

# L'intérêt du couplage d'outils de modélisation en analyse spatiale

**Decoupigny F. Université Nice - Sophia Antipolis,  
UMR ESPACE 6012,98, bd Edouard Herriot, BP 3209  
- 06204 Nice cedex**

**Tel / fax : 04 93 37 54 64, decoupig@unice.fr**

L'ordinateur semble de plus en plus bousculer les travaux de géographie ces dernières années. L'outil informatique nous a permis non seulement d'analyser spatialement des bases de données géoréférencées (logiciels de statistiques et SIG) mais aussi de construire des modèles qui participent aux processus d'acquisition de connaissance. De nouvelles pistes de recherche émergent, elles concernent, en particulier, l'intégration des outils mathématiques dans les modèles d'analyse spatiale.

Or en géographie, les principales problématiques tournent autour de la définition de processus multiscalaires tant spatiaux que temporels. L'utilisation d'un seul type d'outil mathématique peut limiter la capacité d'un modèle à rendre intelligible une situation. Nous pensons que la construction d'un modèle, qui associerait plusieurs types d'outils mathématiques, représente pour la géographie de demain un terrain d'expérimentation intéressant.

Ce type de modélisation pose un certain nombre de problèmes méthodologiques tels que la gestion du passage d'un type d'outil à l'autre et la gestion des échelles qui en résulte : représentation de l'espace (discret ou continu), intégration de processus (micro et macro) sur des échelles différenciées.

A partir d'un exemple de modélisation, nous analyserons les opportunités de recherche que nous avons, dans une modélisation en analyse spatiale, à développer le couplage de deux modèles qui utilisent des outils mathématiques différents. Pour cela, nous montrerons qu'un processus de déplacements peut être appréhendé à partir d'un modèle de simulation qui associe deux types d'outil ; le premier construit sur les bases d'un automate cellulaire qui va modéliser les accès pédestres aux modes de transport motorisés et le second un modèle gravitaire d'interactions sur un graphe qui va rendre compte des déplacements motorisés sur un réseau routier

Un modèle de simulation est bâti à partir d'un ou plusieurs outils mathématiques. Le type d'outil que l'on utilise est fortement dépendant du type de processus, des variables (quantitatives ou qualitatives) que l'on veut modéliser et de la manière dont on va prendre en compte l'espace, soit de manière continue (raster ou surfacique) ou discrète (vectoriel, graphe). En résumé, quel type de processus et sur quel type d'espace ?

Il est toujours difficile de classer les méthodes de modélisation car celles-ci dépendent en grande partie non seulement des processus que l'on étudie mais aussi des objets pris en compte. En matière de modélisation en

géographie, on assiste souvent au développement de méthodes qui ne se fondent que sur l'utilisation d'un outil mathématique qui va servir de base au modèle : modèle dynamique construit sur équations différentielles, modèles logistiques pour expliquer des processus comportementaux désagrégés, SMA pour analyser des phénomènes de diffusion et de colonisation d'espaces, modèles gravitaires sur graphes pour modéliser des interactions...

Prenons quatre types d'outils mathématiques couramment utilisés en modélisation en géographie, les automates cellulaires qui servent de bases aux SMA, les modèles probabilistes de régression afin d'expliquer des comportements de choix discrets de type Logit/ Probit, les équations différentielles pour modéliser des processus dynamiques de croissances urbaines et les modèles gravitaires largement utilisés pour calculer des interactions sur un réseau. Ces différents outils vont donner naissance, en fonction de leur utilisation, à différentes grandes familles de modèles (Durand Dastes) : agrégés ou désagrégés, dynamiques ou statiques, explicatifs ou descriptifs, déterministes ou probabilistes.

Dans tous les cas, le choix du modèle en géographie est, en grande partie, lié à la représentation et à l'intégration de l'espace dans le modèle (Brunet, Dauphiné). Si on admet que l'espace est constitué par une répartition d'objet sur une surface ce qui implique une métrique (unité), une topologie (relations) et une morphologie (formes) on peut alors supposer qu'il existe trois manières d'intégrer l'espace dans un modèle en fonction de l'outil mathématique que l'on va choisir pour le formaliser.

1 - L'espace est seulement défini par une distance. On suppose alors qu'il n'y a que la métrique. L'espace n'est, dans ce cas, qu'un catalyseur. Il ne fait que faciliter le processus mais n'intervient pas comme une variable d'état. On retrouve dans cette catégorie, les modèles classiques d'économie spatiale qui intègrent la distance comme un simple paramètre.

2 - L'espace est traduit par un réseau de relations qui le considère comme discontinu. L'espace apparaît sous forme de réseau et va permettre d'analyser l'impact d'une variation des interactions en fonction de relations qui dépendent de la topologie et de la morphologie du graphe (modèles d'interactions sur graphe)

3 - L'espace est un continuum de contraintes qui traduit des relations de proximité. L'espace est surfacique et est décomposé en unité de surface (cellules, pixels, polygones). L'objectif de l'analyse est de faire émerger des formes en fonction de comportements préétablis et de définir des comportements types à partir de processus de diffusion plus ou moins percolants (Système Multi Agent).

Le choix du modèle de représentation de l'espace postule des hypothèses très fortes puisque chaque outil mathématique possède des propriétés et des conditions initiales qui permettent de mettre en évidence des phénomènes qui leur sont propres. Si on prend les

modèles d'interactions utilisant la théorie des graphes alors on admet une prédominance de l'espace réseau et de la distance sur les fonctions d'interactions et de comportements. Par contre, si le processus est analysé en fonction d'un SMA ou d'un automate cellulaire classique, on admet alors que les processus de diffusion sont liés aux propriétés de percolation et par conséquent aux phénomènes de seuil (capacité de charges).

Bien sur l'utilisation de l'outil mathématique qui va servir de base aux modèles est prédéterminée par le type de processus que l'on va modéliser. Pour cela, nous sommes obligés de tenir compte de deux facteurs : quel est le mode de représentation de l'espace (discret ou continu) et quelles sont les échelles prises en compte (micro et/ ou macro) ? C'est ici qu'intervient le problème complexe d'intégration des processus multi échelles et de la dualité de l'espace (surface et réseau) dans un même modèle.

La complexité en géographie dépend aussi de la sensibilité des interactions réciproques entre des processus macro et micro. Or les processus qui s'inscrivent sur des échelles différentes sont difficilement modélisables avec le même outil mathématique. Où si c'est le cas, cela nécessite de tels changements dans les conditions initiales qu'il est nécessaire de construire deux modules distincts, c'est-à-dire un module pour chaque échelle considérée.

De plus, si une modélisation doit prendre en compte deux processus sur des échelles différentes, cela nécessite d'intégrer des variables qui n'auront pas le même niveau d'agrégation ; les phénomènes à petites échelles sont généralement formalisés par des modèles agrégés quant à ceux sur une grande échelle sont désagrégés, dès lors les outils mathématiques utilisés sont souvent fondamentalement différents.

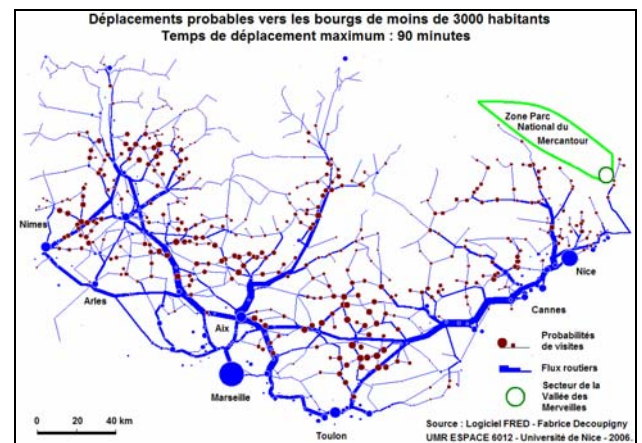
Dans ces conditions, le couplage d'outils de modélisation est nécessaire pour construire un modèle susceptible d'intégrer plusieurs échelles. Un des cas les plus intéressants est l'analyse et la modélisation des déplacements pour aller d'un point origine à un point de destination. Un déplacement est rarement uni modal, la plupart du temps le mode motorisé est précédé et suivi par le mode pédestre. Un déplacement est donc une séquence qui associe différents modes de transport sur des échelles et des types d'espaces bien différenciés (Chapelon). Pour les modes motorisés, l'échelle est kilométrique et l'espace est modélisé par un graphe. Pour le mode pédestre l'ordre de grandeur de l'échelle est métrique et l'espace est continu.

Afin de bien montrer l'enjeu qu'il existe en géographie à utiliser des couplages d'outils de modélisation, nous allons décrire la méthodologie d'utilisation d'un modèle de déplacements vers des espaces de loisirs (logiciel FRED, Decouigny) qui intègre plusieurs niveaux d'organisation de déplacements : le déplacement motorisé et le déplacement pédestre.

On suppose que tout déplacement se décompose en deux déplacements (Lew, Decouigny) : le déplacement

motorisé (domicile / site) et le déplacement pédestre de visite sur le site. Le modèle se décompose en deux modules de calculs distincts et reprend les deux étapes d'un déplacement de loisir. Le modèle est constitué par une suite logique d'outils qui va intégrer tous les éléments du déplacement (motorisé et pédestre) et va ouvrir sur une séquence de calculs utilisant des outils mathématiques différenciés.

Le premier est classique, il calcule les probabilités de répartition sur un territoire des visites possibles à partir des principales agglomérations. C'est un modèle gravitaire qui utilise le réseau routier comme un espace de relations (Logiciel FRED). A partir de calculs d'attractivité, le modèle va affecter pour tous les sites de loisirs une probabilité du nombre de visiteurs au départ des villes sous contraintes d'un temps maximum de déplacement.



**Figure 1 : Déplacements et de répartition sur les sites de la région PACA si le déplacement est inférieur à 90 minutes**

Dans un second temps, nous modélisons les déplacements pédestres autour des points d'accès au milieu naturel (parkings). La modélisation des déplacements pédestres consiste à créer un automate cellulaire pour simuler les cheminements pédestres sur un graphe sous contrainte de pénibilité liée aux conditions géomorphologiques (pente).

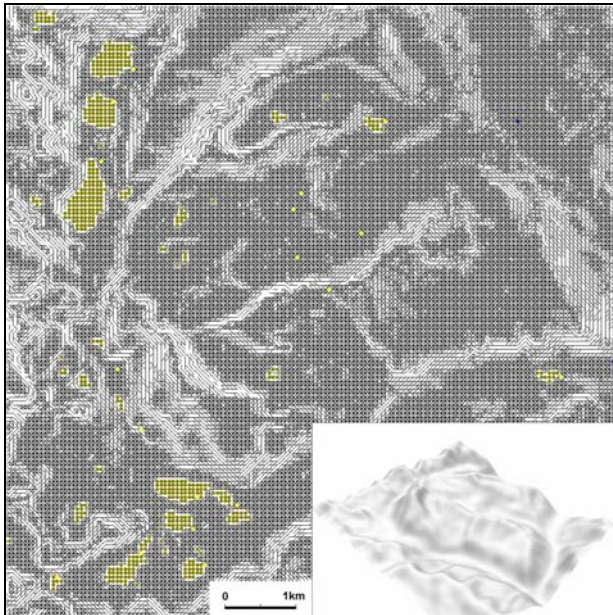
On crée un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sur lequel on définit un espace praticable formé de nœuds accessibles ou pas, en fonction de la pente et des caractéristiques géomorphologiques (falaises, étendues d'eau...), on obtient un premier graphe qui représente l'espace praticable (figure 2).

Ensuite nous calculons par un automate cellulaire tous les chemins pouvant exister entre les parkings et les points remarquables de notre milieu naturel qui sont potentiellement des points de visites (curiosités naturelles, sommets, lacs, cols...) en fonction d'une double contrainte : la distance et la pénibilité de la pente. On obtient ainsi un graphe potentiel de cheminements possibles, appelé le graphe sentier (figure 3).

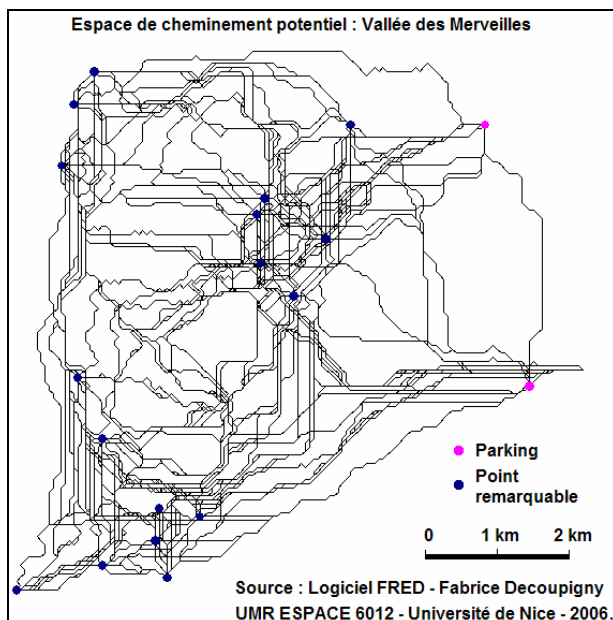
Le graphe sentier va servir de base pour calculer les déplacements des visiteurs et leurs impacts sur le milieu

naturel. Nous allons appliquer l'algorithme "Floyd" de recherche des chemins minimaux (Mathis).

L'objectif du calcul des chemins optimaux sur le graphe sentier consiste à calculer les déplacements origine-destination entre les différents parkings et points remarquables et de distinguer les arcs susceptibles d'être les plus utilisés pour se rendre d'un nœud à un autre sous contrainte de minimisation de la distance parcourue.



**Figure 2 : Graphe de l'espace praticable de la Vallée des Merveilles Parc national du Mercantour**



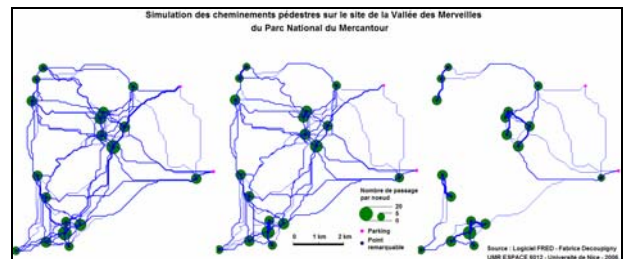
**Figure 3 : Graphe potentiel des cheminements sur la Vallée des merveilles**

Ensuite, à partir d'un temps de déplacement maximum, on va calculer le nombre de fois qu'un arc du graphe sentier est utilisé lors d'un déplacement qui a pour origine un parking et pour destination un point

remarquable (curiosités naturelles, lacs, sommets, cols, sites naturels).

Le déplacement est pris en compte si et seulement si les points remarquables peuvent être atteints dans un temps imparti. Les impacts des cheminements seront donnés par les fréquences d'utilisation des arcs sur le graphe chaque fois qu'il y a déplacement d'un point à un autre. Les probabilités de fixation sur les parkings sont intégrées sous la forme d'une masse de flux pédestres entrant par un parking. On obtient ainsi, le graphe de déplacement sur le milieu naturel en fonction d'un temps maximum de promenade.

La dernière étape de la modélisation consiste à affiner le graphe. Chaque fois qu'un cheminement, entre un noeud origine et destination, passe à proximité d'un point remarquable (à moins de 100, 500 ou 1000m...), celui-ci peut subir une déviation et intégrer ce dernier dans son cheminement. Dès lors, le graphe des déplacements est épuré car un certain nombre de déplacements, allant d'un point à l'autre, passera par des points remarquables intermédiaires. La figure ci-dessous montre des résultats de simulations de cheminements si les temps de déplacements n'excèdent pas 120 minutes d'un parking à tous points remarquables et de 60 minutes entre les points remarquables ce qui correspond à une randonnée de six à huit heures dans une journée.



**Figure 4 : Simulation des cheminements pédestres sur les espaces naturels de la Vallée des Merveilles au départ des parkings**

Le premier graphe correspond aux déplacements sans déviation, les deux suivants à des déplacements susceptibles d'être déviés s'ils passent à proximité de points remarquables (respectivement dans un rayon de 500m et 1000m). A partir des résultats obtenus et en fonction des hypothèses de comportements de promenade, il nous est alors possible d'avoir une analyse prospective sur les pressions potentielles de la fréquentation anthropique sur un milieu naturel.

Le modèle peut aussi être utilisé pour appréhender les déplacements en milieu urbain lorsque l'on décide d'analyser un tracé d'une ligne en transport en commun dans une agglomération ou la localisation d'un parking...

De plus en plus on demande aux modèles d'analyse spatiale d'avoir la capacité d'être prospectifs sur le territoire, c'est-à-dire d'analyser le comportement d'un processus donné sur des espaces émergents et réciproquement l'inverse (par exemple les impacts des réseaux de transport sur l'étalement urbain, et ensuite les impacts de la croissance urbaine sur les réseaux...).

Méthodologiquement, cela nécessite de mettre au point des modèles qui utilisent différents outils de modélisation structurés en séquence de calculs, qui vont tour à tour créer de l'information et se nourrir de cette dernière.

Dans notre exemple de modélisation, l'automate cellulaire fait émerger un espace de cheminements potentiels de tous points vers tous points sur lequel nous appliquons un calcul d'optimisation de déplacement. L'avantage d'utiliser un outil mathématique issu de l'intelligence artificielle que sont les automates cellulaires est la capacité de ces modèles à créer de l'information. Ceci se traduit, dans notre cas, à faire émerger des formes : un réseau potentiel de cheminements. Mais cela peut aussi être l'apprentissage d'un comportement, lorsque l'on construit un SMA, ou bien la création de formes lorsque l'on utilise un générateur fractal pour définir un espace de diffusion. Le grand avantage de ce type de modèles est d'introduire de la complexité dans les postulats et les hypothèses qui fondent le modèle et de le transformer en un outil expérimental de mesure des impacts de l'émergence d'une information sur un espace.

#### Bibliographie :

Borgers A., Kemperman A., Timermanns H., 2006, Pedestrian behaviour in down town shopping areas : differentiating between hedonic and utilitarian shoppers, Urban Planning Group, Eindhoven University of Technologie.

Brunet R., 1980, La composition des modèles dans l'analyse spatiale, L'espace géographique, Tome IX, n°4. - pp 253 – 265.

Chapelon L., Jouvaud B., Ramora S., 2006, Pour un système intégré de pré et post acheminement des trafics ferroviaires grandes lignes, M@ppemonde, n°81 (1-2006).

Dauphiné A., 2003, Les théories de la complexité chez les géographes, Anthropos.

Decoupigny F., 2000, Accès et diffusion des visiteurs sur les espaces naturels. Modélisation et simulations prospectives, Thèse de doctorat Aménagement de l'espace et urbanisme. Tours : Laboratoire du CESA, 401 f.

Durand Dastes F., DURAND-DASTES (F.), 1992, Les modèles en géographie, pp 311-325, *in* Encyclopédie de géographie, sous la direction de Bailly A., Ferras R., Pumain D, Paris, Economica.

Lew A., McKercher B., Modelling tourist movements: a local analysis, Annals of Tourism Research, Vol 33, n°2, PP 403 – 423 – 2006.

Mathis Ph., 2003, Graphes et réseaux, modélisation multiniveau, ouvrage collectif sous la direction de Philippe Mathis, Traité IGAT, ed. Hermes.