



HAL
open science

“ A Monte Carlo approach to diffusion ” : une étude “ historique ” revisitée par la modélisation multi-agents

Eric Daudé

► To cite this version:

Eric Daudé. “ A Monte Carlo approach to diffusion ” : une étude “ historique ” revisitée par la modélisation multi-agents. Hermès. Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l’Homme et de la Société. Applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société, pp.385-409, 2006. <halshs-01082660>

HAL Id: halshs-01082660

<https://shs.hal.science/halshs-01082660v1>

Submitted on 17 Nov 2014

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.



HAL Authorization

Chapitre 16

« *A Monte Carlo approach to diffusion* » : une étude « historique » revisitée par la modélisation multi-agents.

16.1. Introduction

En 1995, le sociologue Everett Rogers présente un constat édifiant des recherches dans le domaine de la diffusion : celles-ci sont atrophiées, la plupart des méthodes sont bien rodées et les questions essentielles sont semble-t-il résolues. La plupart des études reposent ainsi sur l'utilisation « à la chaîne » de modèles, sans que de nouvelles questions émergent. A la même époque, le géographe Peter Gould [GOU 95] tire un constat convergent à celui d'E. Rogers et renforce ce point de vue : la relative stagnation des recherches est due à la méconnaissance des véritables processus à l'œuvre lors de la diffusion, celle-ci ayant entraîné le développement et le raffinement de modèles mathématiques n'ayant qu'une faible portée explicative et prédictive.

Si le constat d'inertie des recherches dans ce domaine est identique à la fin des années 1990, il est probable que ce sont à la fois les méthodes à la disposition du chercheur et la connaissance partielle des processus à l'origine des phénomènes de diffusion qui en sont à l'origine. Les méthodes employées ont tendance à circonscrire la curiosité du chercheur et à ne faire poser que les questions auxquelles elles peuvent apporter des réponses. C'est en cherchant les limites de ces méthodes qu'il est alors possible de dépasser les frontières artificielles que l'on s'est fixées,

Chapitre rédigé par Eric DAUDE.

Modélisation et simulation multi-agents pour Sciences de l'Homme et de la Société.

pour poser de nouvelles questions et inventer de nouveaux concepts et outils pour y répondre, lesquels constitueront sans aucun doute de nouvelles bornes qu'il faudra dépasser. Ainsi va la science.

Dans l'univers de la géographie, les méthodes traditionnellement employées pour modéliser les processus de diffusion sont essentiellement statistiques et mathématiques. Les modèles qui en découlent sont des modèles de type macro, le modèle gravitaire par exemple, qui obligent à poser des hypothèses opérationnelles au niveau où le phénomène est observé. La diffusion d'une innovation dans un système de villes est ainsi modélisée en posant des hypothèses au niveau de ce système : le déplacement de la nouveauté est fonction de la taille des entités élémentaires de ce système et de la distance qui les séparent [DAU 02a]. Or ces entités élémentaires, les villes, n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques ni le même « comportement » dans cet environnement. Mais ces modèles macro ont du mal à prendre en compte les conséquences de cette hétérogénéité.

Depuis le milieu des années 1990, de nouvelles approches permettent d'expliquer comment des dynamiques et des phénomènes complexes observables à un niveau global peuvent émerger des interactions qui se produisent à un niveau jusqu'ici mis de côté par les méthodes classiques de modélisation, le niveau local. Cette perspective est aujourd'hui partagée par nombre de chercheurs issus de champs disciplinaires aussi différents que la physique, la biologie, l'économie ou la sociologie. Il ne suffit plus d'observer de manière distincte l'univers collectif et l'univers individuel, il peut être pertinent d'étudier les relations entre les deux. Cet argument trouve son écho dans les théories de la complexité au rang desquelles on trouve les théories de la vie artificielle et de l'intelligence artificielle distribuée. Epstein et Axtell [EPS 96] posent ainsi le problème: « *How does the heterogeneous micro-world of individuals behaviors generate the global macroscopic regularities of the society ?* ».

Selon le point de vue de l'auto-organisation, la dynamique de fonctionnement global de la diffusion est une émergence, difficilement explicable et prédictible à partir de la seule observation et de l'analyse des entités élémentaires responsables de la diffusion. Si ce phénomène émergent peut être décrit par des lois ou des règles relativement simples, telle qu'une fonction logistique, sa compréhension ne peut être trouvée que dans l'étude des interactions entre les nombreux éléments différenciés qui composent le système considéré. Ainsi la seule observation des individus et de leurs caractéristiques ne permet pas de prédire le devenir d'une diffusion, seule la modélisation et la simulation des interactions entre ces entités ouvre la voie à une exploration des futurs possibles. On retrouve là le paradigme des sciences de la complexité, le tout est plus que la somme des parties. Des nombreux éléments différenciés interagissant émergent parfois à un niveau global des phénomènes qui ont alors des propriétés qui leurs sont propres. Ces propriétés peuvent alors en retour

modifier le comportement des entités élémentaires, on parle de phénomène d'*immersion*, d'*émergence de second ordre* [GIL 99] ou encore d'*émergence forte* [DES 05], [Chapitre 14]. Ceci se produit notamment lorsque les caractéristiques d'une innovation évoluent avec l'augmentation du nombre d'adoptants, modifiant ainsi les comportements individuels face à cette innovation. On retrouve là un second principe de la pensée complexe : le tout est moins que la somme des parties, car l'organisation de l'ensemble inhibe parfois les qualités individuelles [MOR 86].

Les théories de l'auto-organisation et les méthodes qui y sont associées constituent alors une approche prometteuse dans l'étude des phénomènes de diffusion [DAU 02b][DAU 03], car elles offrent la possibilité de dépasser les limites des méthodes classiques et font naître de nouvelles questions. Il s'agit alors de montrer que le comportement des individus face à l'adoption d'une innovation agit sur le devenir de sa diffusion et que celle-ci peut modifier en retour le comportement de ces individus. Les systèmes multi-agents offrent alors de nombreuses possibilités pour explorer de telles dynamiques.

16.2. Modèles multi-agents et modèles de diffusion

Les systèmes multi-agents sont particulièrement bien adaptés à la modélisation et la simulation de phénomènes dynamiques qui s'exercent dans l'espace géographique, principalement lorsque l'hétérogénéité des situations, les comportements locaux et les interactions, qu'elles soient spatiales ou sociales, sont déterminantes pour expliquer ces dynamiques [DAU 05]. C'est précisément le cas des phénomènes qui se propagent dans l'espace : « La diffusion suppose qu'existent ensemble *un émetteur, un potentiel de récepteurs* formé de personnes ou de lieux assez « proches », parfois plus par leur nature que par leur place dans l'espace, *une mise en contact* par quelque forme d'information que ce soit, *des vecteurs* qui la véhiculent, une certaine *durée* pour que se prennent et se confortent les décisions, ou que se fassent sentir les effets » [BRU 90].

Les systèmes multi-agents autorisent la prise en compte des divers éléments présents dans cette définition. Il est possible de construire un modèle de simulation où les comportements individuels, l'espace et le temps sont indissociables de la compréhension du phénomène. L'individu est souvent l'unité décisionnelle de base dont le pouvoir de décision face à l'adoption est susceptible d'influencer le devenir de la diffusion. L'hétérogénéité *des aptitudes innovantes* des individus peut être appréhendée selon la théorie d'Everett Rogers [ROG 62] qui distingue cinq catégories d'individus face à l'adoption d'une innovation (Figure 16.1) : les *innovants*, les *adoptants précoces*, la *majorité précoce*, la *majorité tardive* et les *retardataires*. Selon le profil de l'agent, la temporalité nécessaire pour se construire

une opinion sur l'innovation et confirmer un choix sera ainsi plus ou moins longue¹. Si cette prise en compte de l'hétérogénéité dans la composition des adoptants potentiels est fondamentale en sociologie ou en économie, elle l'est également en géographie car elle peut expliquer en partie la temporalité de la diffusion et les formes spatiales qu'elle prend.

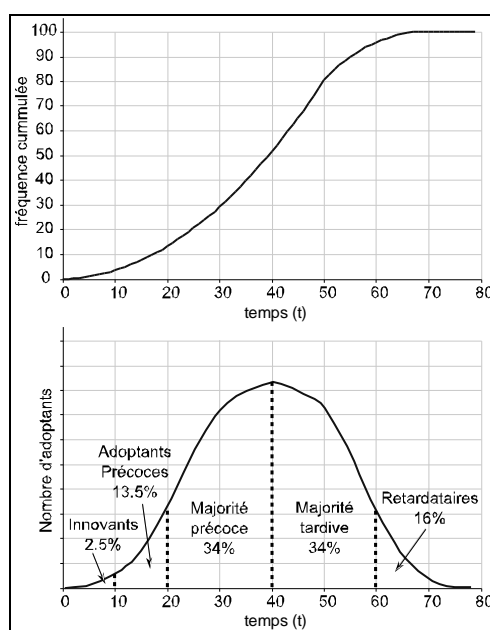


Figure 16.1 - Les aptitudes innovantes des individus et la temporalité de diffusion.

L'agent coexiste dans un environnement avec d'autres agents, avec lesquels il peut interagir. Ces interactions permettent la mise en contact entre émetteurs et récepteurs de l'innovation et sont donc des vecteurs privilégiés de diffusion. Dans la mesure où le déplacement d'une diffusion produit très rarement des formes qui relèvent du hasard, on pose comme hypothèse que les canaux de circulation de l'information permettent de repérer les chemins les plus probables de la diffusion. Les agents peuvent interagir avec d'autres agents spatialement proches. La capacité d'interaction locale s'exprime ainsi lorsque l'innovation se diffuse de proche en proche, parce que les agents peuvent observer les effets de l'innovation dans leur environnement social ou spatial. Mais les interactions peuvent dépasser une échelle de référence locale. C'est le cas lorsque les agents interagissent non plus sur la base

¹ Cette temporalité est associée à un processus d'apprentissage propre à l'agent et se caractérise par cinq étapes décisives selon E. Rogers [ROG 62] : *Knowledge - Persuasion - Decision - Implementation - Confirmation*.

de proximité spatiale mais sur la base d'une proximité économique ou sociale par exemple. La notion de réseaux, qu'ils soient familiaux, professionnels ou économiques, doit être sollicitée car elle permet d'intégrer des mécanismes qui ne sont pas explicitement spatiaux dans la diffusion.

Enfin les caractéristiques de l'innovation et leurs éventuelles évolutions doivent être évaluées pour comprendre les différentiels d'adoption entre les différents lieux et dans le temps. Cet aspect dynamique permet de multiplier les lieux possibles de diffusion et accroît le nombre d'adoptants potentiels. L'innovation peut ainsi évoluer dans ces caractéristiques techniques - amélioration du produit, variation du prix etc. - et dans la représentation que les individus s'en font, la mode constitue à ce titre un bon exemple. Cette évolution peut également marquer un déclin de la diffusion, lorsque les effets espérés de l'innovation ne sont pas à la hauteur des attentes.

Ces différents éléments relatifs à une thématique de diffusion conduisent à élaborer un modèle de simulation. Celui-ci constitue un exemple d'intégration, dans un seul modèle, de différents aspects présents dans la littérature aussi bien géographique, sociologique qu'économique. Pris séparément, ils offrent une part d'explication insuffisante pour rendre compte de la complexité des processus de diffusion.

16.3. Une étude historique : « *A Monte Carlo approach to diffusion* »

T. Hägerstrand est probablement l'un des premiers à avoir réalisé des simulations dans l'univers des sciences humaines, bien avant T. Schelling qui pourtant est le plus souvent mentionné² [chapitre 17]. Rappelons pour mémoire que les premiers travaux de simulation d'Hägerstrand sont publiés en 1953, et traduit en anglais près de quinze ans après [HAG 67]. Cette relative ignorance en dehors du domaine de la géographie tient probablement au fait que la composante spatiale des phénomènes sociaux a peu intéressé les disciplines académiques connexes à la géographie et que cette dernière n'a peut-être pas suffisamment communiqué en dehors de sa sphère disciplinaire. Cependant, même dans sa discipline (et en dehors des géographes dits de la *Time Geography* [CHA 01], ses travaux ont mis du temps avant d'être reconnus. Ses efforts ont en effet été contraints par les limites informatiques de l'époque, et l'impact de ses recherches a été relativement faible, ce qui s'explique par le contexte scientifique des années 1960-80 où les modèles mathématiques et statistiques, qui privilégient une approche agrégée et corrélative des phénomènes, sont introduits en géographie. On retiendra cependant trois grands principes de la méthode employée par T. Hägerstrand :

² Ceci avant même son prix Nobel d'économie pour ses travaux en théorie des jeux.

Modélisation et simulation multi-agents pour Sciences de l'Homme et de la Société.

- les individus représentent l'unité de base de toute diffusion : l'explication nécessite alors une modélisation réaliste mais simplifiée des comportements individuels ;
- la simulation permet de tester la validité de nos représentations du réel par l'observation du comportement des modèles dans un espace et un temps artificiel ;
- la mise en évidence des formes générales de diffusion qui émergent des comportements individuels et des processus en interaction doit être privilégiée par rapport à la nécessité de retrouver des localisations précises.

La méthode développée par Hägerstrand pour simuler un processus de diffusion est proche des méthodes employées actuellement en intelligence artificielle. Regardons à ce propos ce qu'il note dans son ouvrage fondateur : « *Diffusion of an innovation within a population is simulated here with the aid of the Monte Carlo technique. In this connection, the Monte Carlo approach may be said to imply that a society of « robots » is created in which « life » goes on according to certain probability rules. The technique can best be described as a game of dice in which the gaming table represents a part of the earth's surface, the pieces represent individuals living in the area, and the rules of the game constitute the particular factors which we want to study in operation. The dice produce, step by step, new situations within the range of variation which is implicit in the rules. The dice are the motive power of life in the model. A random element is a very characteristic feature even of real life, and it has to be included in a model which pretends to imitate life.* » T. Hägerstrand [HAG 65a]. Afin de tester la validité de sa méthode, l'auteur propose d'étudier un cas réel, la diffusion des subventions au pâturage dans une région suédoise dans les années 1930.

En 1928, le gouvernement de Suède décide d'allouer une prime à l'herbage aux fermiers. Cette mesure visait à modifier le comportement des fermiers à l'égard du pâturage libre, qui s'effectuait la plupart du temps en forêt, et à accroître le rendement de l'élevage du bétail, principalement pour se prémunir des situations critiques telles que celles qui s'étaient manifestées à la fin de la première guerre mondiale. A cette fin, une association – *The Rural Economy Association* – est créée et doit informer les autorités mais également les fermiers sur les risques liés à leurs pratiques³ et les avantages d'une nouvelle conception du pâturage. Entre autres rôles, le travail de cette association a été de former des individus dont les activités professionnelles les amenaient à avoir des contacts réguliers avec les fermiers dans toutes les parties du pays. L'association a également organisé une quinzaine de conférences publiques sur les aspects techniques et économiques de la subvention entre 1925 et 1933. Parallèlement aux actions de l'association, l'information a également circulé au travers des journaux, des livres et de la radio. Ces informations

³ Le pâturage en forêt entraînait des dommages considérables sur les jeunes pousses d'arbres.

concernent principalement les modalités d'éligibilité aux subventions. Elles peuvent être perçues par tout agriculteur disposant de moins de dix hectares de terres cultivées, qu'il en soit propriétaire ou non, et indépendamment de toute considération économique. De ce point de vue, la catégorie des agriculteurs concernés peut être qualifiée d'homogène. Par ailleurs, le choix de conversion des terres labourables en pâturage est un acte volontaire, non contrôlé⁴ par un quelconque organisme. Afin de palier cette limite du volontariat, l'aide financière apportée par l'état apparaît comme un stimulant qui influence la rapidité de la diffusion. Cette stimulation économique constitue un avantage pour étudier la diffusion car, dans ce cas, la probabilité que des conditions socio-économiques nouvelles ou que d'autres innovations viennent « perturber » la diffusion du pâturage est limitée.

Sur la période étudiée par Torsten Hägerstrand, soit entre 1929 et 1932, près de 20% des fermiers ont adopté les subventions, ce taux passant à près de 50% en 1944 (Figure 16.2)⁵.

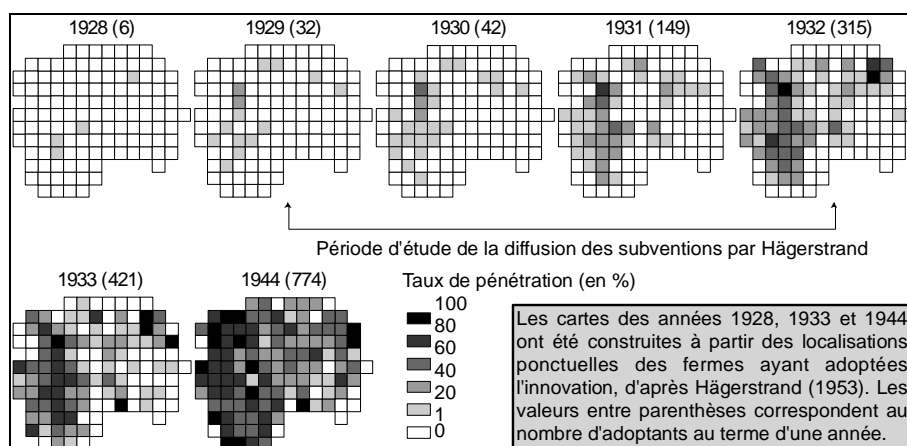


Figure 16.2 - La diffusion des subventions entre 1928 et 1944.

C'est à partir de ces données empiriques qu'Hägerstrand élabore son modèle de simulation, caractérisé par les éléments suivants :

⁴ Au sens de Lawrence Brown [BRO 81], il n'y a pas d'intermédiaire qui coordonne la diffusion, comme cela existe pour l'implantation des franchises par exemple.

⁵ L'aire d'étude se situe dans les districts de Kinda et Ydre, au sud de la Suède. Cette zone est décomposée en carreau de 5km de côté pour lesquels on comptabilise le nombre d'adoptants à chaque période.

Modélisation et simulation multi-agents pour Sciences de l'Homme et de la Société.

- la population se décompose en deux catégories d'individus, les *adoptants* et les *adoptants potentiels* ;
- les contacts entre ces deux catégories d'individus favorisent la circulation de l'information sur l'existence de cette innovation et donc son acceptation ;
- ces contacts sont principalement locaux dans la zone d'étude et peuvent être modélisés à partir d'une grille d'interaction spatiale, qui prend la forme d'un champ moyen d'information (CMI). Celui-ci représente une probabilité de contact⁶ entre un individu situé dans la cellule centre de la grille et les individus localisés dans la grille (voir annexe n°1);
- l'inégale densité des populations susceptibles d'adopter l'innovation modifie les probabilités de contacts entre individus, cet effet est introduit dans le modèle par une pondération du CMI ;
- outre les effets de la distribution de la population sur la probabilité de contact entre individu, l'existence de barrières à la communication (montagnes et lacs) est introduite dans le modèle, celles-ci venant modifier les probabilités de contact du CMI⁷.

On peut alors observer le comportement de ce modèle en respectant la période d'étude de l'auteur mais également en prolongeant les simulations, ceci pour atteindre approximativement le nombre d'adoptants artificiels proche du nombre d'adoptants observé en 1944 (Figure 16.3).

Si on compare les simulations aux observations sur la période couverte par T. Hägerstrand, c'est-à-dire de 1929 à 1932, plusieurs constats peuvent être faits. La diffusion des « prairies artificielles » suit approximativement les mêmes voies de déplacement que la diffusion observée, validant ainsi en partie un mode de déplacement des subventions selon un mode de contagion, de proche en proche. Au-delà de la forme globale de la diffusion, les conclusions sont cependant mitigées quant à la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante la réalité, notamment en terme de représentativité des taux locaux d'adoption. Une décroissance trop rapide de la probabilité d'adoption avec la distance, une sous-estimation du rôle des propagateurs [HAI 82][HAR 66], des effets de barrières trop réducteurs par rapport à l'espace ou à l'innovation étudiée [YUI 64][CLI 73], ou la simplicité du processus et des comportements des individus dans la diffusion de cette innovation [HÄG 53] peuvent être à l'origine des différences entre la distribution

⁶ Ces probabilités ont été établies à partir de l'équation: $\log F_{ij} = 0,7966 - 1,585 \log d_{ij}$, les flux F_{ij} sont fonction de la distance d_{ij} séparant deux cellules [HAG 65a].

⁷ L'intensité des perturbations des barrières est de deux ordres, elle peut perturber totalement les communications entre deux cellules, les probabilités de contacts entre ces deux cellules sont alors égales à 0, ou de moitié, la probabilité associée à la cellule concernée du CMI étant alors divisé par 2.

géographique observée et simulée. Les écarts s'accroissent lorsque le modèle fonctionne jusqu'à atteindre approximativement les résultats observés en 1944, l'auto-corrélation spatiale⁸ positive des résidus déjà mise en évidence par Cliff et Ord pour les années 1931 et 1932 atteint la valeur de 0.7 en 1944⁹.

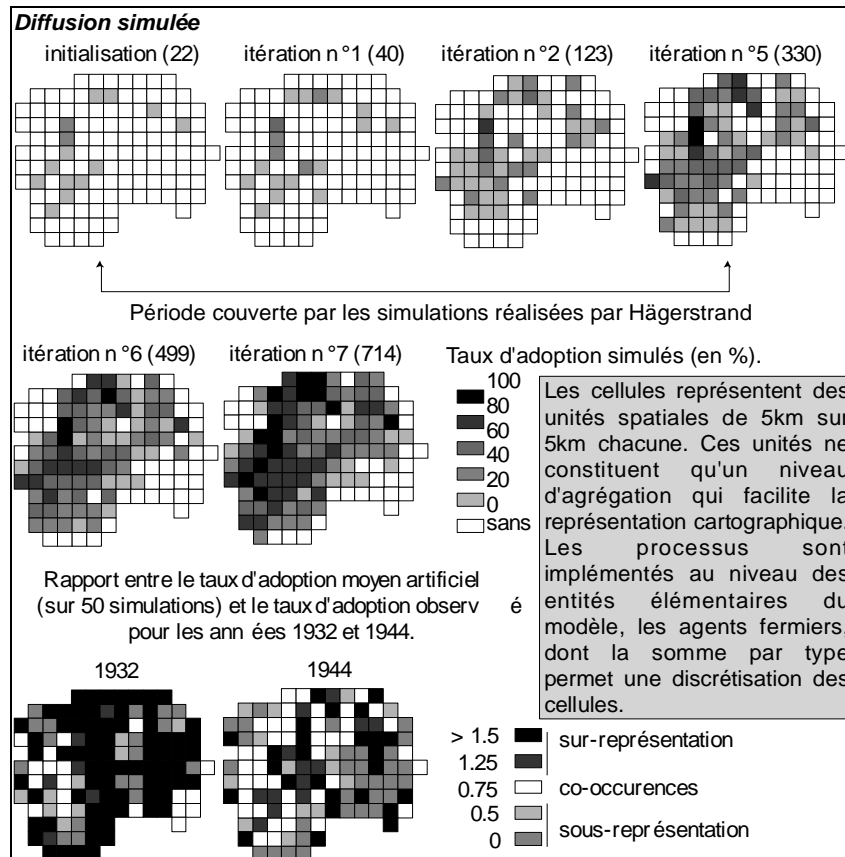


Figure 16.3 – Simulation de la diffusion des subventions entre 1928 et 1944.

La nature du modèle est à l'origine de cette tendance des simulations à produire une forte auto-corrélation spatiale et temporelle : le modèle fonctionne selon un processus d'amplification, où chaque agent qui adopte l'innovation devient un émetteur et provoque l'adoption de l'innovation par un autre agent. Au terme de la

⁸ L'indicateur d'auto-corrélation de Moran est utilisé ici, calculée avec le logiciel IDRISI.

⁹ Coefficient calculé à partir d'une carte moyenne (sur 50 simulations) des écarts au réel, à partir d'une matrice d'interaction spatiale de contiguïté d'ordre 1. Pour comparaison, ce coefficient est égal à 0.32 en 1944.

simulation, tous les agents ont adopté les subventions et l'auto-corrélation spatiale est égale à 1. La modélisation multi-agents offre alors de nombreuses possibilités pour raffiner les hypothèses posées au niveau des comportements individuels et améliorer ainsi les résultats des simulations.

16.4. Le modèle d'Hägerstrand revisité dans l'univers multi-agents

Les travaux d'Hägerstrand sur la diffusion des subventions ont de nombreuses fois été repris en vue d'améliorer les résultats des simulations. Cependant la plupart de ces recherches se sont concentrées sur l'exploration des valeurs paramétriques du modèle, comme la modification des effets de barrière ou les effets induits par la prise en compte d'un CMI anisotrope. L'objectif ici est de s'intéresser aux mécanismes du modèle. Reprendre le modèle d'Hägerstrand, en le modifiant quelque peu, participera, nous le souhaitons, à le faire mieux connaître de la communauté des sciences humaines et sociales qui intègrent peu à peu les sciences de la complexité. Plus largement, ce travail nous amènera à montrer que la richesse théorique des sciences humaines et sociales, notamment de la sociologie rurale des années 1930-40 [RYA 43], nous permet de proposer des modèles sans nécessairement avoir recours à des enquêtes individuelles lourdes à réaliser. Profitons ainsi, grâce à des collaborations fécondes, des travaux menés par nos prédécesseurs pour avancer dans le champ de la complexité.

16.4.1. Un modèle formel de diffusion

Dans le cadre d'une réflexion basée sur les principes fondamentaux à retenir pour étudier des phénomènes de diffusion, un modèle formel a été conçu qui s'intègre à la simulation multi-agents [DAU 04]. Ce modèle propose de distinguer deux ensembles lorsque l'on se trouve confronté à une problématique de diffusion. Le premier ensemble concerne la structure, il représente la base invariante du système étudié. Le second ensemble renvoie à la dynamique qui définit les processus d'évolution du contenu de la structure. Ces deux ensembles sont constitués d'éléments qu'il convient de définir.

16.4.1.1. La structure

La structure est composée de trois types d'éléments qui définissent le support de propagation. L'*hôte* est l'entité élémentaire du système qui répond à un stimulus par un changement d'état. Dans le cadre de la diffusion d'une épidémie, l'hôte est un individu ayant une variable d'état de type SIR (*Susceptible-Infected-Recovered*), par exemple. Dans le cadre de la diffusion d'un nuage toxique, l'hôte peut représenter une surface, telle une commune ou un pixel, dont le changement d'état est régi par

une règle qui définit à partir de quel seuil la présence du nuage rend la surface contaminée. Le second est le *vecteur*, constitué des particules qui se déplacent lors de la diffusion. Ce peut-être un virus, un feu, une rumeur, une information, etc. Le vecteur représente entre autres choses les entrées et les sorties des hôtes. Enfin le troisième type d'élément est le *canal de propagation* qui constitue la voie empruntée par le vecteur pour se répandre. Il s'agit donc du support d'interaction entre les hôtes : dans le cadre d'une épidémie, l'hôte est l'individu, le vecteur le virus et le canal de propagation les contacts interpersonnels ; dans le cadre d'un nuage toxique, l'hôte est la surface, le vecteur le nuage et le canal de propagation les lignes de contact des différentes surfaces.

16.4.1.2. La dynamique

Trois règles de transition permettent à la structure d'évoluer dans le cadre d'un phénomène de diffusion. La première est la *règle d'émission* qui décrit les mécanismes de sortie des particules depuis l'hôte vers le canal. La seconde est la *règle de circulation* qui rend compte à la fois du comportement de la particule du vecteur dans le canal et qui décrit le mécanisme d'introduction dans l'hôte. Enfin la troisième est la *règle d'acquisition* qui définit le mécanisme de transition de l'hôte, c'est-à-dire de « contamination » par le vecteur. Si on reprend l'exemple d'une épidémie, la grippe par exemple, la règle d'émission définit la quantité de virus sortant d'un individu contaminé, cette règle pouvant suivre une loi décroissante. La règle de circulation définit la circulation du virus dans l'air jusqu'à son entrée dans un hôte, et éventuellement sa durée de vie à l'extérieur. Enfin la règle d'acquisition définit le changement d'état de l'hôte sain qui serait en contact avec le virus. Regardons maintenant comment ce modèle général peut s'adapter à un phénomène particulier de diffusion, celle des subventions aux pâturages.

16.4.2. Du modèle général au modèle particulier

Au travers des éléments présentés dans la section précédente, l'étude de la diffusion des subventions aux pâturages s'intègre parfaitement dans les deux ensembles qui définissent notre modèle général. Le Tableau 16.1 illustre les composants et leurs fonctions dans le cadre de cette étude.

Si les règles spatiales propres à un phénomène de diffusion sont relativement bien connues des géographes, certains éléments doivent cependant être précisés car ils ne relèvent pas directement de problématiques géographiques. C'est le cas du comportement du vecteur et des règles comportementales des hôtes face à l'innovation. Les travaux des sociologues, notamment de la sociologie rurale, apparaissent comme une aide précieuse pour la formalisation de ces différents éléments.

<i>Composantes du modèle général</i>	<i>Composantes et fonctions de l'étude de cas</i>
Hôte	Le <i>fermier</i> (entité agrégée à la ferme).
Vecteur	<i>Information</i> sur l'innovation (observation ou message ; locale ou globale ; évolutive ou pas).
Canal de propagation	<i>Contacts</i> interpersonnels (proximité spatiale, réseau social) ; <i>Observations</i> .
Règle d'émission	<i>Information envoyée</i> par les adoptants / non adoptants.
Règle de circulation	Liée au <i>champ d'interaction</i> spatiale et à l'étendue des réseaux sociaux.
Règle d'acquisition	Un <i>processus décisionnel</i> dynamique et non symétrique.

Tableau 16.1. *Composantes et fonctions du modèle de diffusion.*

16.4.2.1. *Le vecteur ou l'information sur l'innovation*

Si l'information concernant une innovation est le principal vecteur qui favorise sa diffusion dans le temps et l'espace, il est nécessaire d'en expliciter les caractéristiques. Selon E. Rogers [ROG 62], un certain nombre de qualités sont nécessaires pour qu'une innovation se diffuse :

- Avantage relatif : en temps ou en argent comparé aux pratiques courantes ;
- Compatibilité : l'innovation est compatible avec les pratiques usuelles ;
- Simplicité : l'innovation et ses modes d'application sont compréhensibles ;
- Test : l'innovation peut être appliquée sur une période limitée sans générer de pertes pour l'utilisateur ;
- Observabilité : l'innovation peut être observée et l'information la concernant peut être communiquée.

Ces différents aspects font que globalement une innovation peut être traitée selon une échelle de qualités, que l'on formalise ici par un indice β ($\beta \in [0, \dots, 1]$) qui représente la qualité globale des subventions, identique pour tous. Lorsque β est proche de la valeur zéro, la probabilité d'adoption est faible, celle-ci sera d'autant plus élevée que β sera proche de la valeur 1. Cette qualité globale, et donc les probabilités d'adoption associées, peuvent évoluer dans le temps (Figure 16.4).

Cette évolution peut être liée à l'expérimentation de l'innovation, à son adaptation, à la présence d'effets de réseaux ou d'économies d'échelles. Dans le cadre des subventions aux pâturages, un premier scénario est réalisé avec une qualité

globale stable tout au long de la période, ces subventions n'ayant pas été modifiées durant la période de mise en œuvre.

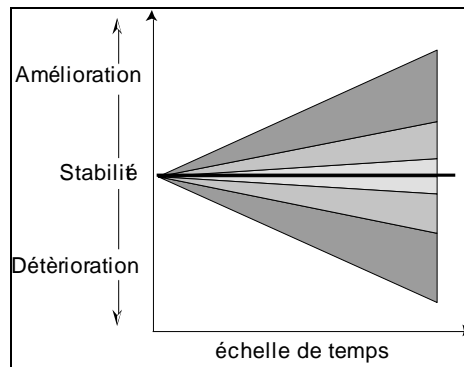


Figure 16.4 : Evolution schématique des qualités du vecteur.

16.4.2.2. Des hôtes aux attitudes différenciées face à l'innovation et à l'information

Comme nous l'avons vu dans la première section, il existe de fortes différences interindividuelles en matière d'adoption, celles-ci expliquant en partie la temporalité de diffusion (Figure 16.1). Selon E. Rogers, ces différences s'expriment principalement du fait de l'accès et de la confiance faite à l'information : certains individus accèdent rapidement à l'information et ont très vite une opinion sur les potentialités offertes par l'innovation, ils n'ont alors pas besoin de retourner à l'information pour arrêter leur choix ; d'autres au contraire ont besoin d'une quantité importante d'information, souvent redondante, pour exprimer leur choix, la réception récurrente d'informations étant ainsi vécue comme un indice de confiance. Ces différences interindividuelles sont formalisées par une variable d'état S [1 ; ... ; 5] qui représente un indice de saturation aux messages. A l'initialisation, un état est attribué à la variable d'état S pour chaque agent¹⁰, celle-ci faisant office d'effet de seuil à la réception de messages. La variable d'état S correspond ainsi à la quantité d'information maximum nécessaire pour qu'un hôte prenne une décision, soit adopter soit rejeter les subventions.

16.4.2.3. Une règle d'acquisition qui révèle un processus décisionnel

Dans le modèle proposé par Hägerstrand, la décision d'adopter l'innovation est traitée comme un événement discret, l'individu passe de l'état « adoptant potentiel » à « adoptant » s'il est sélectionné au hasard par un adoptant. Ce mécanisme ne laisse

¹⁰ L'affectation de la valeur d'état se fait pour chaque agent par un tirage aléatoire dans une distribution uniforme et discrète.

aucune place à la qualité de l'information reçue ni aux différences interindividuelles définies précédemment. Selon Rogers et Shoemaker [ROG 71], la stratégie qui conduit un individu à passer d'une simple opinion à une action relève cependant d'un processus décisionnel qui peut être décomposé en cinq étapes :

- Connaissance : l'individu prend connaissance de l'existence de l'innovation, quelque soit le mode d'information ;
- Persuasion : l'individu développe une attitude positive ou négative à l'égard de l'innovation ;
- Décision : l'individu recherche des informations, effectue des calculs menant à un choix de rejet ou d'adoption de l'innovation ;
- Implémentation : L'individu utilise l'innovation ;
- Confirmation : L'individu confirme son choix ou remet en cause sa décision passée s'il est exposé à des informations conflictuelles.

Ce processus décisionnel, tout au moins pour les trois premières étapes, dépend de la nature des informations que l'agent reçoit (messages ou observations). Cette information peut avoir une incidence négative ou positive sur sa probabilité d'adoption. On considère ici que tout individu qui adopte envoie des informations positives et que tout individu ayant rejeté l'innovation est pourvoyeur d'informations négatives. Si l'information est positive, la probabilité de rejeter l'innovation évolue de la manière suivante :

$$x_{i+1} = x_i + r_1(0 - x_i) \quad [16.1]$$

Si l'information est négative, la probabilité de rejeter l'innovation évolue de la manière suivante :

$$x_{i+1} = x_i + r_2(1 - x_i) \quad [16.2]$$

avec $x_i = \beta$ avant tout premier contact. Il est possible de suivre l'évolution de ces probabilités dans le cas où un agent ne recevrait que des informations positives ou négatives et qu'il donne le même poids ($r_1 = r_2$) à ces messages.

Avec une probabilité d'adoption égale à 50% au départ ($\beta = 0.5$), la réception d'un premier message négatif augmente la probabilité de rejeter l'innovation, d'autant plus si le poids donné à cette information par l'agent est élevé : avec un poids égal à 0.5, la probabilité de rejet passe à 75% (donc d'adopter à 25%). Au contraire, la probabilité de rejeter l'innovation diminue si l'agent reçoit des informations positives, d'autant plus que le poids accordé à cette information est élevé. Notons que dans cette fonction l'individu reçoit jusqu'à 18 messages, ce qui ne peut se produire dans le modèle complet puisqu'une fonction de saturation y est intégrée, celle-ci tolérant au maximum cinq messages.

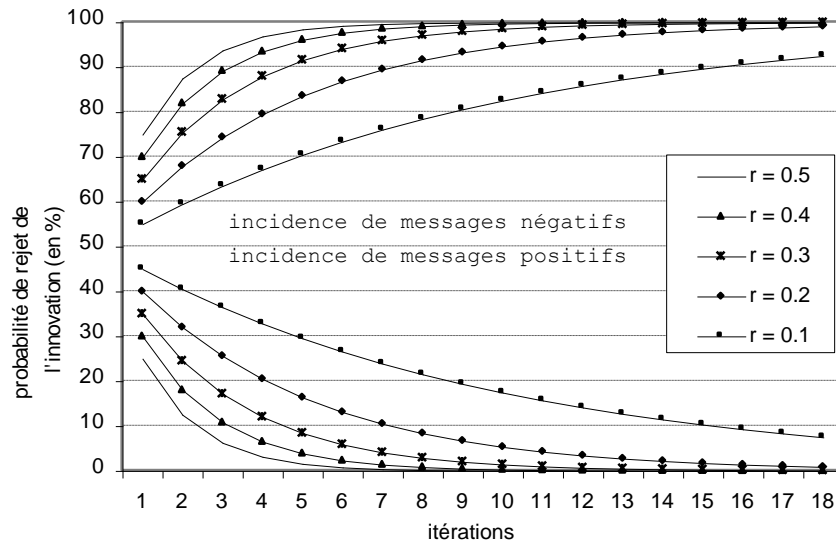


Figure 16.5 : Evolution de la probabilité de rejet de l'innovation par un hôte en fonction de la nature des messages et le poids associé à ces messages.

16.4.2.4. Les canaux de propagation du vecteur

Une des questions que l'on peut se poser est l'utilité, dans le cadre d'une innovation technique, de prendre en compte le transfert d'informations entre individus dans le processus d'adoption. Cela revient à poser comme principe que l'information globale véhiculée par les médias et les réunions professionnelles organisées autour des subventions suffisent à satisfaire la curiosité du fermier. Rappelons que dans le contexte d'étude, les campagnes de promotion ont été nombreuses, tant par le biais des médias classiques que par les meetings organisés par la *Rural Economy Association* qui ont couvert de manière homogène le territoire. Si tel était le cas, comment expliquer que la dynamique de diffusion suive un gradient ? La sociologie rurale nous offre un élément de réponse: « [...] *as people are evaluating an idea for their own use, they usually consult with friends and neighbors whose opinions they respect. The reasons for the apparent lack of importance of mass media and salesmen at this and later stages of the adoption process are : (a) the information they provided through these channels is too general ; (b) the potential adopters mistrust some mass media information because they feel that the information is tempered by the business interests of those who are*

Modélisation et simulation multi-agents pour Sciences de l'Homme et de la Société.

in control of them »¹¹. Il existe donc bien une logique interindividuelle dans le processus de diffusion, logique qui nous amène à prendre en compte comme base de l'interaction la contiguïté spatiale et sociale. Au-delà de l'information globale, le réseau (social, professionnel) [LAZ 48] et l'observation directe (celle du champ du voisin) [JAI 65] sont déterminants dans le choix d'adopter ou pas une innovation [BEA 57].

16.4.3. Modèle multi-agents de la diffusion des subventions aux pâturages

La démarche de modélisation de la diffusion des subventions aux pâturages a suivi les principes illustrés ci-dessous (Figure 16.6). Celle-ci s'inspire largement des apports théoriques des travaux d'Hägerstrand, à travers la *Time Geography* notamment, et des travaux des sociologues concernant les règles d'émission et d'acquisition. L'implémentation sous forme informatique du modèle¹² permet une première série de simulations pour vérifier le comportement du modèle, puis une seconde série de simulations pour calibrer les paramètres et évaluer ensuite la pertinence des résultats des simulations relativement aux observations.

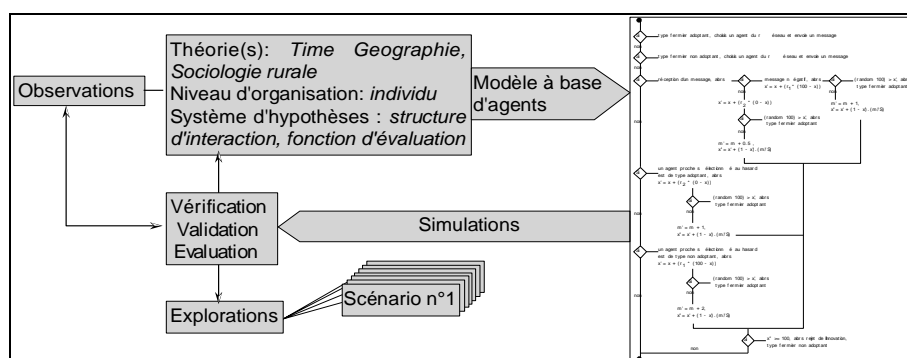


Figure 16.6 : Modèle de conception d'une simulation multi-agents.

C'est durant cette phase qu'une question essentielle est apparue. L'analyse des écarts des simulations aux observations pour l'année 1944 montre en effet une structuration que l'on ne peut associer à un bruit : une nette sur-représentation des

¹¹ Subcommittee for the Study of Diffusion in Farm Practicies. Ce centre d'étude, qui regroupait des chercheurs comme Ryan, Gross ou Rogers a joué, avec des chercheurs de l'université de Columbia (Lazarsfeld, Katz, Colemann) un rôle essentiel dans le développement des points de vue théoriques et méthodologiques de la diffusion.

¹² On trouvera le diagramme d'activités UML dans [DAU 03].

adoptants dans la partie occidentale du territoire et une sous-représentation dans sa partie orientale (Figure 16.7).

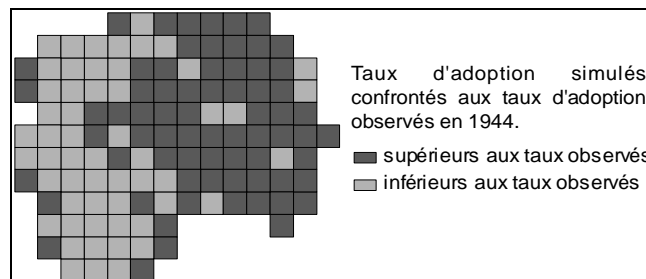


Figure 16.7 : *Ecart aux observations de 1944.*

De nombreux jeux de paramètres ont été testés afin d'améliorer les résultats des simulations mais cette configuration restait stable. La non résolution d'une telle configuration spatiale des résidus ne pouvant être trouvée dans la modification de mécanismes locaux, nous nous sommes alors penchés sur les phénomènes dits immergents, ou émergence de 2nd ordre [GIL 99].

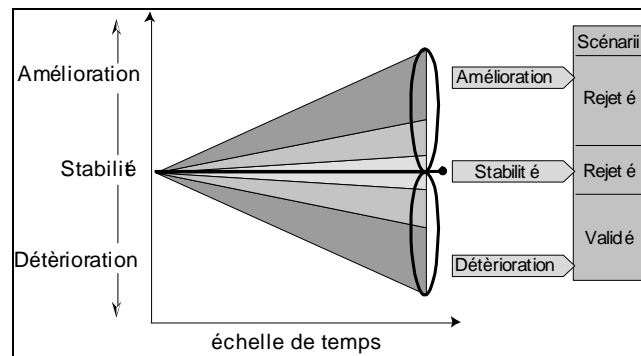


Figure 16.8 : *Dynamique d'évolution globale des qualités de l'innovation.*

L'hypothèse de stabilité des qualités globales de l'innovation telle qu'elle avait été initialement prévue pouvait être à l'origine de ce phénomène. En effet le paramètre β , qui décrit les qualités de l'innovation, reste constant sur la période : l'hypothèse implicite est qu'il n'y a plus de transfert d'information du global vers le local une fois que les campagnes initiales de propagande ont été menées. Le modèle ainsi constitué est de type « *bottom-up* », soit un fonctionnement totalement décentralisé du phénomène de diffusion. Poser cette hypothèse revient ainsi à mettre de côté l'un des stades évoqués par E. Rogers, celui de l'expérimentation. Il se peut en effet qu'après une période d'essai, ce qui apparaissait être une innovation

profitable pour les agriculteurs s'est avéré être moins bénéfique qu'escompté. Si tel est le cas, on a dû assister à un renversement de la situation initiale allant vers une « démystification » progressive des subventions, l'expérience collective venant alimenter le mécanisme de décision individuel (Figure 16.8). L'hypothèse initiale de stabilité, mais également d'évolution positive, des qualités perçues de l'innovation a été rejetée au profit d'une diminution de ces qualités dans le temps.

Afin d'intégrer ce phénomène de transfert d'information du collectif vers le particulier, dans le cas d'un scénario de décroissance des qualités perçues de l'innovation, une fonction supplémentaire a été intégrée au modèle. Cette fonction est relativement simple et joue sur un effet de masse : on postule que l'ensemble des agriculteurs qui ont adopté les subventions, et les ont expérimentées, participe à la circulation d'informations négatives venant diminuer d'autant les probabilités individuelles d'adoption. Ce mécanisme est intégré au modèle selon la fonction suivante :

$$\beta' = \beta + k \times (100 - \beta) \times \left(\frac{\sum A_t}{N} \right) \quad [16.3]$$

avec un paramètre k qui représente le poids accordé par un individu i à cette information globale.

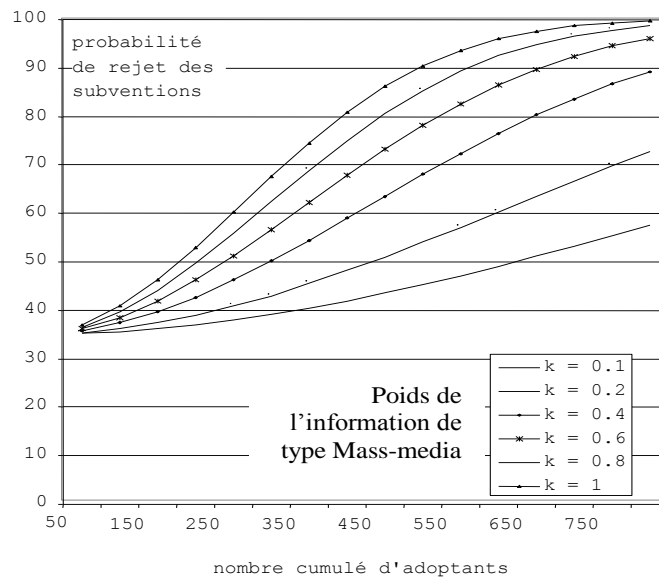


Figure 16.9 : Evolution des probabilités individuelles de rejet et poids de l'information.

On peut voir évoluer les probabilités individuelles de rejeter l'innovation en fonction du poids que les individus accordent à cette information globale négative. Avec un poids relativement faible ($k = 0.1$), un grand nombre d'adoptants est nécessaire avant que l'information ait un impact décisif sur les décisions individuelles. A contrario, cette masse critique d'adoptants sera d'autant moins élevée que le poids donné à l'information sera élevé. Les meilleurs résultats obtenus en comparaison aux observations de 1944 sont produits avec un coefficient k égal à 0,6. Le modèle¹³ permet ainsi de représenter correctement près de 60% des taux de propagation observés en 1944 (Figure 16.10).

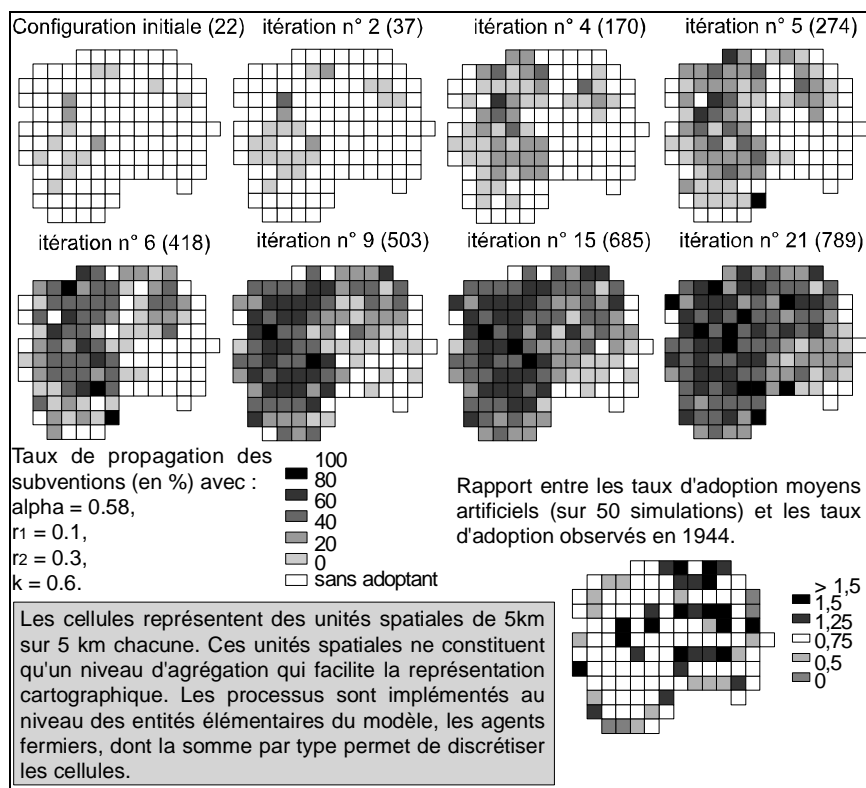


Figure 16.10 : Diffusion simulée selon une dynamique locale et globale.

Le modèle tend cependant à surreprésenter des taux d'adoption dans et à proximité immédiate des cellules initialement touchées par les subventions. Ainsi, à partir des premiers foyers d'adoption, les mécanismes de propagation de proche en proche associés à une probabilité d'adoption relativement forte provoquent des taux

¹³ Les trois autres paramètres du modèle sont : $\beta = 0.58$, $r_1 = 0.1$ et $r_2 = 0.3$

de reconversion aux pâturages artificiels plus importants que ceux observés dans le réel. Au contraire, le modèle tend à sous-estimer les taux d'adoption en périphérie de la zone. Dans ce cas, ce sont toujours les mécanismes de propagation qui en sont responsables, car ils ne permettent d'atteindre que tardivement ces cellules, à un moment où la probabilité de rejet des subventions est déjà élevée, amplifiée par les expériences « négatives » des agents fermiers. Le modèle n'offre pas à ce stade de solution paramétrable pour améliorer ces résultats. Divers tests ont été réalisés, en modifiant notamment les coefficients associés au poids des interactions locales sur la fonction de décision des agents : augmenter l'influence des messages « positifs » supprime une grande partie des sous-représentations en périphérie, mais augmente le nombre de cellules sur-représentées au centre de la zone.

Néanmoins, par les écarts qu'il génère, le modèle met en évidence des zones pour lesquelles les taux observés ne peuvent être expliqués par les hypothèses posées. On peut aussi penser qu'elles n'ont pu être correctement représentées par le modèle en l'absence de règles. Certaines zones ont connu une baisse de la proportion de fermes concernées par les pâturages entre 1933 et 1944 : ce mécanisme n'a pas été intégré dans le modèle, or il était mentionné comme la cinquième étape du processus décisionnel d'E. Rogers, la phase de confirmation. Cet effet de retour à la situation initiale se traduit alors logiquement par une sur-représentation des taux simulés pour les cellules concernées. Ajouter un mécanisme probabiliste de rejet des subventions après une période d'expérimentation ne poserait aucune difficulté technique mais ceci n'apporterait pas, en dehors d'une légère amélioration des résultats, de nouvelles connaissances sur le phénomène.

16.5. Conclusion

La Géographie *Artificielle*, dans la sphère des sciences de l'Artificiel [SIM 69], voit ses champs d'application se multiplier depuis la fin des années 1990. La géographie artificielle se définit comme un « laboratoire informatique » qui permet la formalisation et la validation de processus locaux aptes à produire, par la simulation, des dynamiques et des structures spatiales macro-géographiques [DAU 05]. L'exploration systématique des mécanismes qui agissent lors de la diffusion d'une épidémie ou d'une innovation fait ainsi partie de ces domaines d'application possibles.

Le modèle conceptuel de diffusion présenté ici semble être suffisamment générique pour pouvoir s'adapter à un large éventail de phénomènes qui se propagent dans l'espace géographique, des épidémies vectorielles aux innovations techniques. Il constitue une première étape dans la réalisation d'un modèle représentatif d'un cas d'étude. L'implémentation informatique des hypothèses et la simulation représentent une seconde étape riche d'un point de vue heuristique, la « computation » offrant une précieuse aide à la réflexion, une réflexion assistée par

ordinateur. L'exploration systématique des processus implémentés et la possibilité de conserver l'historique de la dynamique permet en effet d'isoler d'éventuels changements de trajectoire dans la dynamique du phénomène, et donc de revenir sur les hypothèses initialement posées.

Dans le cas des subventions aux pâturages, la bifurcation qui apparaît dans les années 1932-1933 et qui conduit à un déclin de leur diffusion jusqu'en 1944 était probablement connue d'Hägerstrand. Les outils de l'époque ne lui permettaient cependant pas d'introduire ces changements tant qualitatifs que quantitatifs dans le modèle, il a donc choisi d'arrêter les simulations avant cette bifurcation. En introduisant ces changements dans le « temps informatique » du modèle, les simulations ont permis un suivi représentatif de la diffusion sur cette période. Plus qu'une révolution conceptuelle, c'est donc pour l'instant une révolution technologique qui accompagne le déploiement des sciences de l'artificiel en géographie. Il est cependant fort probable que ces nouvelles méthodologies annoncent le retour de l'individu dans la modélisation en géographie.

16.6. Bibliographie

- [BEA 57] BEAL M., ROGERS E., BOHLEN J., « Validity of the concept of stages in the adoption process », *Rural Sociology*, vol. 22, n°2, p. 166-168, 1957.
- [BRO 81] BROWN L., *Innovation Diffusion: A New Perspective*, London and New York, Methuen, 1981.
- [BRU 90] BRUNET R., DOLLFUS O., *Mondes nouveaux*, Paris/Montpellier, Belin-Reclus, 1990.
- [CHA 01] CHARDONNEL S., « La time-geography: les individus dans le temps et dans l'espace », in Sanders L. (dir.), *Modèles en analyse spatiale*, Hermes, Lavoisier, coll. Information géographique et aménagement du territoire, p.129-156, 2001.
- [CLI 73] CLIFF A.D., ORD J.K., *Spatial autocorrelation*, London, Pion, 1973.
- [DAU 02a] DAUDE E., « Localisations et dynamiques de diffusion des agences de travail intérimaire en France », *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, n° 2, p. 257-274, 2002.
- [DAU 02b] DAUDE E., Modélisation de la diffusion d'innovations par la simulation multi-agents. L'exemple d'une innovation en milieu rural, *Thèse de doctorat en géographie*, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, 2002.
- [DAU 03] DAUDE E., « Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion », *Cybergeo : Revue Européenne de Géographie*, n°255, 2003.
- [DAU 04] DAUDE E., LANGLOIS P., « Les formes de la diffusion », *Actes du Colloque GéoPoint*, Avignon, 2004 .
- [DAU 05] DAUDE E., « Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie: vers une Géographie Artificielle », in Y. Guermont (dir.), *Modélisation en géographie, Déterminisme et Complexité*, Paris, Hermes-Sciences, 2005.

Modélisation et simulation multi-agents pour Sciences de l'Homme et de la Société.

- [DES 05] DESSALLES J.-L., PHAN D., "Emergence in multi-agent systems: cognitive hierarchy, detection, and complexity reduction part I: methodological issues », in Mathieu P., Beaufils B., Brandouy O. (eds.), *Agent-Based Methods in Finance, Game Theory and their Applications, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 564, Berlin, Springer, p. 147-159, 2005.
- [EPS 96] EPSTEIN J. M., AXTELL R., *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*, Washington, D.C./ Cambridge, Ma., Brookings Institution Press / MIT Press, 1996.
- [GIL 99] GILBERT N., TROITZSCH K., *Simulation for the social scientist*, Philadelphia, Open University Press, 1999.
- [GOU 95] GOULD P., « Epidémiologie et maladie », in Bailly A., Ferras R., Pumain D. (dir.), *Encyclopédie de la Géographie*, Paris, Economica, p. 947-967, 1995.
- [HAG 53] HAGERSTRAND T., *Innovations förloppet ur korologisk synpunkt*, C.W.K Glerup, Lund, Sweden. Traduit et réédité par Pred A., *Innovation Diffusion as a Spatial Process*, Chicago, University of Chicago Press, 1967.
- [HAG 65a] HAGERSTRAND T., « A Monte Carlo Approach to Diffusion », *European Journal of Sociology*, vol. 63, p. 43-67, 1965.
- [HAG 65b] HAGERSTRAND T., « Aspects of the spatial structure of social communication and the diffusion of information », Cracow congress, Regional Science Association, papers XVI, p. 27-42, 1965.
- [HAI 82] HAINING R., « Interaction models and spatial diffusion processes », *Geographical Analysis*, n° 14, p. 95-108, 1982.
- [HAR 66] HARVEY D.W., « Geographical process and the analysis of point patterns », *Transactions of the Institute of British Geographers*, n° 40, p. 81-95, 1966.
- [JAI 65] JAIN N., The relation of information source use to the farm practice adoption and farmers' characteristics in Waterloo County, PhD thesis, University of Guelph, 1965.
- [LAZ 48] LAZARFELD P.F., *The people's choice*, New York, Free Press, 1948.
- [MOR 86] MORIN E., *La méthode, tome 3 : la connaissance de la connaissance*, Paris, Seuil, 1986.
- [ROG 62] ROGERS E.M., *Diffusion of innovations*, New York : Free Press, Macmillan Publishing Co, 1962.
- [ROG 71] ROGERS E.M., SCHOEMAKER F.F., *Communication of innovation :A cross cultural approach*, New-York, Free Press, 1971.
- [RYA 43] RYAN B., GROSS N., « The diffusion of hybrid seed corn in Two Iowa communities », *Rural Sociology*, n° 8, p. 15-24, 1943.
- [SIM 69] SIMON H., *The Sciences of Artificial*, Cambridge, Ma., MIT Press, 1969, traduction française J.-L. Le Moigne, *Les sciences de l'artificiel*, Folio-Essai, Paris (2004, réed. III).
- [YUI 64] YUILL R.S., A simulation of barrier effects in spatial diffusion Northwestern University : ONR Spatial Diffusion Study, 1964.

16.A1. Annexe n°1

L'étude des flux téléphoniques et des migrations confirme l'hypothèse d'une probabilité de contact décroissante lorsque la distance augmente. L'expérimentation amène à quantifier ces probabilités sous la forme de *champs de contacts*, soit une grille composée de 25 cellules auxquelles sont attachées différentes probabilités¹⁴. Le *champ de contact* ainsi défini représente les différentes probabilités d'interactions d'un individu situé au centre du champ avec un autre individu situé dans la grille. La valeur la plus élevée de 0,4432 signifie que l'individu situé dans la cellule centre du champ a une probabilité de 44,32 % d'établir des contacts avec un autre individu situé dans la même cellule que lui, ces probabilités de contacts diminuant avec les individus qui en sont éloignés.

0.0096	0.0140	0.0168	0.0140	0.0096
0.0140	0.0301	0.0547	0.0301	0.0140
0.0168	0.0547	0.4432	0.0547	0.0168
0.0140	0.0301	0.0547	0.0301	0.0140
0.0096	0.0140	0.0168	0.0140	0.0096

Figure 16.11 : *Le champ de contact*

A partir du champ de contact, il est possible de construire le *champ moyen d'information* (CMI). Pour cela, les valeurs de la grille sont converties en plages d'intervalles distincts qui correspondent aux probabilités associées à chacune des cellules. A la plage d'intervalle 0.2784 - 0.7216, qui correspond à la cellule centrale du CMI, est ainsi associée la même probabilité que celle de la cellule centre du *champ de contact*. Le tirage aléatoire d'un nombre décimal issu d'une variable uniforme permet alors de définir avec quelle cellule l'individu placé au centre du CMI va interagir.

¹⁴ Ces probabilités ont été établies à partir de l'équation: $\log F_i = 0,7966 - 1,585 \log d$. Le champ de contact n'ayant pas de limite absolue, le choix de la dimension de la grille reste arbitraire et dépend des expériences réalisées sur les différentes fonctions d'interaction spatiale. Dans ce cas précis, le champ de contact correspond à un carré de 25 km de côté, soit 25 cellules de 5 km de côté.

0 - 0.0096	0.0096 - 0.0236	0.0236 - 0.0404	0.0404 - 0.0544	0.0544 - 0.0640
0.0640 - 0.0780	0.0780 - 0.1081	0.1081 - 0.1628	0.1628 - 0.1929	0.1929 - 0.2069
0.2069 - 0.2237	0.2237 - 0.2784	0.2784 - 0.7216	0.7216 - 0.7763	0.7763 - 0.7931
0.7931 - 0.8071	0.8071 - 0.8372	0.8372 - 0.8919	0.8919 - 0.9220	0.9220 - 0.9360
0.9360 - 0.9456	0.9456 - 0.9596	0.9596 - 0.9764	0.9764 - 0.9904	0.9904 - 1

Figure 16.12 : *Le champ moyen d'information*

L'inégale densité des populations modifie les probabilités de contacts entre les individus. On suppose en effet que la probabilité de contact entre 2 cellules est fonction de la distance qui les sépare et de la population de chacune des cellules. Le champ moyen d'information est donc modifié selon la nature du voisinage, c'est-à-dire la distribution de la population dans et autour des cellules. La probabilité de contact Q associée à une cellule i avec une population N s'écrit alors :

$$Q_i = \frac{P_i N_i}{\sum_{i=1}^{25} P_i N_i} \quad [16.4]$$

où $P_i N_i$ représente le champ de contact pondéré par la population et Q_i une probabilité de contact standardisé. A chaque cellule correspond donc un champ moyen d'information différent selon la distribution de la population dans son voisinage.

5	6	10	11	11
20	18	17	20	16
28	25	17	18	14
36	24	19	14	12
21	26	16	6	10

Figure 16.13 : N_i : *Distribution de la population*

0.048	0.084	0.168	0.154	0.1056
0.28	0.5418	0.9299	0.602	0.224
0.4704	1.3675	7.5344	0.9846	0.2352
0.504	0.7224	1.0393	0.4214	0.168
0.2016	0.364	0.2688	0.084	0.096

Figure 16.14 : $P_i N_i$: Champ de contact pondéré

0.003	0.005	0.010	0.009	0.006
0.016	0.031	0.053	0.034	0.013
0.027	0.078	0.428	0.056	0.013
0.029	0.041	0.059	0.024	0.010
0.011	0.021	0.015	0.005	0.005

Figure 16.15 : Q_i : Champ de contact pondéré et standardisé

A partir du champ de contact pondéré et standardisé, on construit le *champ moyen d'information pondéré et standardisé* selon la méthode décrite précédemment.

0 –	0.003 –	0.008 –	0.017 –	0.026 –
0.003	0.008	0.017	0.026	0.032
0.032 –	0.048 –	0.078 –	0.131 –	0.166 –
0.048	0.078	0.131	0.166	0.178
0.178 –	0.205 –	0.283 –	0.711 –	0.767 –
0.205	0.283	0.711	0.767	0.780
0.780 –	0.809 –	0.850 –	0.909 –	0.933 –
0.809	0.850	0.909	0.933	0.942
0.942 –	0.954 –	0.974 –	0.990 –	0.995 –
0.954	0.974	0.990	0.995	1

Figure 16.16 : Champ moyen d'information pondéré et standardisé

L'utilisation du *champ moyen d'information pondéré et standardisé* permet alors de prendre en compte, dans les contacts interindividuels, à la fois les effets de la distance et de la distribution de la population sur la propagation d'une innovation dans l'espace.