



Espace géographique, spatialisation et modélisation en dynamique des systèmes

Christine Voiron, Jean-Pierre Chéry

► To cite this version:

Christine Voiron, Jean-Pierre Chéry. Espace géographique, spatialisation et modélisation en dynamique des systèmes. Res-Systemica, 2005, 5, 10 p. hal-00602190

HAL Id: hal-00602190

<https://hal.science/hal-00602190>

Submitted on 21 Jun 2011

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.

Espace géographique, spatialisation et modélisation en Dynamique des Systèmes

Christine VOIRON

Géographe, Professeur
Université de Nice-Sophia Antipolis
CNRS ESPACE-Nice
voiron@unice.fr

Jean-Pierre CHERY

Géographe, Maître de Conférences
UMR TETIS Cemagref-CIRAD-ENGREF
chery@teledetection.fr

Résumé : Cette contribution présente le rôle dévolu à l'espace en Dynamique des Systèmes. Les propriétés systémiques de l'espace géographique sont tout d'abord énoncées, puis sont examinées les principales manières d'introduire l'espace dans la modélisation en Dynamique des Systèmes. Les difficultés rencontrées pour rendre compte de la complexité spatiale sont également soulignées. Enfin, deux exemples d'études démontrent l'apport du raisonnement spatial à la compréhension des dynamiques régionales.

Abstract : This paper focuses upon the role of space in System Dynamics. In a first stage, systemic properties of geographical space are set out. Then the main methods and studies incorporating spatial elements are reviewed. Difficulties in taking into account spatial complexity in modeling processes are also outlined. In a second stage, two examples of studies enhance how the behaviour of regional dynamics is better understood by integrating a spatial thought into system dynamics modeling.

Introduction

Tout système est à la fois organisé et organisant. Cette propriété systémique fondamentale trouve écho, en géographie, avec l'organisation spatiale. Que la finalité soit la production de connaissance sur les territoires ou la compréhension de leur fonctionnement, la recherche de l'organisation spatiale constitue l'un des objets de la géographie. Dans les années 1970, la diffusion du raisonnement systémique a impulsé la réflexion sur le concept d'organisation spatiale comme en témoigne la définition éminemment systémique donnée par Roger Brunet en 1980¹. « Une organisation spatiale peut se définir comme un ensemble plus ou moins cohérent de lieux mis en relation. Cet ensemble est à la fois différencié et intégré en aires et réseaux dans lesquels circulent des flux. » Les caractéristiques majeures des systèmes spatiaux – la dualité homogénéité / hétérogénéité et l'interaction spatiale – sont contenues dans cette définition. La complexité de la dynamique spatiale apparaît en filigrane.

Cette contribution se propose de présenter le rôle dévolu à l'espace dans l'analyse des systèmes territoriaux ainsi que les différentes manières de l'introduire dans la modélisation systémique. Les difficultés rencontrées pour intégrer la spatialisation des phénomènes géographiques à la Dynamique des Systèmes sont également soulignées. Enfin, l'apport du raisonnement spatial à la compréhension des dynamiques régionales est démontré à partir de deux exemples.

¹ BRUNET R., (1980). *La composition des modèles dans l'analyse spatiale*. L'espace Géographique, n°4, 1980, Doin, 8 place de l'Odéon, Paris-VI^e

1. La Dynamiques des Systèmes et l'espace géographique

1.1. Les propriétés systémiques de l'espace

Les termes d'espace et d'espace géographique sont tout d'abord à distinguer. Le terme générique d'espace se rapporte simplement à l'étendue sur laquelle se déploient des phénomènes. La majeure partie des systèmes ne prennent pas en compte l'espace. Lorsque ce dernier entre dans leur constitution c'est le plus souvent en tant que simple support des éléments étudiés. Il est neutre, passif, dépourvu de tout rôle dans le fonctionnement du système. En revanche, dans le cas des systèmes spatiaux, l'espace est partie prenante de la dynamique systémique, mais à des degrés divers. En tant que champ d'action de cette dynamique, l'espace est découpé en unités spatiales dont le nombre et la forme varient selon le type de spatialisation retenu. La couverture de la totalité du champ d'étude par une grille aux mailles régulières et le choix d'un nombre limité d'unités spatiales de dimensions variables constituent les découpages les plus courants. Chaque entité spatiale est alors renseignée, de façon plus ou moins élaborée, par un certain nombre d'attributs et située par rapport aux autres entités..

L'espace géographique n'est pas l'étendue. C'est la société qui, en fonction de ses projets et de ses possibilités techniques, transforme de l'étendue en espace. L'espace se distingue également du territoire qui est constitué à la fois par une société et par l'espace que celle-ci organise. L'espace géographique est un tout complexe formé d'éléments visibles : les lieux, les réseaux, les espacements et d'éléments invisibles, les inter-relations entre les lieux qui constituent sa structure. A la différence d'autres conceptualisations, telles celles d'espace social, juridique ou économique, où le terme espace ne correspond en fait qu'à l'étendue des relations abstraites, l'espace du géographe prend en compte à la fois les relations qui s'inscrivent dans le sol et les relations invisibles, les interactions entre les lieux et les lois qui les modèlent.

Appréhender l'espace géographique dans une démarche systémique c'est considérer que :

- « *Tout lieu est situé dans l'espace, dans le temps et dans un ensemble de processus, au sein d'un champ de forces quelque part dans les Structures du Monde* »². Ces champs de force sont principalement financiers, culturels, démographiques et coexistent à toutes les échelles spatiales. Les relations qui unissent les champs de force et les lieux sont d'ordre systémique. Ainsi, les multiples forces qui interfèrent en un lieu contribuent à le façonner, de façon plus ou moins intense et durable selon les espaces et les périodes. Réciproquement, les lieux sont constitutifs des champs, ils déterminent la propagation des flux, freinent ou canalisent les courants d'échanges.
- L'espace géographique est à la fois organisé et organisant. Si la société produit l'espace, les éléments spatiaux rétroagissent également sur l'action de la société en créant des contraintes ou, au contraire, en exerçant une attractivité. « *L'espace est à la fois environnement et partie des sociétés ; produit et agent de leur production et reproduction ; entrée et sortie du système social* »³. La géographie spatiale, s'attache à mieux comprendre les liens existant entre les éléments spatiaux et les éléments anthropiques, en recherchant le rôle exercé par l'espace sur l'action de la société et dans les processus de transformation territoriale.

² BRUNET R., (1990). *Mondes Nouveaux* in *Geographie Universelle*. Hachette/Reclus

³ BRUNET R., (1980). article cité note 1.

- L'espace est un potentiel que les agents réexaminent et réévaluent continuellement en fonction de leurs besoins et de leurs aspirations, au regard des dynamiques et des potentialités des autres territoires. Cette dynamique incessante conduit à d'éventuels repositionnements des lieux et des objets dans le système.

Les propriétés systémiques qui viennent d'être énoncées sont fondamentales pour la compréhension des systèmes territoriaux mais leur prise en compte en modélisation s'avère délicate. Plus précisément, les difficultés majeures portent sur la traduction en Dynamiques des Systèmes de la dynamique spatio-temporelle et de l'interaction spatiale. En effet, le fonctionnement d'un système territorial est le résultat de processus qui se déroulent à des échelles spatiales différentes. Or, la résultante de la combinaison de ces dynamiques imbriquées est généralement méconnue car complexe, en effet, les phénomènes observés à l'échelle macro ne sont pas la somme de ceux intervenant à l'échelle micro. Parallèlement, les processus se déroulent à des échelles temporelles variables – temps longs et temps courts – mais concomitants et s'expriment avec des délais de réaction et des anticipations.

1.2. Etat de l'art

Les propriétés systémiques de l'espace géographique constituent ainsi un enjeu de modélisation, afin d'établir des modèles de simulation capables de restituer les structures et les dynamiques complexes des sociétés des systèmes territoriaux. Cet enjeu peut être évalué par les méthodes avec lesquelles il a été abordé en Dynamique des Systèmes, depuis le modèle développé dans *Urban Dynamics* en 1969, jusqu'aux modèles proposés au début du XXI^{ème} siècle.

Les modèles en Dynamique des Systèmes qui abordent la question de la société localisée dans un environnement géographique particulier forment un premier groupe d'appréhension de l'espace, de manière implicite. En effet, à travers le modèle d'*Urban Dynamics*, on retrouve la ville a-spatialisée. Son étendue est considérée comme l'expression visible de l'étendue du système considéré et les limites observables de la ville sont l'expression de la frontière du système avec son environnement infini⁴. Une perspective spatiale est énoncée : « le partage en zones devrait spécifier la proximité d'aires de logements à haute et faible densité (...) ». La distance relative et la forme des aires interviennent ainsi judicieusement dans l'interprétation sans être intégrées dans la structure du modèle. Les travaux qui ont suivi ont également traité de systèmes a-spatialisés comme les modèles de la Dynamique mondiale (modèles World 2⁵ et le World 3⁶). Le Monde est un lieu unique dans lequel s'établissent des boucles de rétroactions entre la population, les ressources naturelles, la pollution et l'investissement en capital.

Durant les années 70 et 80 se dégage un deuxième groupe de modèles, sur la base que constituent ces modèles globaux, l'amélioration des possibilités de calcul informatique, la diversité politico-économique mondiale (blocs occidental et soviétique, le Nord et le Sud), la dynamique urbaine (étalement urbain et péri-urbanisation) et la reconnaissance du rôle politico-économique des régions intranationales. Les travaux de modélisation en Dynamique des Systèmes ont ainsi porté sur une description de la complexité des systèmes géographiques

⁴ In FORRESTER J.W.(1969), *Dynamique urbaine*, p. 188 de l'édition française, Economica, coll. « Economie publique de l'Aménagement et des transports », n°6, 1979.

⁵ FORRESTER J.W., (1971) *Dynamique mondiale*, trad. fr. de *World Dynamics*, Lyon ; PUL, 1982, 222 p.

⁶ MEADOWS D H. et al., *The limits to Growth*, 1972. Trad. Française in « Halte à la Croissance », DELAUNAY, Fayard, 1972.

dans ces domaines par l'introduction de sous-systèmes localisés. Le modèle proposé par Mesarovic et Pestel dans *Mankind at the Turning Point*⁷ partitionne le Monde en plusieurs sous-systèmes régionaux. A ce niveau d'organisation du système et selon les secteurs de description du modèle (absence du secteur des transports), les conditions spatiales sont absentes et ces sous-systèmes régionaux interagissent comme peuvent interagir les différents éléments d'un système quelconque. On retrouve cette approche de sous-systèmes, dont la spécialisation correspond à une position spatiale, dans des travaux d'études régionales. Ainsi, le modèle Carpe aborde la relation entre un centre-ville et sa banlieue⁸, avec les secteurs de population, logement et emploi. La structure du modèle est dédoublée pour chaque zone, et ce sont les valeurs initiales, les paramètres et les seuils qui établissent les différences dans les interactions entre les zones. Les questions socio-économiques et environnementales qui se posent aux niveaux régionaux et locaux soulèvent le problème de la place de l'espace dans la conceptualisation des modèles des systèmes établis à ces niveaux là. Les contraintes de surface et de distance interviennent dans la structure des modèles en Dynamique des Systèmes et permettent ainsi d'introduire le rôle de l'espace dans les boucles de rétroaction (évolution des coûts de déplacement, variation des capacités et des densités), comme a pu l'envisager le modèle Amoral⁹.

Un troisième groupe de modèles liés à la Dynamique des Systèmes émerge dans les années 90 : se développent des pistes intéressantes dans les travaux de modélisation en géographie et dans les disciplines pour lesquels l'espace géographique est reconnu comme facteur explicatif majeur (écologie, hydrologie). Les géographes parlent de modèles spatialisés tandis que les écologues présentent des modèles « spatialement explicites ». La discrétisation de l'espace en cellules *a priori* (maillage par carroyage ou par hexagones) fixe le niveau de description du système auquel la démarche descendante de la Dynamique des Systèmes doit proposer une structure pour la modélisation. Les cellules définissent des agrégats de même nature fonctionnelle dans le système qui correspondent généralement à des types d'occupation du sol (espace urbain ou forêt par exemple) ou des gradients d'influence potentielle ou de densité. Les hydrologues développent des modèles « à compartiments », qui reconnaissent la position spatiale relative de réservoirs et de variables intermédiaires, selon la description générale amont-aval des bassins versants. La structure de ces modèles correspond à un réseau orienté et hiérarchique.

L'implémentation de ces modèles spatialisés passe par le couplage d'un module de Dynamique des Systèmes, supporté par un logiciel dédié (Stella, Vensim,...) avec un module de description de l'espace géographique, supporté par un Système d'Information géographique (SIG). Généralement, l'espace garde le statut de support, et de modalité de désagrégation du système en sous-systèmes localisés. Le voisinage est habituellement d'ordre 1. Pourtant, le module « stock-flux » peut être mis en relation avec un automate cellulaire qui définit des relations de voisinage plus complexes et les contraintes de changements liées à ces relations spatiales. Cette option a été développée en géographie¹⁰ et en écologie¹¹. Un outil,

⁷ MESAROVIC M., PESTEL E. (1974). *Mankind at the Turning Point*, Club of Rome ; publié en français sous le titre *Stratégie pour demain*. Deuxième rapport au Club de Rome, Seuil, 1974, 294 p.

⁸ FOURNIER M. (1984). *La dynamique de la croissance urbaine d'une ville moyenne française : le modèle CARPE*, Revue d'économie Régionale et Urbaine, n°1, pp. 67-94

⁹ CHAMUSSY H., LE BERRE M., UVIETTA P., DURAND M.G. (1986). *Cheminements systémiques du modèle AMORAL à une réflexion théorique en géographie*. Grenoble, L.A.M.A., Université de Grenoble, 140 p et article in *Analyse de système en géographie*, (1984), textes réunis par GUERMOND Y., Lyon, Presses Universitaires de Lyon (collection Science des systèmes), 324 p.

¹⁰ LANGLOIS A., PHIPPS M. (1997). *Automates cellulaires : applications à la simulation urbaine*. Paris. Hermès, coll. Systèmes complexes, 197 p.

TimeGIS¹², développé par des géographes, a visé l'intégration des deux modules. La plateforme Simile¹³ offre cette possibilité de désagrégation du modèle en unités spatiales *a priori* qui permettent d'établir des attributs spatiaux aux variables du modèle (surface, position) et déduire ainsi des contraintes spatiales de densité ou de distance.

Sans un couplage avec des plate-formes qui peuvent gérer une information spatiale discrétisée sous la forme de grilles *a priori*, les possibilités en Dynamique des Systèmes s'appuient sur la désagrégation des variables de stock et de flux par des matrices. L'espace peut ainsi être intégré en introduisant une matrice de voisinage ou de distance dans la structure du modèle, mais est limité à un nombre réduit de zones. Cette approche a pu être suivie pour des zones fonctionnelles de territoires régionaux¹⁴ ou des zones définies par un découpage *a priori*, sur maille carrée, dans des contextes urbains¹⁵.

L'utilisation des modèles spatialisés en Dynamique des Systèmes dépasse le cadre de la recherche en géographie académique et ceux-ci intègrent des travaux de prospective et de planification de développement territorial¹⁶ et d'aménagement de l'espace. Les qualités intrinsèques de la Dynamique des Systèmes permettent de souligner la complexité spatiale des systèmes territoriaux avec par exemple la diffusion d'effets contre-intuitifs à partir d'une zone d'intervention d'aménagement ou de réglementation. Ainsi par exemple, l'impact d'un réseau de transport urbain se mesure dans la redistribution des logiques résidentielles des habitants et les répercussions sur le marché du logement dans les différents quartiers. Cette constatation apparaît triviale à un niveau général, mais il est difficile de caractériser et localiser les effets. La Dynamique des Systèmes est ainsi confrontée à cet enjeu de modélisation pour ce qui est de l'intégration de l'espace différencié à l'intérieur d'une ville. Les développements qui suivent exposent deux démarches dans lesquelles la Dynamique des Systèmes est appliquée et adaptée à des problématiques spatiales.

2. Systèmes spatiaux et modélisation systémique

2.1. Les interactions spatiales de sous-systèmes méditerranéens

Dans un premier temps, est présentée une démarche conduisant à la modélisation conceptuelle des dynamiques territoriales de deux sous-systèmes méditerranéens, le littoral de la Côte d'Azur et son arrière-pays. La démarche proposée a pour but de comprendre les processus en jeu dans l'évolution de ces deux sous-systèmes et de déceler les recompositions territoriales qui en résultent. La Dynamique des Systèmes est ici croisée avec deux méthodes d'analyse spatiale. Les sous-systèmes étudiés se sont mis en place au début du XX^{ème} siècle

¹¹ MAXWELL, T. and COSTANZA, R. (1997). *An Open Geographic Modeling Environment*. Simulation, 68(3):175-185

¹² MATHIAN H., SANDERS L. (1993). *Modélisation dynamique et système d'information géographique*, in Mappemonde 4/1993, Montpellier, RECLUS, pp. 38-39.

¹³ MUETZELFELDT R., MASSHEDER J. (2003). *The Simile visual modelling environment*, European Journal of Agronomy, n°18, pp. 345-358.

¹⁴ CHÉRY J.-P. (1998). *Modélisation d'un système spatial en zone frontalière franco-suisse : adéquation de la Dynamique de Système aux problèmes de la différenciation spatiale*. Thèse de doctorat, Grenoble, IGA, Univ. Joseph Fourier, 315 pages

¹⁵ SANDERS P., SANDERS F. (2004). *Spatial Urban dynamics. A vision of the future of urban dynamics: Forrester revisited*. 32 p.

¹⁶ CHÉRY J.-P., VOIRON Ch. (2005). *Modèle de simulation des interactions population-logement de la ville de Nice*, rapport d'étude, Université de Nice Sophia Antipolis, à paraître.

avec la naissance de l'économie de villégiature. L'attraction littorale touristique et urbaine a accéléré l'exode rural des zones montagneuses et donné naissance à une disparité spatiale entre la bande côtière, où se concentrent 90% de la population et des activités des Alpes-Maritimes et l'arrière-pays, aux faibles densités. Chacun des sous-systèmes fonctionne selon des boucles de rétroaction positive. Cependant, depuis les années 1980, les recensements de population signalent des reprises démographiques dans certaines communes de l'intérieur et, dans le même temps, une stagnation, voire une diminution de la population de certaines zones littorales.

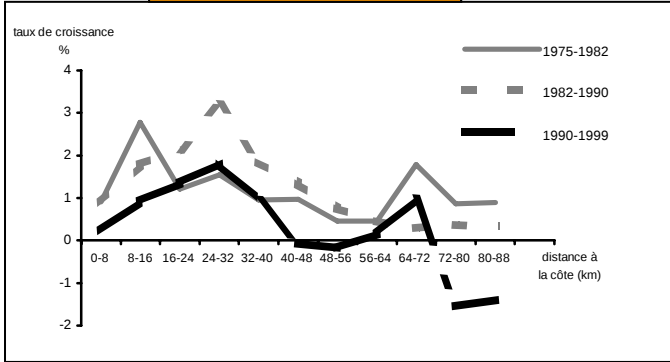
Afin de comprendre les dynamiques en cours, la démarche consiste à rechercher les interactions des deux sous-systèmes en s'appuyant sur l'évolution des structures spatiales¹⁷. L'espace est perçu à la fois comme champ de forces et champ de formes. Les structures spatiales et morphologiques sont considérées comme des marqueurs des dynamiques territoriales sous-jacentes. L'approche systémique menée conjointement aux analyses spatiales permet de rattacher les formes décelées aux processus qui les ont générées. Afin de déterminer les règles de distribution de la population à l'intérieur du champ d'étude, une analyse des taux de croissance de la population selon la distance au rivage est tout d'abord effectuée. Les courbes portées sur la figure 1 révèlent un déplacement du maximum de croissance vers l'intérieur et une diminution corrélative de la croissance près du rivage. Cette dynamique ondulatoire rappelle celle des aires urbaines. Le sous-ensemble littoral des Alpes-Maritimes, fortement urbanisé, connaît une dynamique centre-périphérie, ici littoral-intérieur, qui se traduit par la saturation des villes littorales et le déplacement de la population et des activités vers le proche arrière-pays. Toutefois, l'examen des recensements communaux signale des évolutions démographiques pouvant localement très contrastées. Un second type d'analyse spatiale, à partir de traitements d'images par morphologie mathématique est alors réalisé dans le but de déceler l'emplacement de la ligne de contact entre les deux sous-systèmes et ses variations récentes¹⁸. Les traitements se font à présent sur des images où les valeurs des variables communales ont été transcrites en niveaux de gris. La méthode repose sur l'analyse des contrastes entre les lieux par un calcul de gradient, le gradient morphologique. La ligne du plus fort contraste intra-régional donne l'emplacement de la discontinuité littoral-intérieur et de fait, la délimitation des deux sous-systèmes. Cette limite qui fluctue selon les variables et les dates, tend à progresser vers l'intérieur mais de façon très irrégulière.¹⁹ Ainsi, les images reproduites sur la figure 1, concernant le pourcentage d'actifs travaillant hors de la commune de résidence, révèlent une forte avancée de la limite le long de la basse vallée du Var, axe majeur de communication nord-sud situé aux portes de Nice. Cette digitation s'amplifie considérablement entre les deux dates alors qu'à l'ouest, où les vallées sont plus étroites, la limite reste bloquée sur les Préalpes de Grasse et ne varie guère. Si la dichotomie littoral-intérieur perdure, des interactions nouvelles existent désormais entre les sous-systèmes. L'arrière-pays n'est plus homogène. Par le développement des axes de communication et les espaces disponibles, le proche arrière-pays niçois est devenu très attractif. Il tend à s'intégrer de plus en plus au sous-ensemble littoral dont la conurbation niçoise est le moteur.

¹⁷ VOIRON-CANICIO Ch. (1992) *Espace, structures et dynamiques régionales : l'arc méditerranéen*, Thèse d'Etat, Université de Nice – Sophia Antipolis

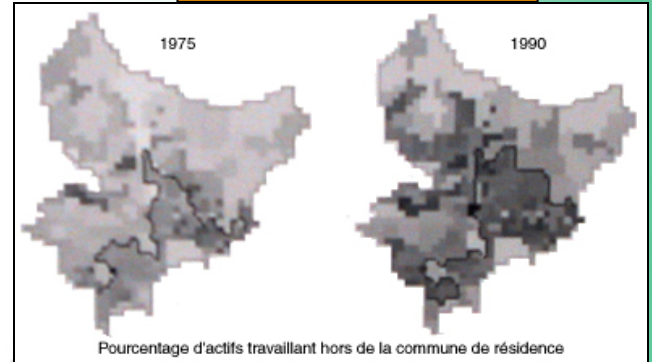
¹⁸ VOIRON-CANICIO Ch. (1995). *Analyse spatiale et analyse d'images*, Collection espaces modes d'emploi, GIP RECLUS, Montpellier.

¹⁹ VOIRON-CANICIO Ch. (1999). *Urbanisation et littoralisation sur les rives de la Méditerranée*, in *Les Méditerranées dans le monde*, Cahiers scientifiques de l'Université d'Artois, Artois Presses Université.

analyse spatiale



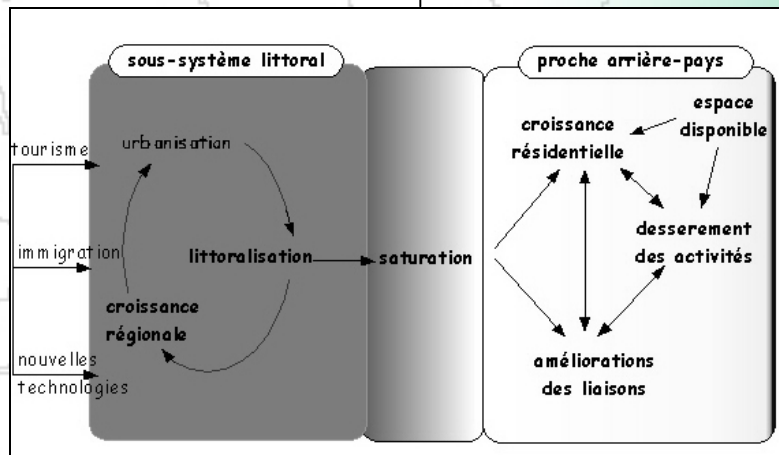
analyse morphologique



diffusion spatio-temporelle de la population

évolution des limites des sous-systèmes spatiaux

fonctionnement des systèmes territoriaux et recomposition territoriale



graphe systémique

Fig. 1 : Le couplage de l'analyse spatiale et de l'approche systémique

En mettant en évidence les facteurs qui induisent des différenciations dans la dynamique globale littoral-intérieur, ces analyses morphologiques permettent de visualiser les recompositions territoriales en cours et contribuent ainsi à la construction du graphe causal.

2.2. Modélisation du système transfrontalier jurassien

Dans le cadre du fonctionnement de l'espace frontalier jurassien franco-suisse, la différence des conjonctures économiques locales affecte les espaces au voisinage de la frontière et illustre une « intégration » fonctionnelle partielle, par l'intensité des flux de frontaliers et ses répercussions territoriales. L'espace frontalier jurassien est confronté à certaines contraintes qui posent le problème de l'émergence d'une zone fonctionnelle transfrontalière unifiée :

- une séparation politique, juridique et administrative qui a un devenir incertain à moyen ou long terme ;
- une fragilité « structurelle » d'un espace rural de montagne, avec des difficultés de développement des voies de communications ;
- un fonctionnement transnational d'une partie non négligeable de l'emploi avec le phénomène des travailleurs frontaliers ;
- enfin, une variabilité temporelle forte avec des phases d'expansion ou de déclin relatifs des principaux secteurs économiques.

Le modèle qui a été développé s'appuie sur la considération que l'espace frontalier jurassien est un système spatial pour lequel les interactions entre populations et territoires peuvent être abordées en termes systémiques par le fonctionnement de plusieurs zones en relation, de part et d'autre de cette frontière. L'espace jurassien franco-suisse, évalué par les effets de la frontière, est un exemple de la dialectique de séparation et de contact qu'offre la frontière, avec des spécificités géographiques de moyenne montagne qui marquent sa dynamique. Il peut être considéré selon quatre cellules spatiales fonctionnelles qui le différencient par les éléments qui illustrent sa fonction d'échange. On peut distinguer parmi ces derniers les voies de communication et le travail frontalier. Celui-ci se distribue en partie selon les caractéristiques de l'accessibilité entre lieux de domicile et lieux de travail. Par hypothèse, la structure de chacune des quatre cellules est considérée comme équivalente à celle du système. Seules changent les valeurs localisées des éléments de la structure. Le phénomène frontalier s'établit pour sa plus grande part à moins de 20 km de cette frontière et les cantons français et districts suisses frontaliers forment ainsi des éléments qui s'agrègent en quatre cellules. La formalisation du modèle, selon les principes de la Dynamique des systèmes, avec les contraintes spatiales principales a été établie pour la cellule fonctionnelle transfrontalière Pontarlier-Yverdon, avec neuf zones en interactions. Les principales variables d'état qui décrivent le système sont : le nombre d'habitants, les logements occupés et vacants, les emplois dans les services induits et les emplois dans le secteur fondamental (figure 2B). Le travail frontalier est évalué grâce aux flux entre les zones françaises et suisses. Ces variables sont ainsi localisées dans chaque zone. Par ailleurs, la formalisation des flux entre zones s'appuie sur un modèle gravitaire qui intègre l'accessibilité des zones et le différentiel né des effets de la frontière traduisant ainsi une attractivité spatiale (figure 2B).

Sept scénarii ont permis d'évaluer la portée du modèle : un scénario de référence, construit à partir d'un comportement tendanciel des variables d'état, trois scénarii de fluctuation des contraintes socio-économiques, un scénario qui corrige la matrice des distances en la pondérant à la densité de population communale, et un dernier scénario place le modèle dans les conditions initiales de la cellule transfrontalière voisine entre Morteau et

La Chaux-de-Fonds. On constate, à travers les simulations, que ces interactions formalisées simplement produisent une complexité forte²⁰.

Le modèle gravitaire intégré et les contraintes d'attractivités relatives entre les zones françaises et suisses ont permis de donner aux caractéristiques de l'espace un rôle plus actif qu'auparavant dans ce type de modélisation en Dynamique des Systèmes. La lecture du modèle est simplifiée, offrant alors une relative conservation des principes de globalité qui structurent les éléments du modèle en interaction.

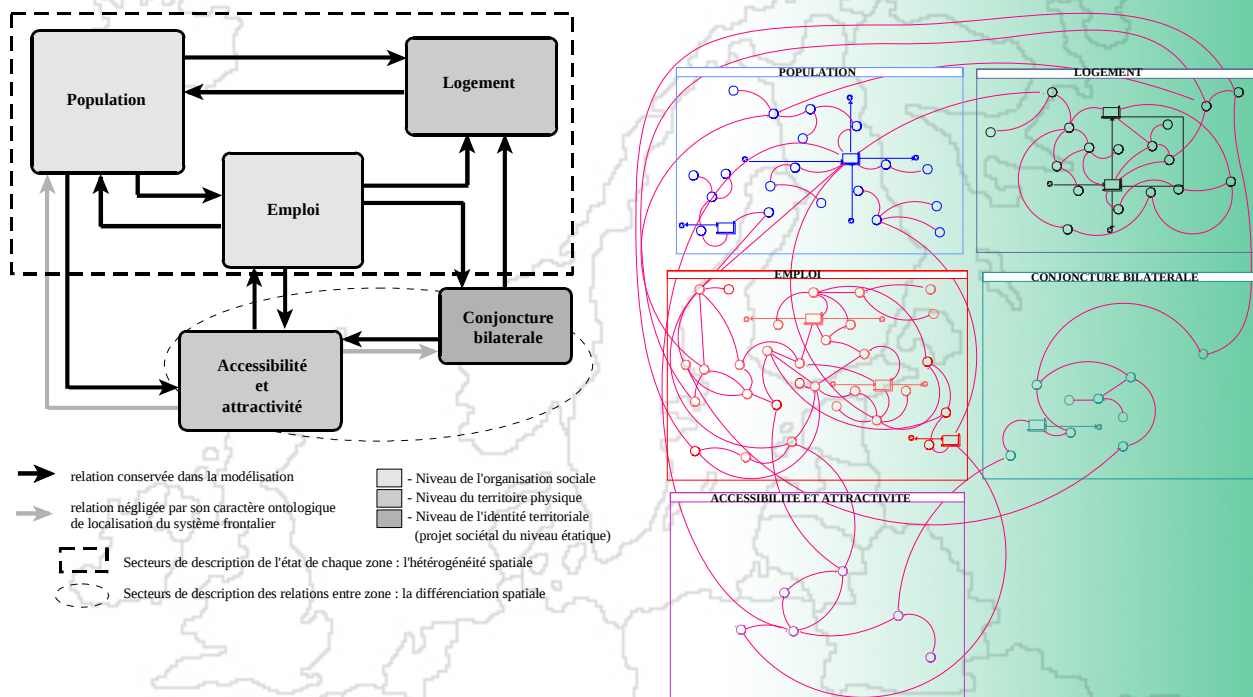


Fig. 2A. : Le graphe causal général et son implémentation dans Stella

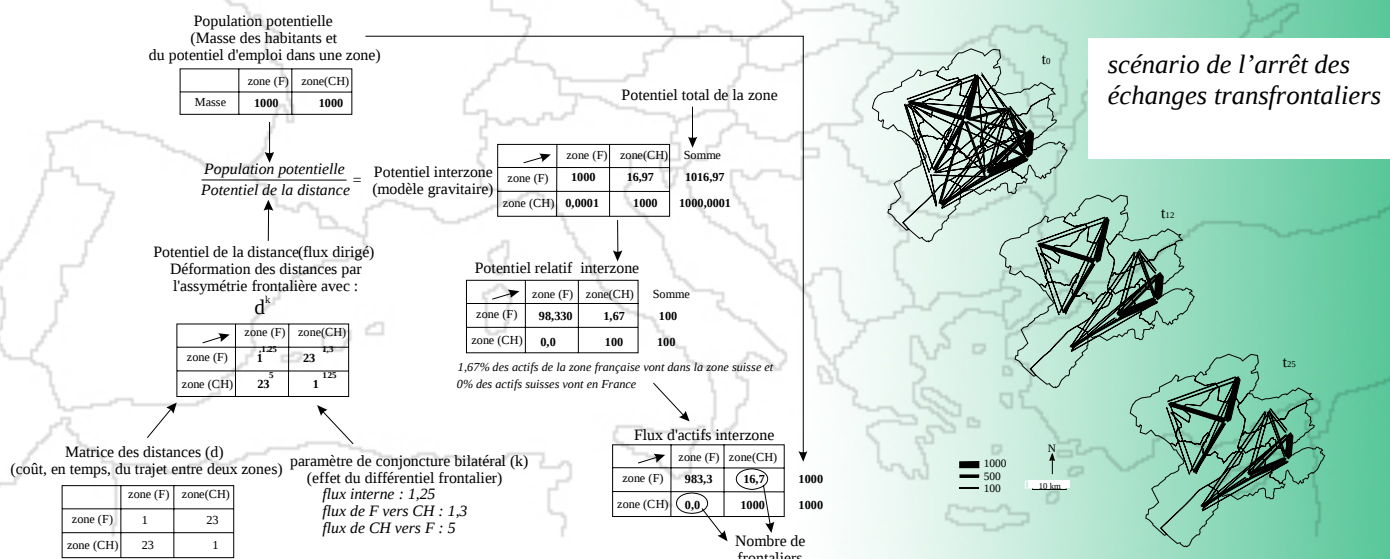


Fig. 2B : Utilisation d'un modèle de potentiel gravitaire pour l'évaluation des flux de travailleurs frontaliers et exemple de cartographie des résultats de simulation sur les flux de travailleurs

²⁰ CHERY J-P. (2002). Pour contribuer à l'explication de la complexité spatiale : l'étude des boucles de rétroaction dans la modélisation systémique, Actes du colloque Géopoint 2000, L'explication en Géographie, Avignon, Groupe Dupont, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, pp. 291-296.

Discussion - Conclusion

En posant que l'espace géographique est organisé et organisant, on constate la difficulté de prendre en considération les attributs de l'espace dans la structure d'un modèle développé en Dynamique des Systèmes, plus à même d'intégrer les contraintes de dynamique temporelle des systèmes. La tendance générale de l'intégration des caractéristiques spatiales d'un système est d'établir une discrétisation du système en sous-systèmes localisés, possédant des relations caractérisées par des attributs de voisinage ou de distance. Le maillage spatial *a priori* est la forme la plus courante de cette discrétisation. Mais l'on reste dans une acception limitée de l'espace géographique, qui constitue un support plus ou moins détaillé de sous-systèmes à structures redondantes. C'est l'approche topologique ou euclidienne de l'espace qui est ainsi privilégiée, celui-ci devient organisant, il participe à la structure du système. Cependant, l'espace géographique est aussi organisé, c'est à dire qu'il subit des changements. Les caractéristiques liées à la distance ou au voisinage sont bien, du point de vue géographique, non seulement structurelles mais également fonctionnelles. On peut ainsi dire que certaines positions se définissent par leur distance relative (exemple du modèle gravitaire) mais également, du point de vue géographique, que les distances se définissent par les lieux reliés : la différenciation spatiale structure des distances-temps, des distances-coûts, que l'on représente par exemple par des anamorphoses.

L'analyse spatiale permet de décrire les caractéristiques de l'espace géographique, tant du point de vue de sa structure que de ses dynamiques. Il semble donc qu'un enjeu important de la prise en compte des systèmes spatialisés sociaux et environnementaux en Dynamique des Systèmes passe par une intégration des connaissances produites par l'analyse spatiale. Cette intégration dépasse la simple discrétisation de l'espace, qui introduit une dimension stochastique au modèle et pose des problèmes d'interprétation liées aux conditions spatiales initiales, comme on peut le rencontrer avec les automates cellulaires ou les Systèmes Multi-Agents (SMA). L'enjeu est nomothétique : il porte sur la définition de règles spatiales qui interviennent dans le jeu des relations d'un système complexe social ou environnemental. Certaines plate-formes logicielles de modélisation intègrent de mieux en mieux des structures récurrentes telle la reproduction (réservoir d'individus lié à un flux d'entrée de naissances et un flux de sortie de décès) et des bibliothèques de structures partielles intégrables dans les modèles voient le jour. L'approche géographique de l'espace est ainsi interpellée pour construire et proposer des modes d'expression des caractéristiques spatiales des systèmes²¹. L'élaboration d'environnements informatiques adaptés à l'analyse spatiale et offrant des schémas conceptuels et des modèles de représentation adaptés à l'étude des systèmes spatiaux apparaît une piste intéressante pour un couplage aux plate-formes de modélisation en Dynamique des Systèmes.

²¹ CHERY J-P., SMEKTALA G., (Nov.-Déc..2004), *D'un modèle chorématique à un modèle de simulation : gestion des ressources ligneuses en zone soudano-sahélienne*, pp. 528-538, Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures, n°13, vol. 6 (Paris).