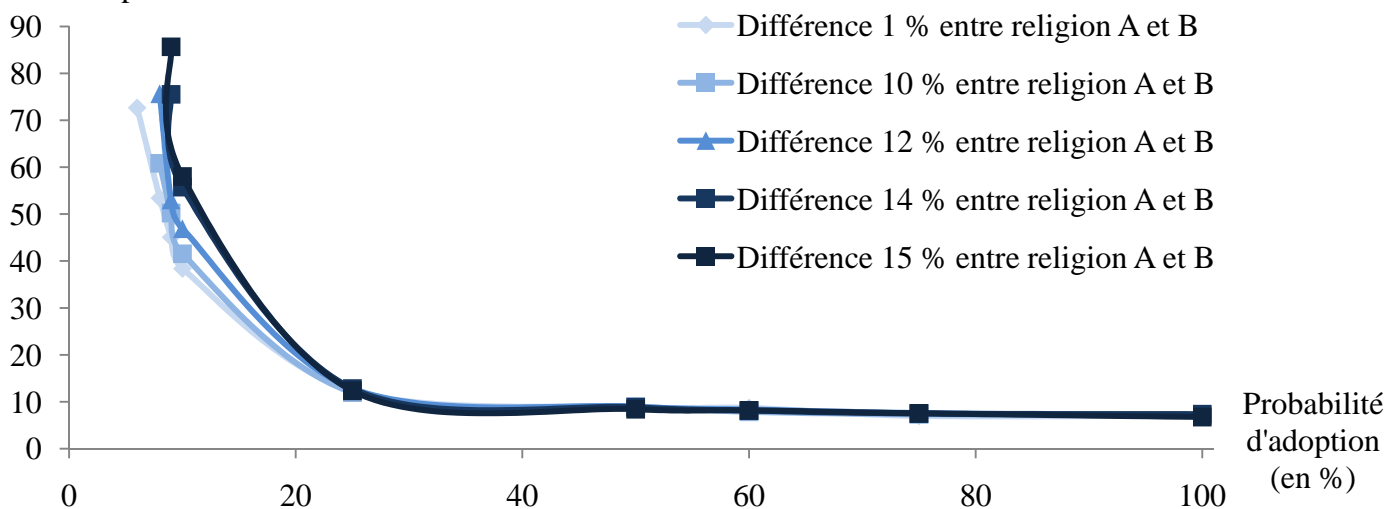
Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption



Annexe 16 : Influence de la variable « Nombre de liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la probabilité d'adoption

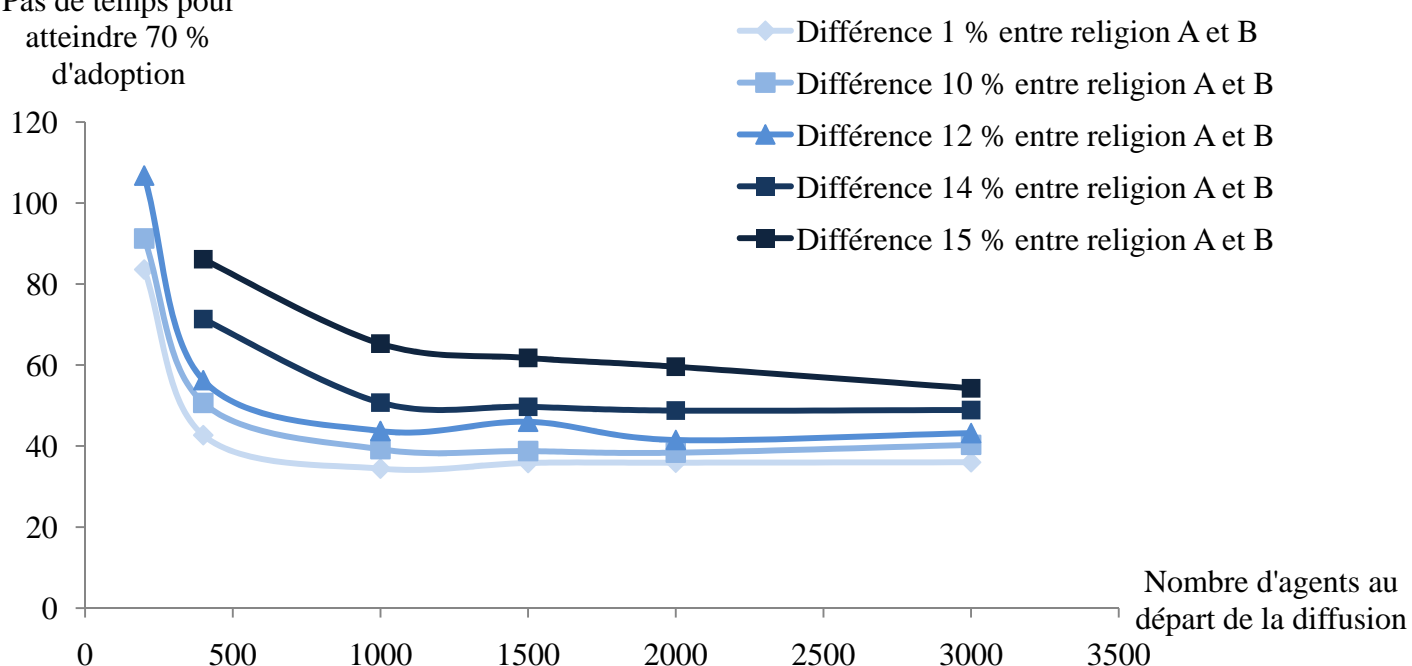
Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption



Annexe 17 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur la vitesse de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion

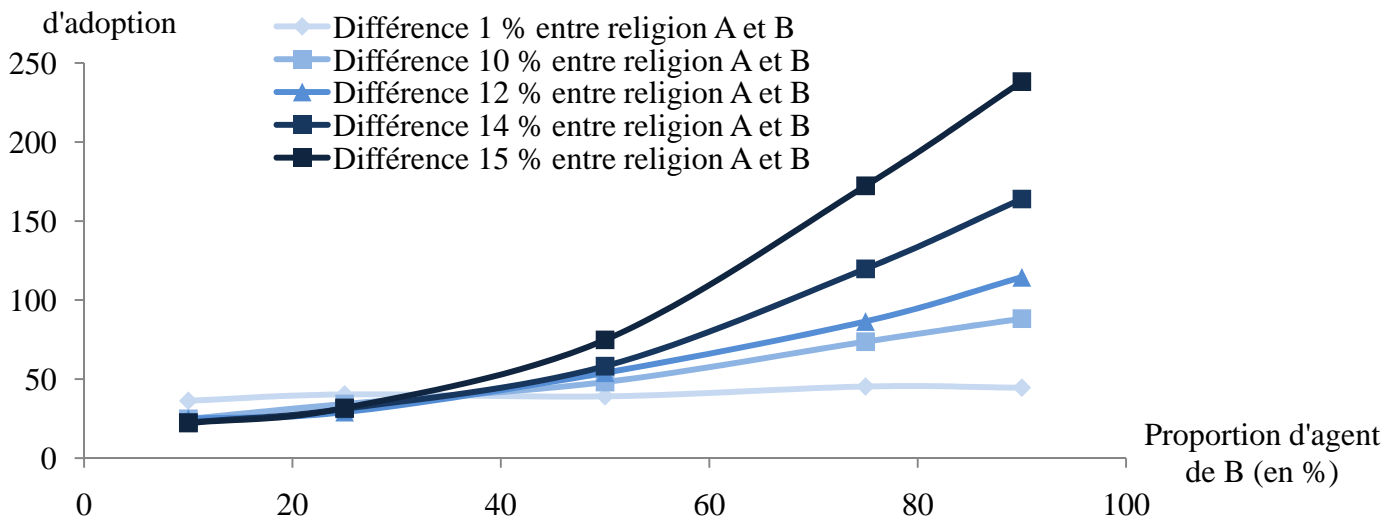
Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption



Annexe 18 : Influence du nombre d'agents au départ sur la vitesse de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la proportion d'agents de religion type B au départ de la simulation

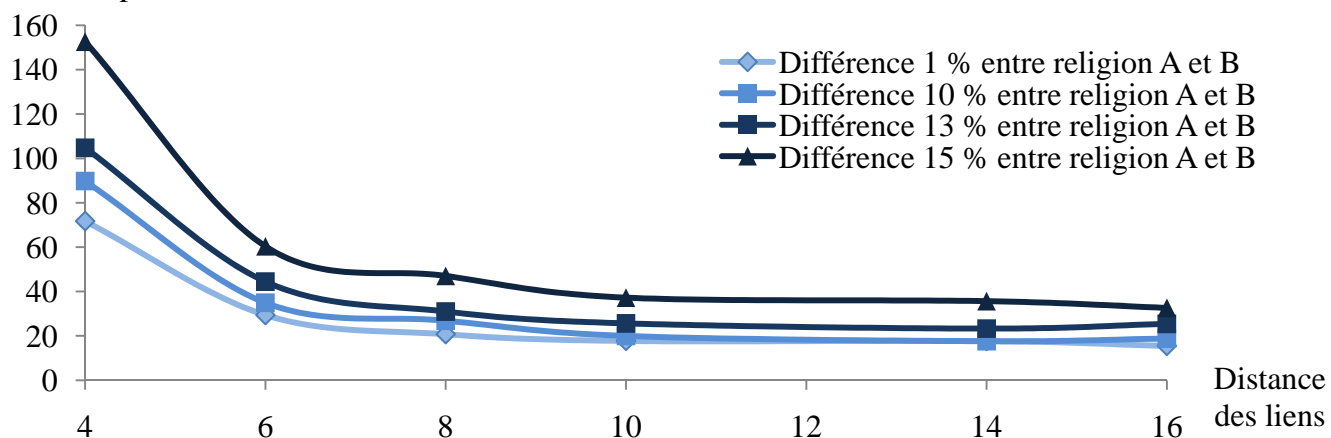
Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption



Annexe 19 : Influence de la proportion d'agents de religion B au départ sur la vitesse de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la distance du lien

Pas de temps pour atteindre 70 % d'adoption

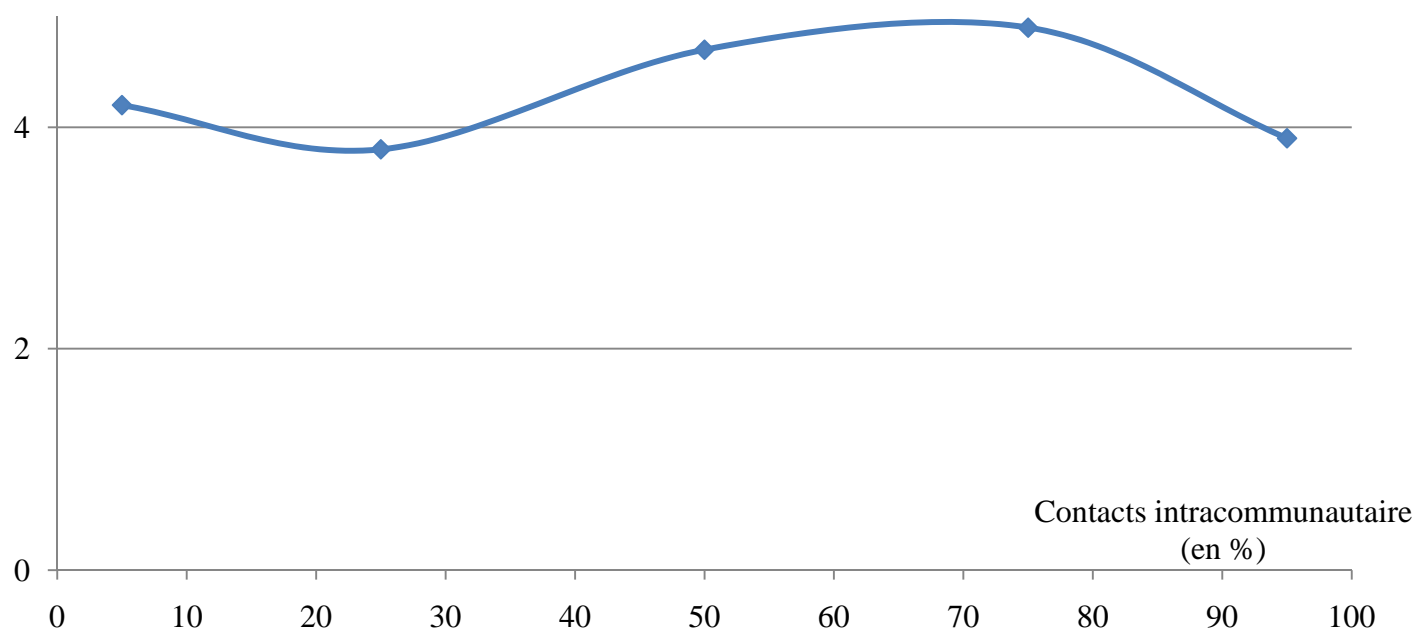


Annexe 20 : Influence de la variable « distance des liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 3

Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du pourcentage de contacts intracommunautaire

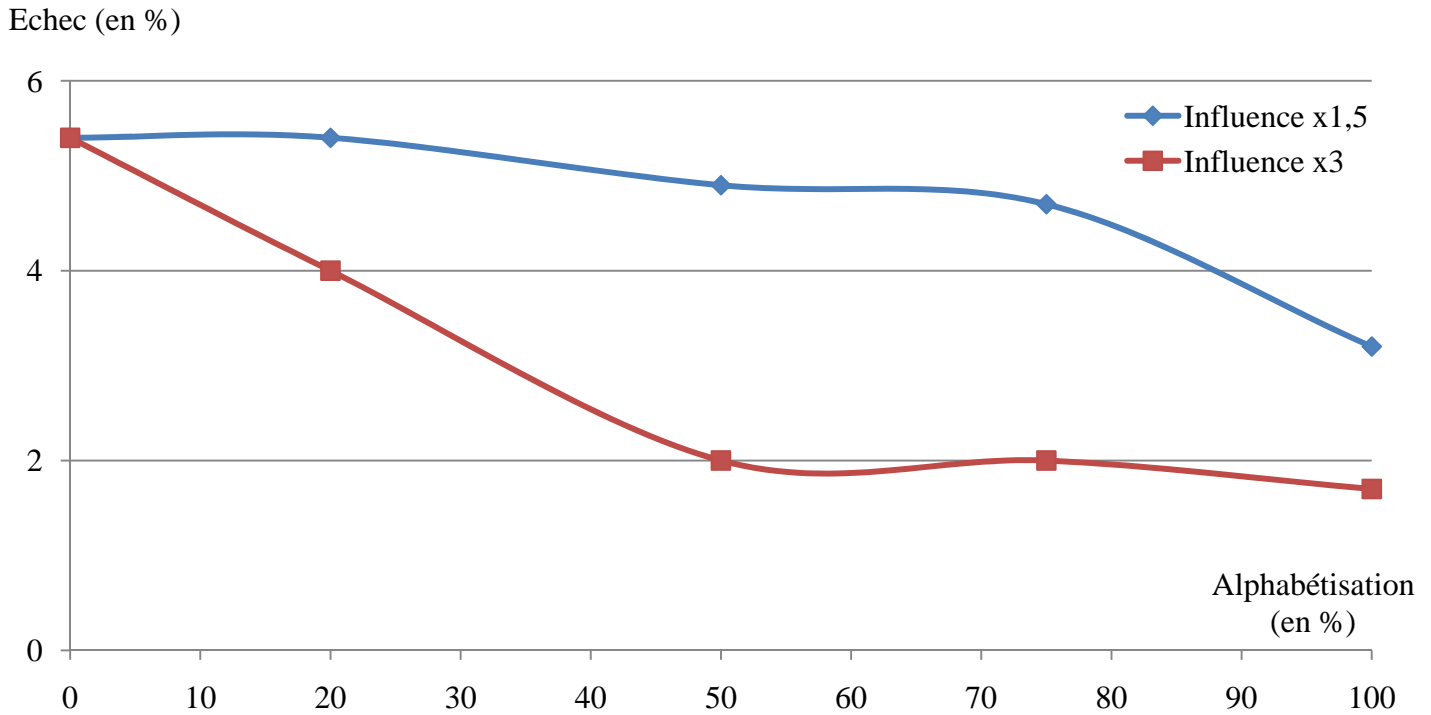
Echec (en %)



Annexe 21 : Influence de la variable « pourcentage des contacts intracommunautaires » sur l'échec de diffusion du modèle 1

Auteur : Yoann Doignon, 2010

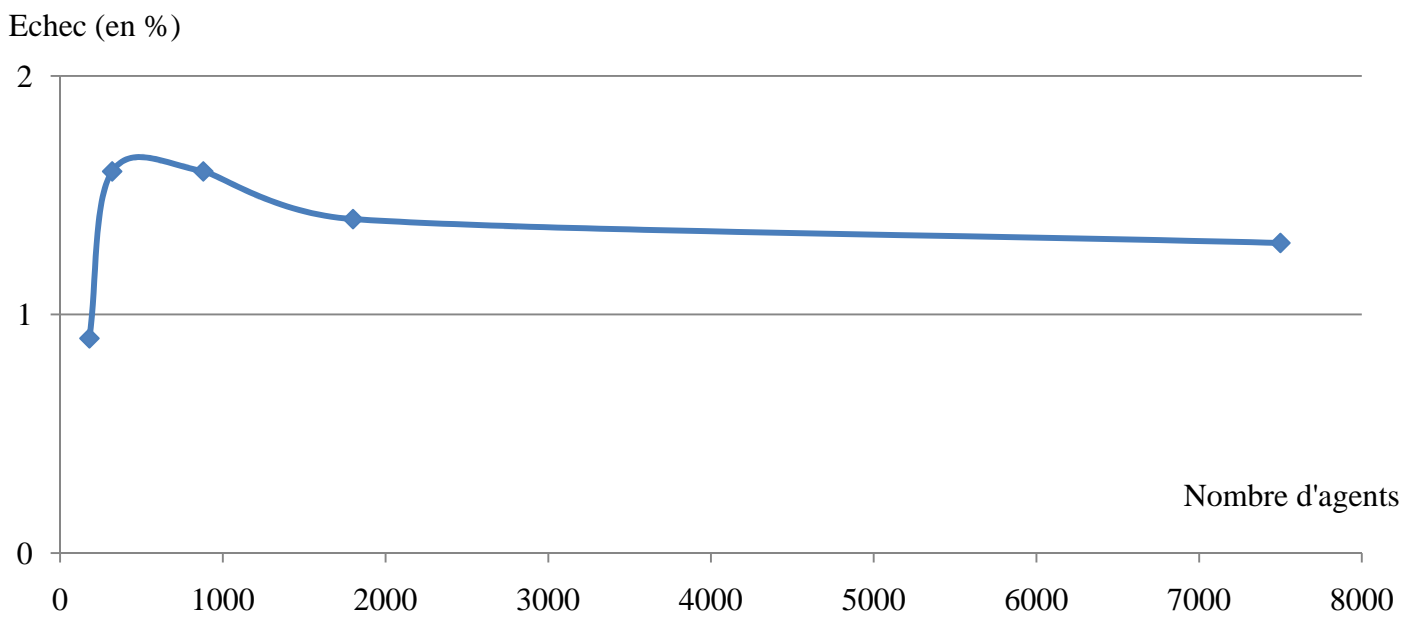
### Influence de l'alphabétisation



Annexe 22 : Influence de la variable « alphabétisation » sur l'échec de diffusion du modèle 1

Auteur : Yoann Doignon, 2010

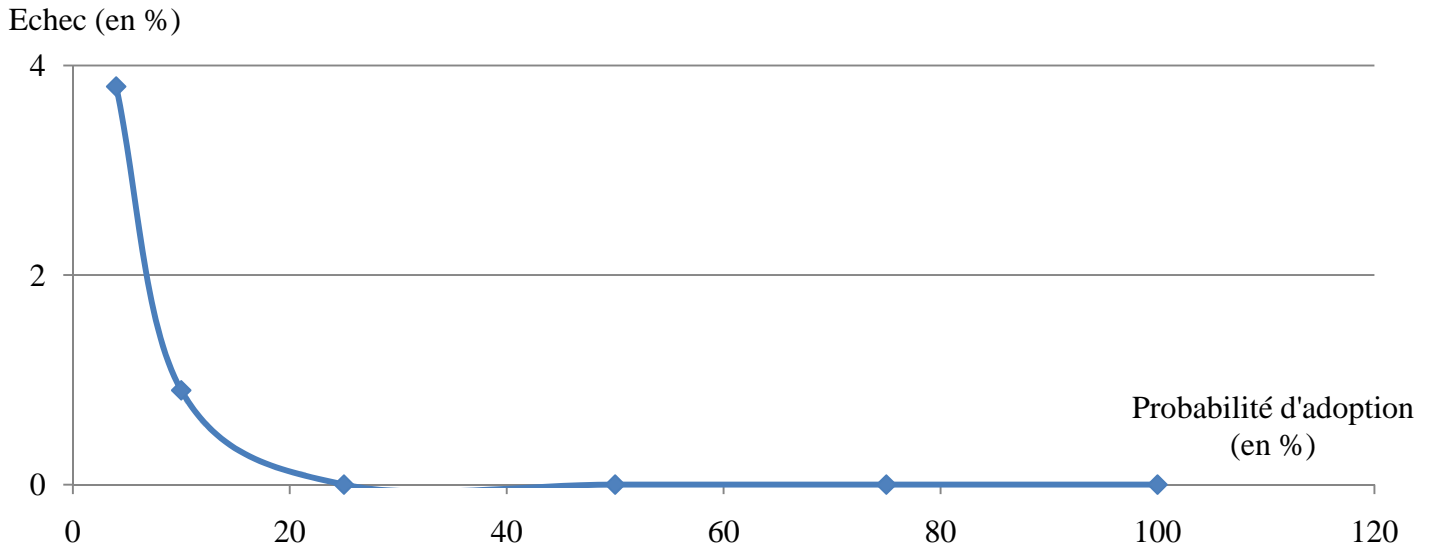
### Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion



Annexe 23 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 1

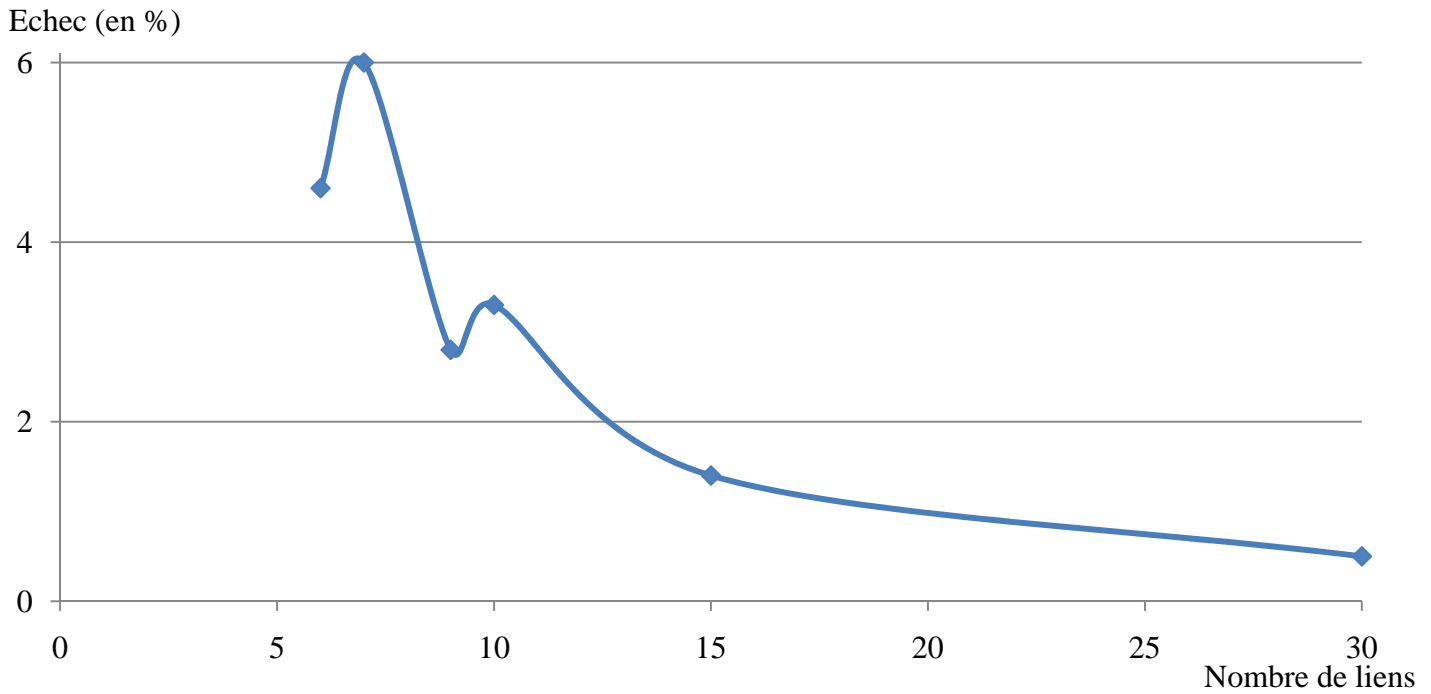
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la probabilité d'adoption



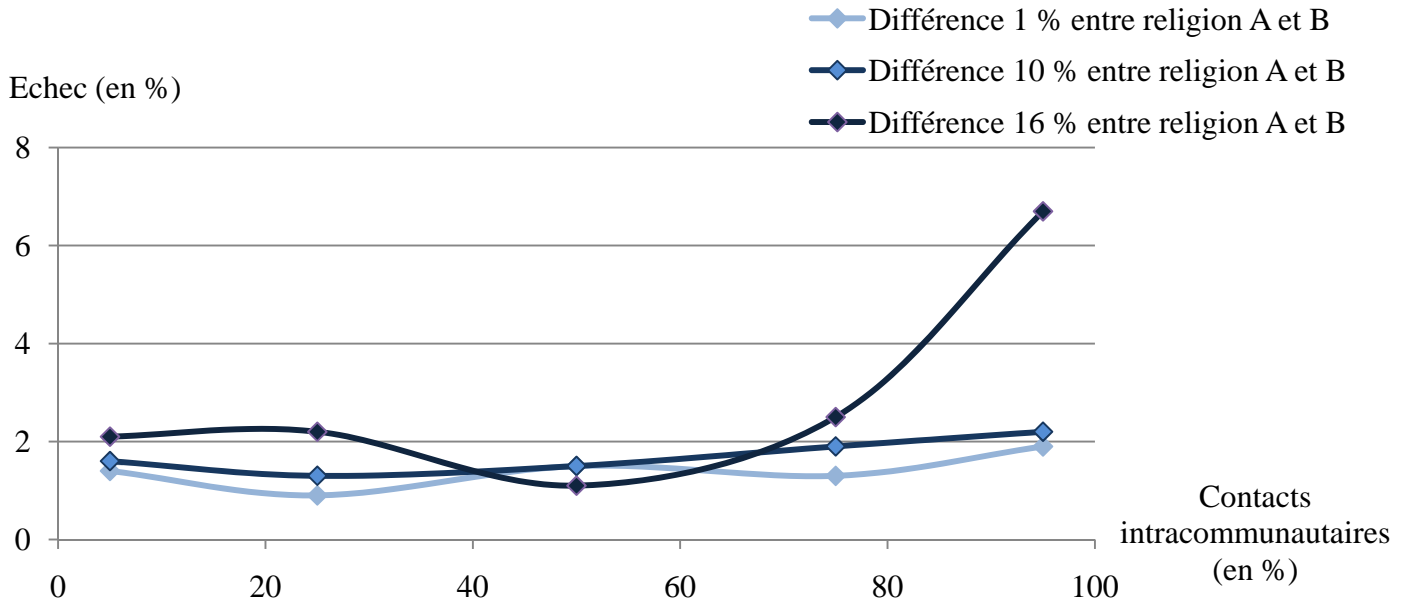
Annexe 24 : Influence de la variable « probabilité d'adoption » sur l'échec de diffusion du modèle 1  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre de liens



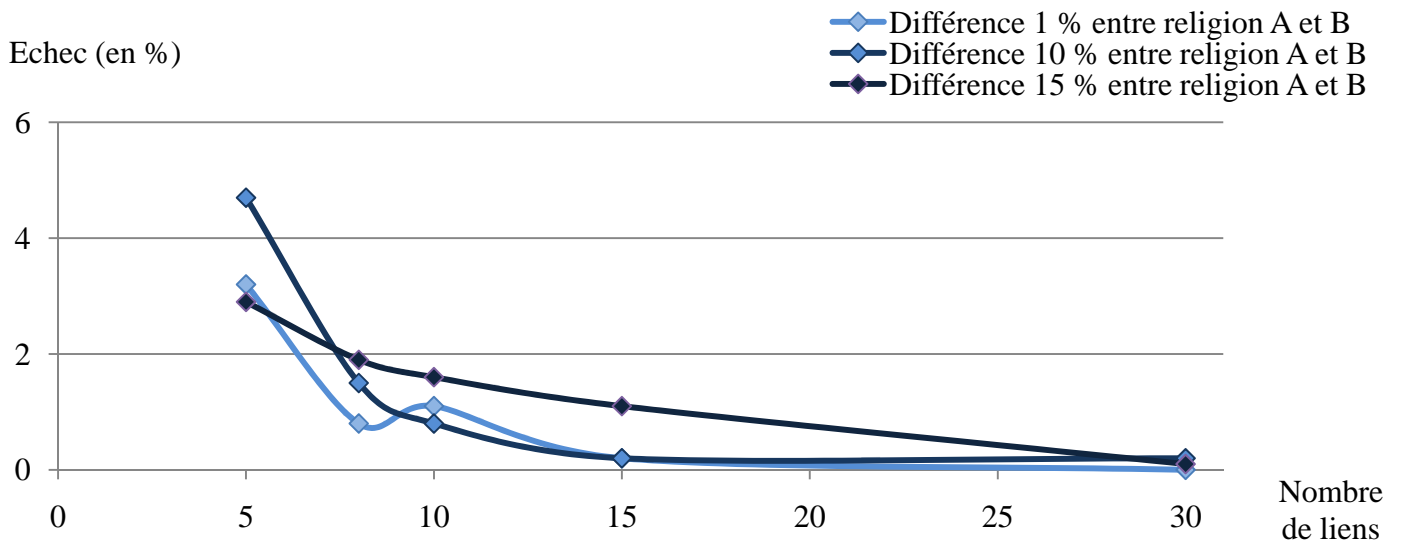
Annexe 25 : Influence de la variable « nombre de liens » sur l'échec de diffusion du modèle 1  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du pourcentage de contacts intracommunautaires



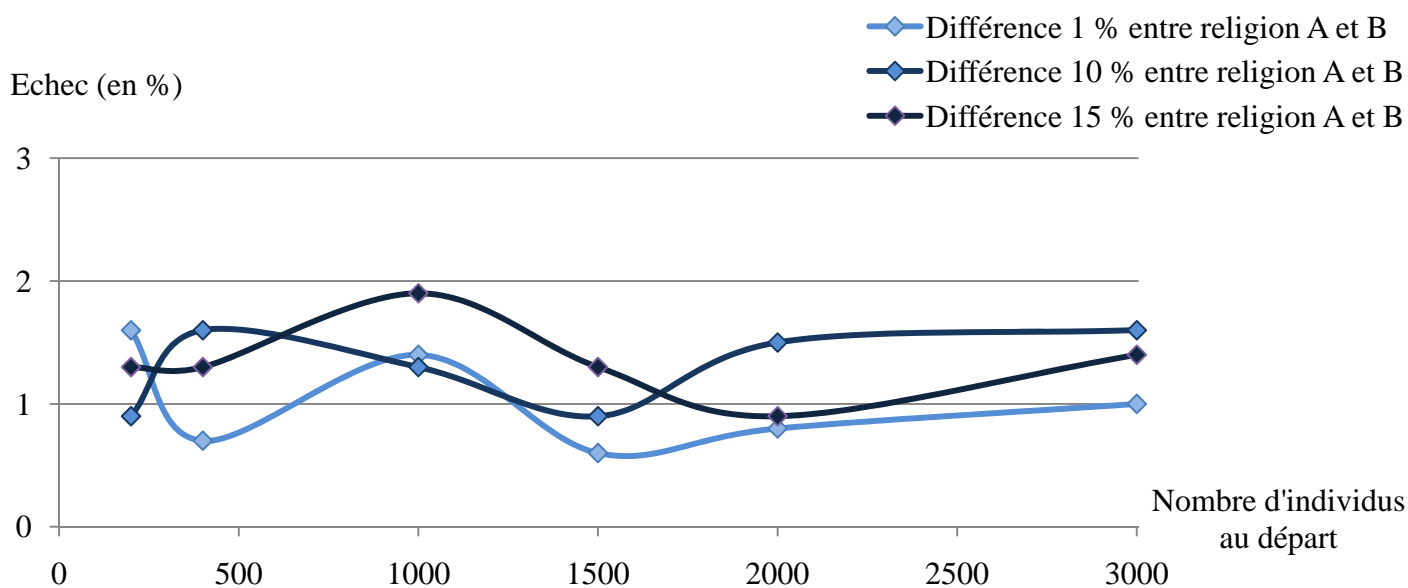
Annexe 26 : Influence de la variable « Pourcentage des contacts intracommunautaires » sur l'échec de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre de liens



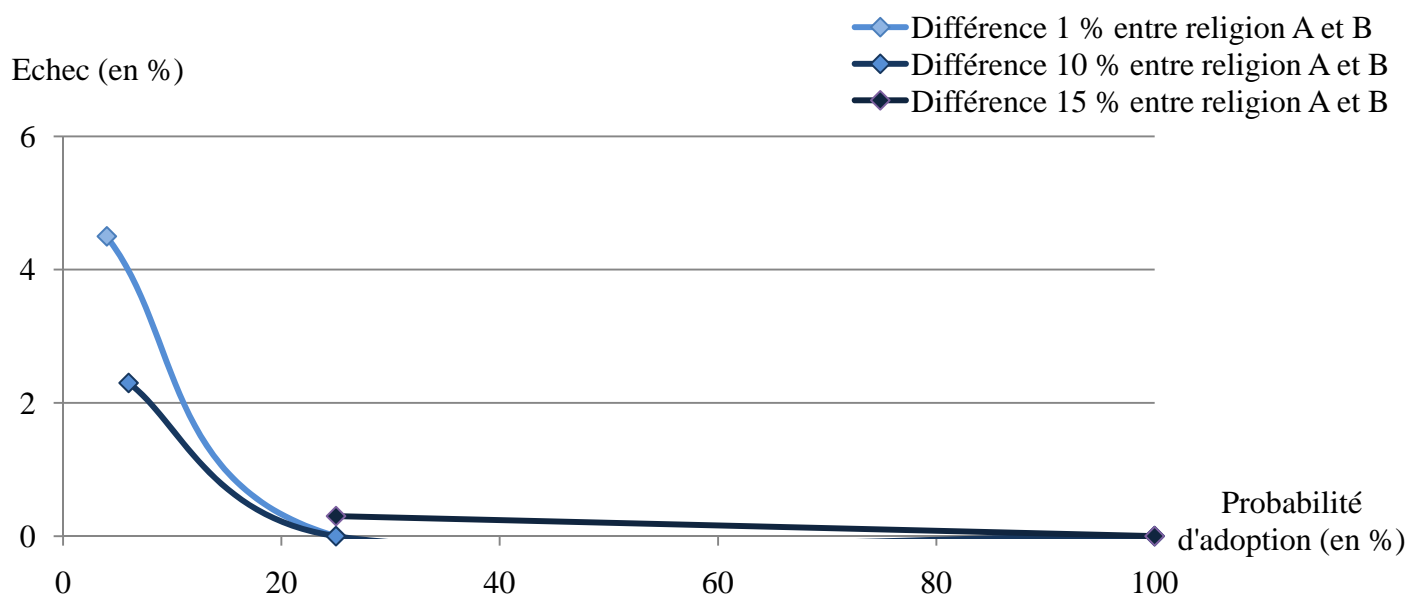
Annexe 27 : Influence de la variable « nombre de liens » sur l'échec de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre d'individus de départ



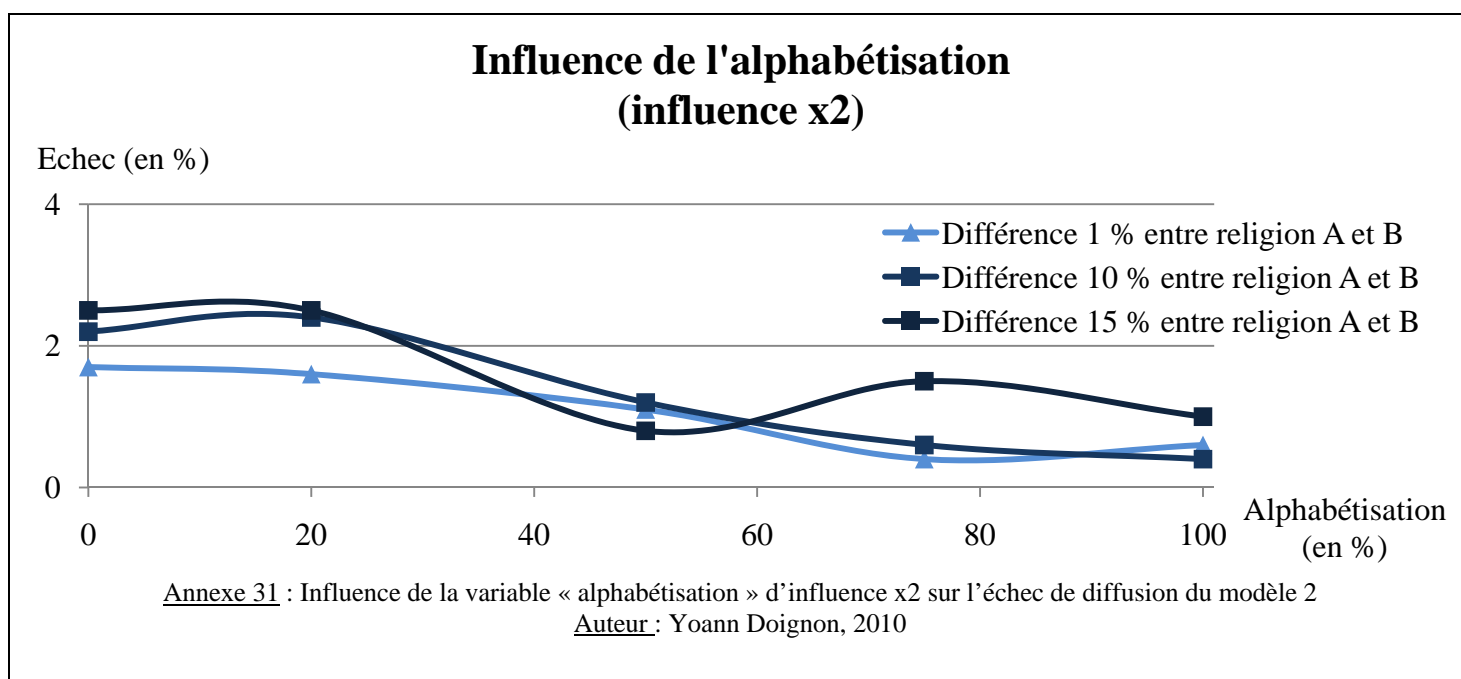
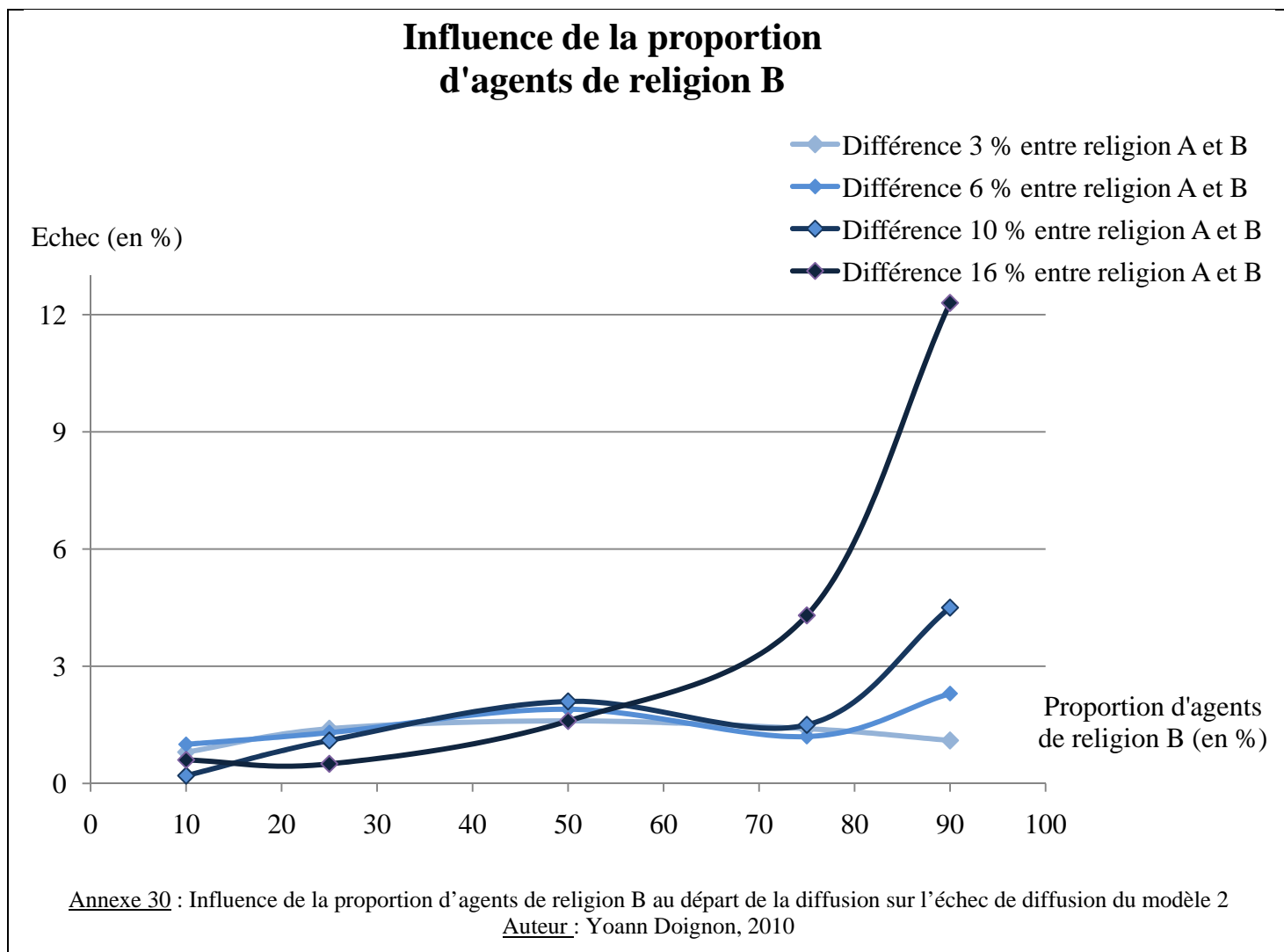
Annexe 28 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la probabilité d'adoption

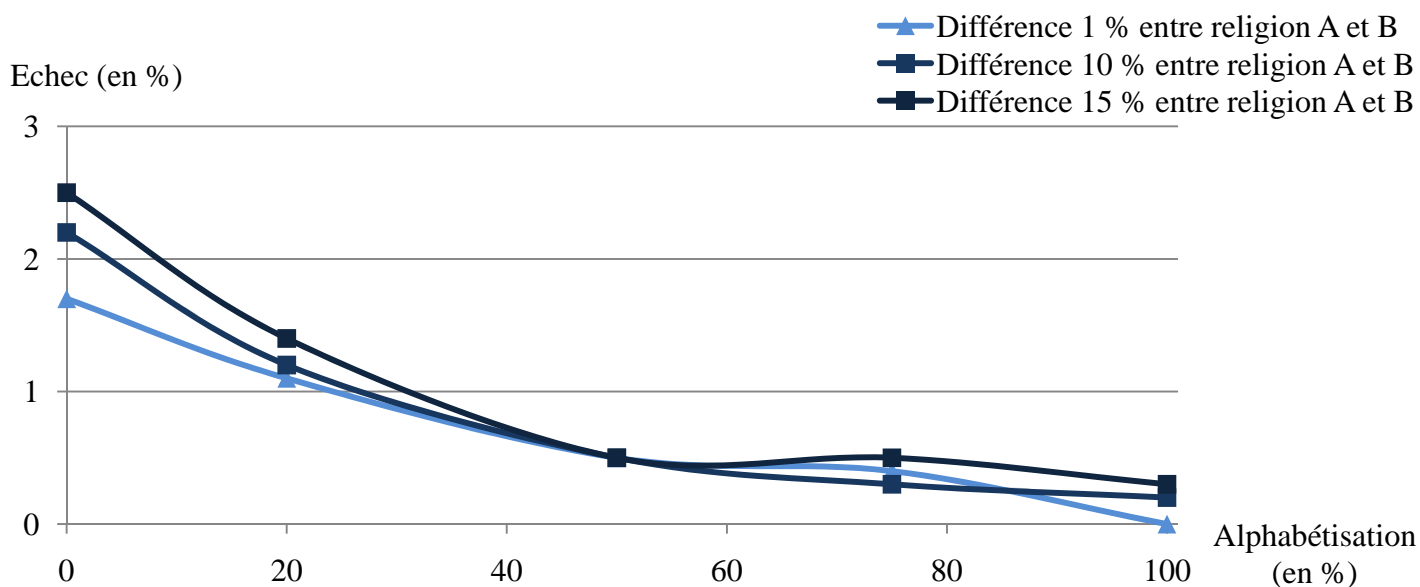


Annexe 29 : Influence de la variable « probabilité d'adoption » sur l'échec de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010



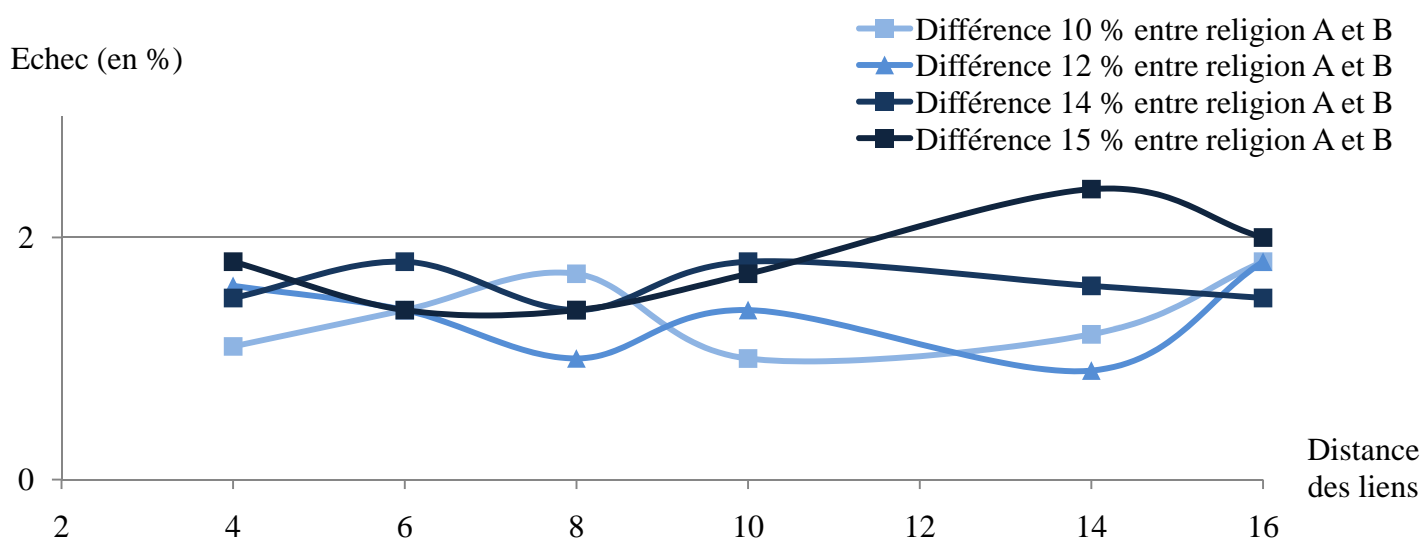


### Influence de l'alphabétisation (influence x3)



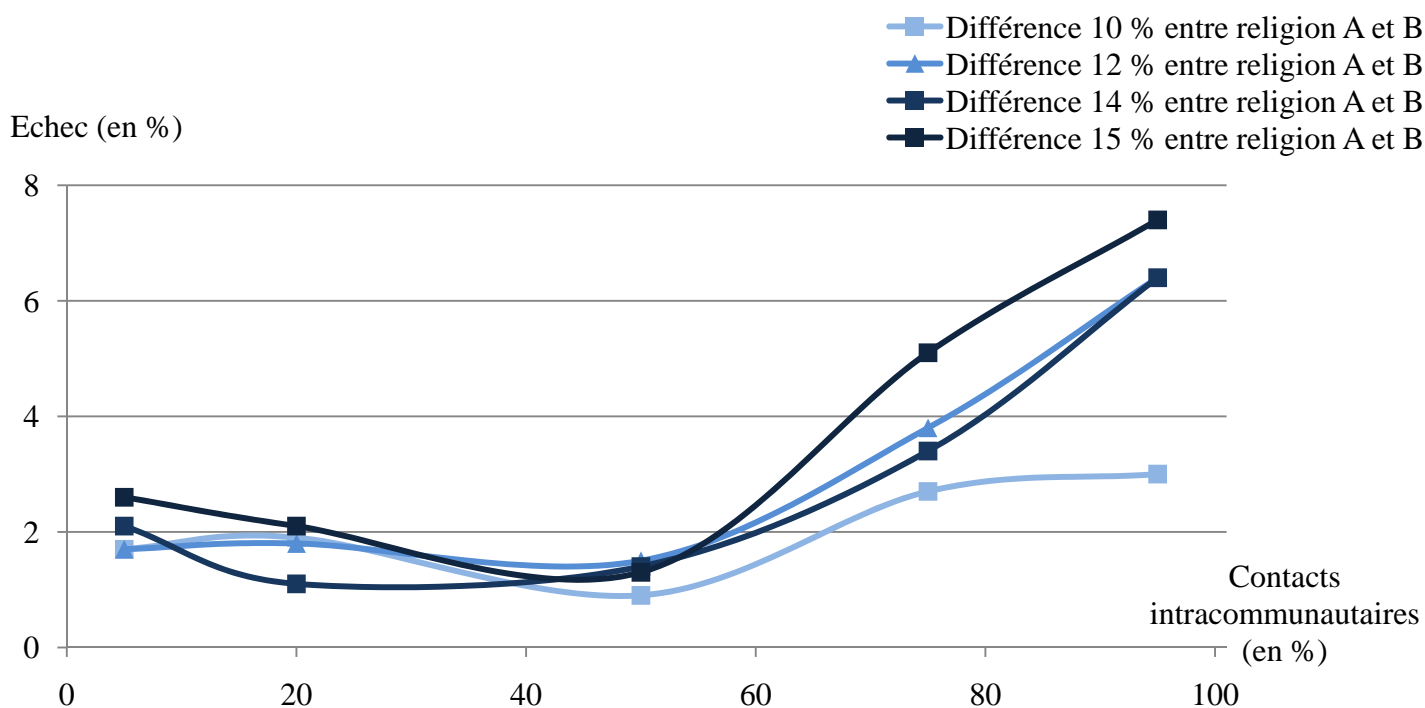
Annexe 32 : Influence de la variable « alphabétisation » d'influence x3 sur l'échec de diffusion du modèle 2  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la distance des liens



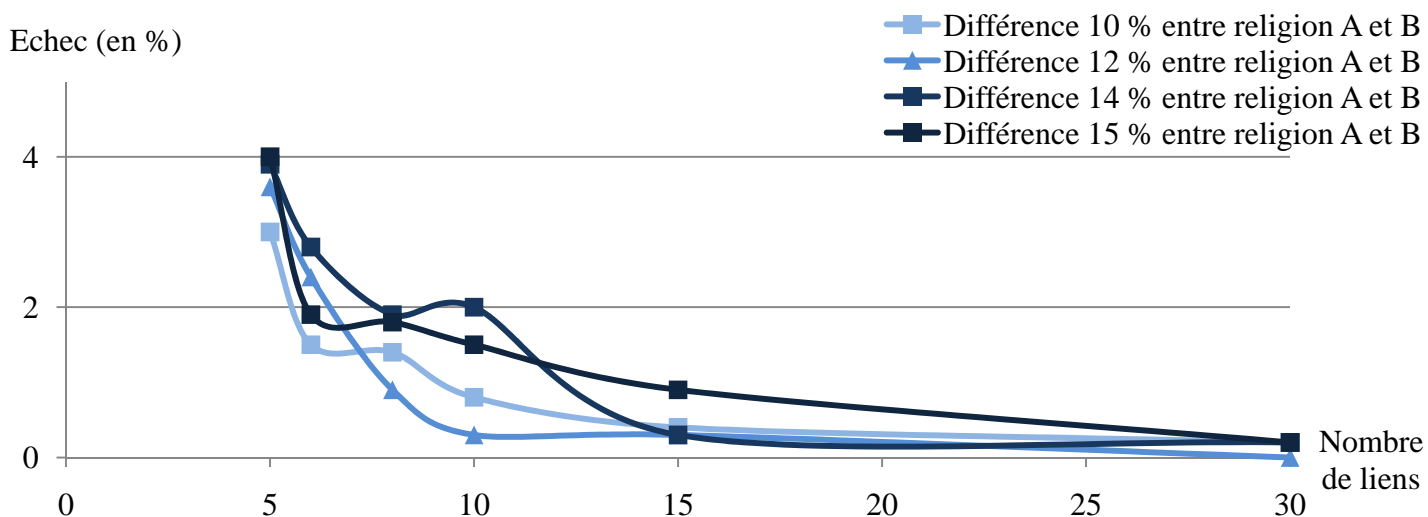
Annexe 33 : Influence de la variable « Distance des liens » sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du pourcentage de contacts intracommunautaires



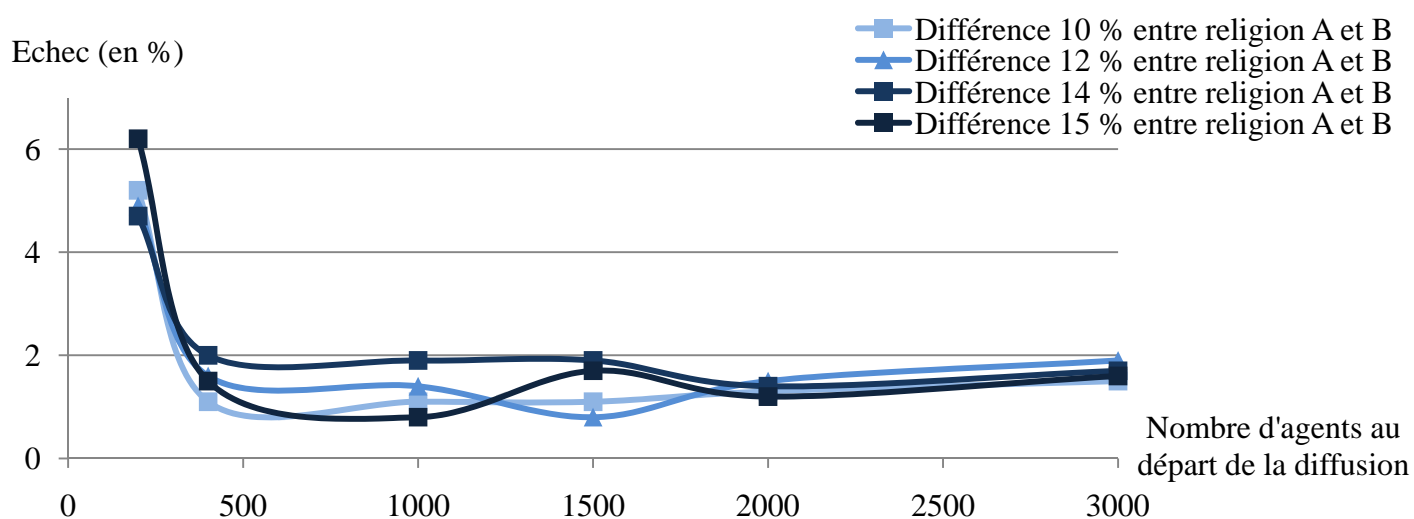
Annexe 34 : Influence de la variable « Pourcentage des contacts intracommunautaires » sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre de liens



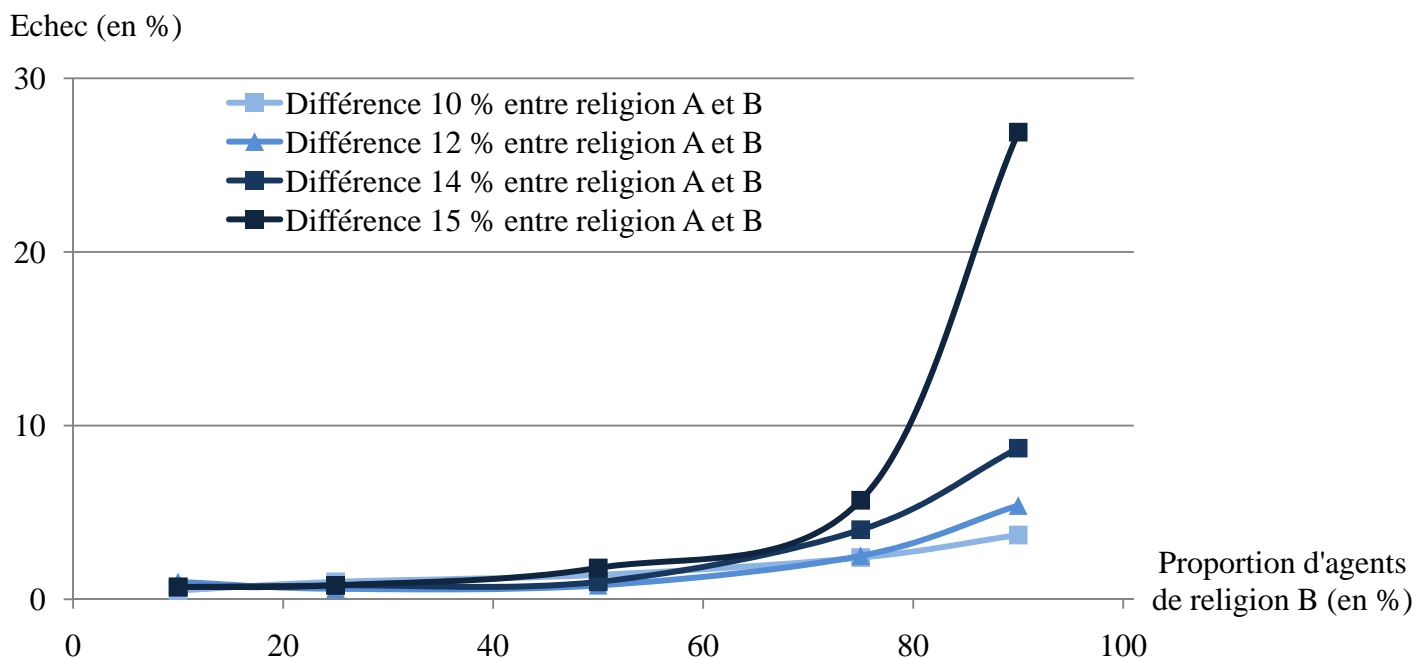
Annexe 35 : Influence de la variable « Nombre de liens » sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence du nombre d'agents au départ



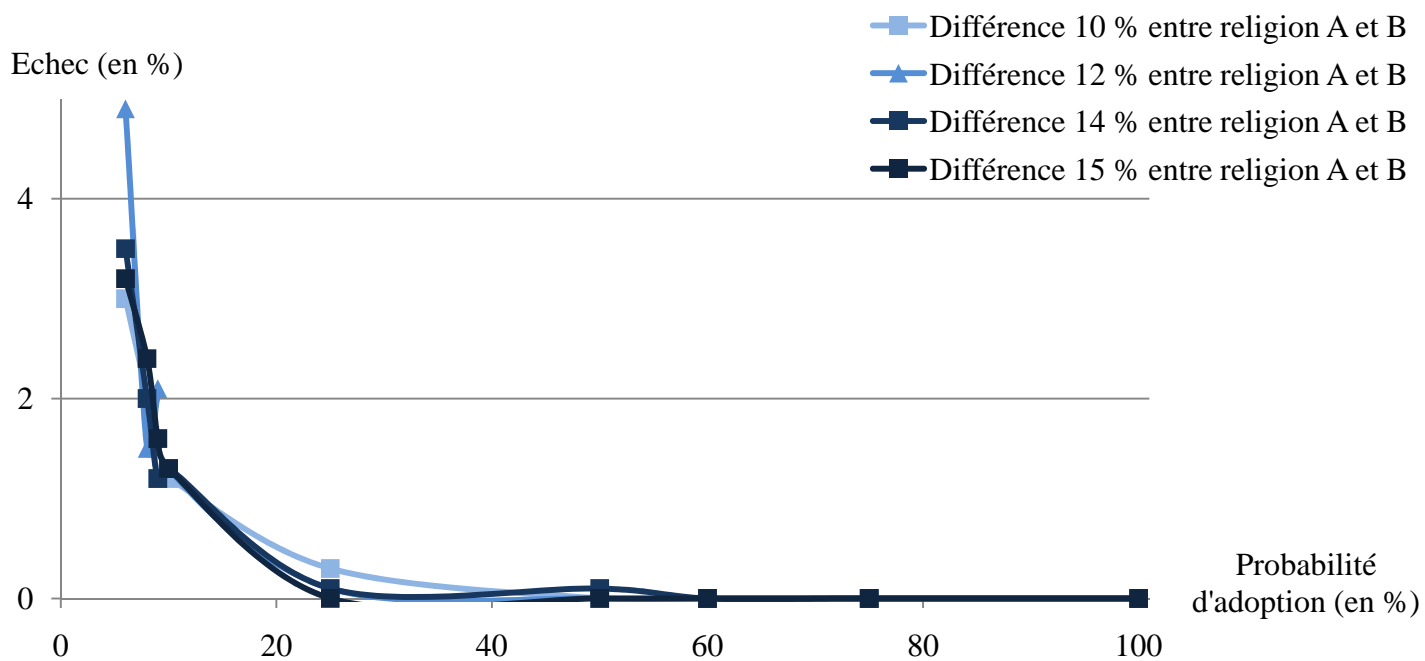
Annexe 36 : Influence du nombre d'agents au départ sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la proportion d'agents de religion B au départ de la diffusion



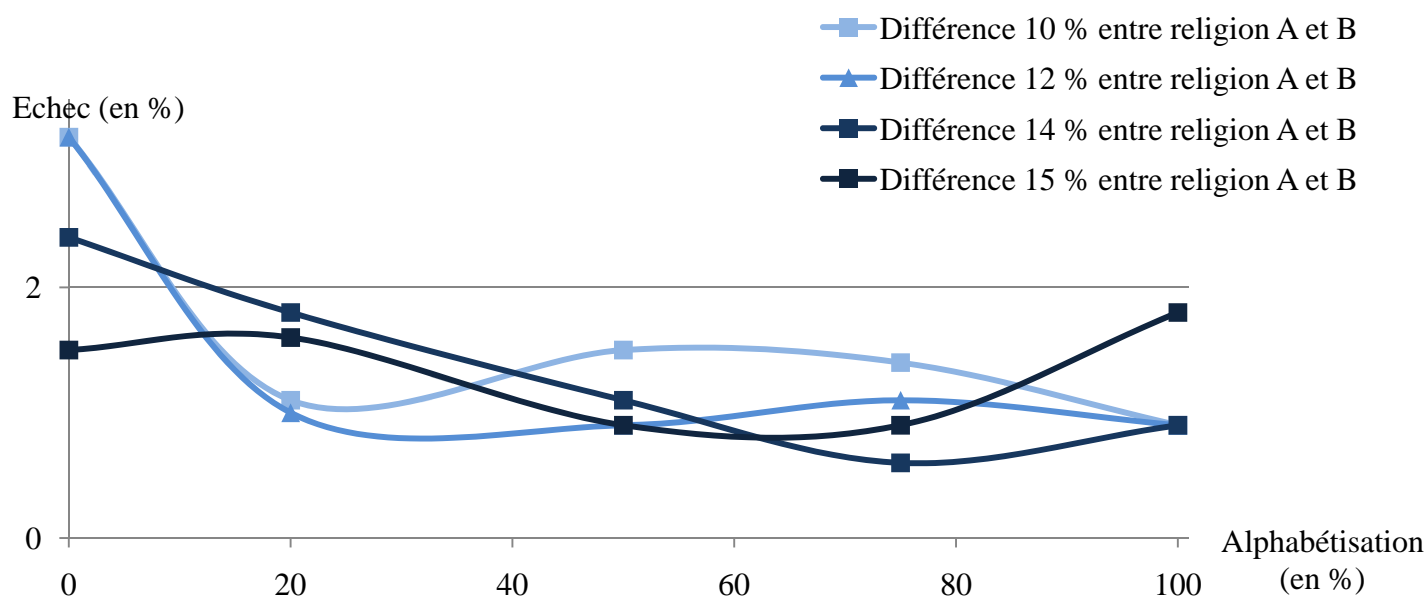
Annexe 37 : Influence de la proportion d'agents de religion B sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de la probabilité d'adoption



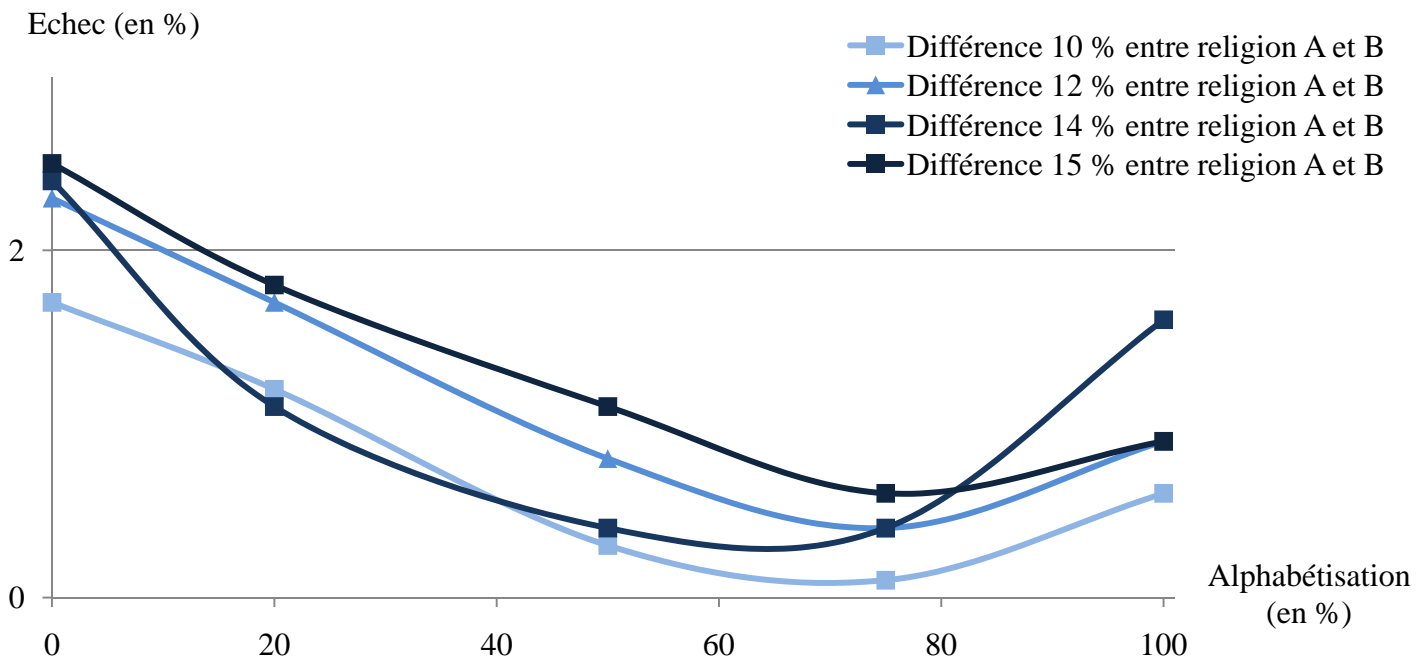
Annexe 38 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de l'alphabétisation (influence x2)



Annexe 39 : Influence de la variable « Alphabétisation » d'influence x2 sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010

### Influence de l'alphabétisation (influence x3)



Annexe 40 : Influence de la variable « Alphabétisation » d'influence x3 sur l'échec de diffusion du modèle 3  
Auteur : Yoann Doignon, 2010



## **Table des annexes**

Annexe 1 : Influence de la variable « pourcentage de contacts intracommunautaires » sur la vitesse de diffusion du modèle 1 .....	129
Annexe 2 : Influence de la variable « nombre de liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 1 .....	130
Annexe 3 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur la vitesse de diffusion du modèle 1 .....	130
Annexe 4 : Influence de la variable « Alphabétisation » sur la vitesse de diffusion du modèle 1 .....	131
Annexe 5 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur la vitesse de diffusion du modèle 1 .....	131
Annexe 6 : Influence de la variable « Pourcentage des contacts intracommunautaires » sur la vitesse de diffusion du modèle 2 .....	132
Annexe 7 : Influence de la variable « alphabétisation » influence x2 sur la vitesse de diffusion du modèle 2.....	132
Annexe 8 : Influence de la variable « Alphabétisation » influence x3 sur la vitesse de diffusion du modèle 2.....	133
Annexe 9 : Influence de la variable « Nombre de liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 2 .....	133
Annexe 10 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur la vitesse de diffusion du modèle 2 .....	134
Annexe 11 : Influence du nombre d'agents au départ sur la vitesse de diffusion du modèle 2.....	134
Annexe 12 : Influence de la proportion d'agents de religion type B au départ de la simulation sur la vitesse de diffusion du modèle 2.....	135
Annexe 13 : Influence de la variable « Pourcentage de contacts intracommunautaires » sur la vitesse de diffusion du modèle 3 .....	135
Annexe 14 : Influence de variable « alphabétisation » influence x2 sur la vitesse de diffusion du modèle 3 .....	136
Annexe 15 : Influence de variable « alphabétisation » influence x3 sur la vitesse de diffusion du modèle 3 .....	136
Annexe 16 : Influence de la variable « Nombre de liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 3 .....	137
Annexe 17 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur la vitesse de diffusion du modèle 3.....	137
Annexe 18 : Influence du nombre d'agent au départ sur la vitesse de diffusion du modèle 3.....	138
Annexe 19 : Influence de la proportion d'agents de religion B au départ de la diffusion sur la vitesse de diffusion du modèle 3.....	138



Annexe 20 : Influence de la variable « distance des liens » sur la vitesse de diffusion du modèle 3 .....	139
Annexe 21 : Influence de la variable « pourcentage des contacts intracommunautaires » sur l'échec de diffusion du modèle 1 .....	139
Annexe 22 : Influence de variable « alphabétisation » sur l'échec de diffusion du modèle 1 .....	140
Annexe 23 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 1 .....	140
Annexe 24 : Influence de la variable « probabilité d'adoption » sur l'échec de diffusion du modèle 1 .....	141
Annexe 25 : Influence de la variable « nombre de liens » sur l'échec de diffusion du modèle 1 .....	141
Annexe 26 : Influence de la variable « Pourcentage des contacts intracommunautaires » sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	142
Annexe 27 : Influence de la variable « nombre de liens » sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	142
Annexe 28 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	143
Annexe 29 : Influence de la variable « probabilité d'adoption » sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	143
Annexe 30 : Influence de la proportion d'agents de religion B au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	144
Annexe 31 : Influence de la variable « alphabétisation » influence x2 sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	144
Annexe 32 : Influence de la variable « alphabétisation » influence x3 sur l'échec de diffusion du modèle 2 .....	145
Annexe 33 : Influence de la variable « Distance des liens » sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	145
Annexe 34 : Influence de la variable « Pourcentage des contacts intracommunautaires » sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	146
Annexe 35 : Influence de la variable « Nombre de liens » sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	146
Annexe 36 : Influence du nombre d'agents au départ sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	147
Annexe 37 : Influence de la proportion d'agents de religion B sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	147
Annexe 38 : Influence de la variable « Probabilité d'adoption » sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	148
Annexe 39 : Influence de la variable « Alphabétisation » influence x2 sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	148
Annexe 40 : Influence de la variable « Alphabétisation » influence x3 sur l'échec de diffusion du modèle 3 .....	149

## Table des figures et des tableaux

Figure 1 : Le déroulement de la transition démographique .....	15
Figure 2 : La transition démographique indienne .....	20
Figure 3 : Evolution du taux d'adoption en fonction de la distance .....	25
Figure 4 : Courbe logistique.....	26
Figure 5 : Part des différentes catégories d'adoptants selon le moment où ils adoptent dans la diffusion.....	32
Figure 6 : Les différentes étapes d'une diffusion de l'innovation.....	33
Figure 7 : Evolution de la fécondité en Inde de 1951 à 1991.....	42
Figure 9 : Les différents types d'interactions entre agents.....	53
Figure 10 : Les différentes influences lors de la diffusion.....	59
Figure 11 : La communication entre agents .....	69
Figure 12 : Structure du modèle et initialisation .....	71
Figure 13 : Déroulement d'un tour de simulation.....	72
Figure 15 : Influence de la variable "Probabilité d'adoption" sur la vitesse de diffusion du modèle 3 .....	82
Figure 16 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur la vitesse de diffusion du modèle 1 .....	83
Figure 17 : Influence du nombre d'agents au départ de la diffusion sur l'échec de diffusion du modèle 1 .....	83
Figure 18 : Première série de simulations du nombre d'individus au départ sur le pourcentage d'échecs du modèle 2.....	84
Figure 20 : Taux de variation des variables sur la vitesse de diffusion du modèle 1.....	88
Figure 21 : Taux de variations des variables sur la vitesse de diffusion du modèle 2.....	89
Figure 22 : Taux de variations des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 3.....	90
Figure 23 : Taux de variation des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 1.....	92
Figure 24 : Taux de variation des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 2.....	93
Figure 25 : Taux de variations des variables sur l'échec d'une diffusion du modèle 3.....	94
Figure 27 : Taux de variations des variables, excepté les variables extrêmes, sur l'échec d'une diffusion du modèle 3.....	96
Figure 28: Diffusion par liens aléatoires .....	101
Figure 29 : Diffusion avec liens contraints par la distance .....	106
Figure 30 : Diffusion par contrainte spatiale mettant en évidence le dépeuplement progressif.....	111
Figure 31 : Le "repeuplement" après la diffusion .....	117

Tableau 1 : Valeurs moyennes choisies pour les variables non testées .....	78
Tableau 2 : Résultats des simulations pour le test de la fécondité .....	79
Tableau 3 : Résultats des simulations pour le test du système de génération .....	79

## Simuler la baisse de fécondité en Inde

## Table des matières

Remerciements .....	6
Sommaire .....	8
Introduction .....	10
Chapitre 1 - Phase heuristique : étude des théories et concepts du sujet .....	14
I) La transition démographique .....	14
A) La transition démographique, une théorie admise .....	14
B) La baisse de fécondité à l'échelle mondiale .....	15
1) Le point de vue sociologique de la théorie .....	15
2) L'évolution de la baisse de fécondité dans le monde .....	16
3) Les conséquences de la transition démographique .....	17
C) La transition démographique en Inde .....	19
1) L'évolution de la fécondité .....	19
2) Les conséquences de la « révolution démographique » en Inde .....	22
II) Le concept de diffusion spatiale de l'innovation .....	23
A) Un concept ancien et émergent progressivement en géographie .....	23
B) Les conceptualisations abouties .....	26
1) Les composantes de la diffusion spatiale .....	27
2) Les différentes étapes de la diffusion spatiale .....	30
III) La baisse de fécondité en Inde : une thématique étudiée depuis plus de 25 ans .....	35
A) Les débuts de C.Z. Guilmoto : 1986 .....	35
B) L'étude de la baisse de fécondité à l'échelle du district : 1997 .....	36
C) Une explication plus technique pour les études sur la baisse de fécondité : 2002 .....	37
D) Une synthèse finale des travaux : <i>Fertility Transition in South India</i> (2005) .....	39
Chapitre 2 : La création d'un modèle Multi-Agents .....	46
I) Les Systèmes multi-agents (SMA) .....	46
A) Historique : de l'intelligence artificielle à la vie artificielle .....	46
1) Les automates cellulaires : les prémices de l'intelligence artificielle .....	46
2) L'intelligence artificielle (IA) .....	47
3) L'intelligence artificielle distribuée (IAD) .....	48
4) La vie artificielle (VA) .....	48

B)	Définitions et composants des Systèmes Multi-Agents.....	50
1)	Définition d'un Système Multi-Agents .....	50
2)	Définition d'un agent.....	51
3)	L'environnement .....	52
4)	Les agents interagissent entre eux .....	53
5)	Les champs d'utilisation des Systèmes Multi-Agents.....	54
C)	La pénétration des Systèmes Multi-Agents dans les sciences géographiques.....	55
D)	Des phénomènes de diffusion sont traités par les SMA .....	57
1)	Travail sur la baisse de fécondité en France.....	57
2)	Travaux sur les processus de « diffusion d'opinion » .....	58
II)	Construction et justification d'un modèle individu-centré .....	62
A)	Hypothèses, choix et objectifs .....	62
B)	La structure du modèle de base .....	64
1)	Les variables.....	64
2)	Les caractéristiques des agents.....	66
3)	La phase d'initialisation .....	67
4)	Le déroulement d'un tour de simulation .....	68
III)	Les déclinaisons du modèle de base .....	73
A)	Diffusion avec liens aléatoires parmi des agents homogènes.....	73
B)	Diffusion avec liens aléatoires parmi des agents hétérogènes.....	73
C)	Diffusion prenant en compte la contrainte spatiale parmi des agents hétérogènes .....	73
Chapitre 3 : Résultats et interprétations .....		75
I)	Quelles simulations effectuer ? Que mesurer ? .....	75
A)	Méthodologie de simulation .....	75
1)	Comment apprécier une diffusion ? .....	75
2)	La phase de simulation .....	76
B)	Calibrage et vérification du modèle.....	78
1)	Test de la fécondité.....	78
2)	Test du système de génération.....	79
3)	Test de la diffusion par l'aspect du taux d'adoption en fonction du temps.....	79
II)	Etudes quantitatives des résultats .....	80
A)	Les effets de seuil sur les variables.....	81

B) L'effet de masse.....	82
C) La force de l'hétérogénéité .....	85
D) Les variables les plus influentes ... ..	86
1) ... sur la vitesse de diffusion .....	87
2) ... et sur le pourcentage d'échecs d'une diffusion .....	91
III) Les formes spatiales observées .....	97
A) La nécessaire contrainte spatiale pour observer une diffusion spatiale.....	97
B) Le « dépeuplement » de l'espace virtuel .....	107
C) La recolonisation de l'espace.....	113
Conclusion.....	119
Bibliographie.....	123
Annexes.....	129
Table des annexes.....	151
Table des figures et des tableaux.....	153
Table des matières.....	156

## Simuler la baisse de fécondité en Inde







## Simuler la baisse de fécondité indienne

La transition démographique transforme les structures démographiques des pays qu'elle touche par une baisse de la mortalité, puis de la fécondité. Le monde entier est touché par ce phénomène. Cependant, un pays demeurant à long terme avec une fécondité inférieure au seuil de remplacement, verra sa population sensiblement diminuer. La situation démographique mondiale reste préoccupante de par la propagation à grande échelle de la baisse de fécondité. Etudier l'Inde se révèle intéressant du fait que la baisse de fécondité indienne est une thématique étudiée depuis plus de 25 ans par C.Z. Guilmoto, mais aussi de par son poids démographique. Sont alors identifiés des « déterminants de la fécondité », ainsi que l'association de la baisse de fécondité à une diffusion spatiale de l'innovation. Il apparaît évident que cette phase de la transition démographique relève des décisions de chaque individu, mais que jusqu'à présent, les études menées sur ce sujet restent à l'échelle agrégée. Ce mémoire se propose alors d'étudier la baisse de fécondité indienne d'un point de vue individu-centrée par l'utilisation des Systèmes Multi-Agents. De ce fait, après avoir plus approfondi la théorie de transition démographique et le concept de diffusion spatiale, deux axes principaux seront développés. Le premier détermine les variables les plus influentes sur la diffusion tandis que le deuxième expose les différentes formes spatiales obtenues.

**Mots-clefs :** baisse de fécondité, diffusion spatiale, Système Multi-Agents, Inde, simulation

## Simulate the fertility decline in India

A demographic transition has two stages: first, a mortality decline, after a fertility decline. In my work, I center on the second. In India, the fertility decline is compared to a spatial diffusion. My assumption is based on individual interactions between mixed persons are the main motive of this diffusion. I use the emergence concept. Therefore, hypothesis set for micro scale can structure the macro scale. In order to study the fertility decline, I use the individual scale with the multi-agents system. The first presents the theoretical and conceptual context. The second make explicit my model and all kind of diffusion. The last explain the results.

Researchers identified several variables which are influential on fertility. Among them, I select a set of variables and criterions. My aim is determinate the most influential variables or criterions on diffusion's velocity and failure. For this, I employ three kind of diffusion. The first concerns diffusion with homogenous persons. The second apply heterogeneous persons. These both not consider the distance. On the other hand, the last kind of diffusion use heterogeneous persons, but diffusion considers the distance. My work is split in three parts. The results reveal some influential criterions. I identify so several spatial forms. But the most interesting is that, without consideration of distance, there is not spatial diffusion.

**Keywords:** fertility decline, spatial diffusion, multi-agents system, India, simulation