HAL
open science

Dynamiques territoriales et système de la mobilité : un modèle bayésien pour la Côte d'Azur

Giovanni Fusco

To cite this version:

Giovanni Fusco. Dynamiques territoriales et système de la mobilité : un modèle bayésien pour la Côte d'Azur. 2006. hal-00130980

HAL Id: hal-00130980

https://hal.science/hal-00130980

Preprint submitted on 14 Feb 2007

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.

Dynamiques territoriales et système de la mobilité : un modèle bayésien pour la Côte d'Azur.

Giovanni Fusco
Université de Nice - Sophia Antipolis / CNRS
UMR ESPACE

Introduction

Le système de la mobilité accompagne les dynamiques urbaines et territoriales. L'offre d'infrastructures et de services de transport affecte lourdement les potentialités du développement des différents sous-espaces de la ville. Elle interagit avec les éléments de la structure urbaine et les caractéristiques socio-démographiques des habitants pour produire des comportements de mobilité, des manières de vivre l'espace urbain, des niveaux d'accessibilité, ainsi que des impacts environnementaux. Les dynamiques territoriales qui en résultent sont capables d'approcher où d'éloigner les villes contemporaines des objectifs d'un développement économiquement, socialement et écologiquement durable, objectifs désormais à la base des politiques urbaines en France comme en Europe (CE 1996). Les enjeux émergeants sont ceux des dynamiques combinées de la dépendance automobile et de l'étalement urbain, avec leurs lourdes conséquences en termes de consommation de sol, d'énergie et de ressources financières [Bussière et Bonnafous 1993, Newman et Kenworthy 1998, Wiel 1999, Camagni et al. 2002]. Dans le cas des espaces métropolitains méditerranéens, les impacts de ces dynamiques sont d'autant plus problématiques qu'ils ont lieu dans des milieux déjà fragilisés où l'espace est devenu une ressource rare (contraintes physiques souvent très marquées, héritage urbain ancien peu apte au système automobile, forte pression anthropique liée à l'urbanisation littorale, aux flux touristiques et logistiques, etc.). L'espace métropolitain azuréen est un très bon exemple de ces dynamiques et de ces contraintes. Dans le cadre d'une forte croissance démographique et urbaine, la périurbanisation et la dépendance automobile se présentent aujourd'hui comme des enjeux dans un espace aux limites de la saturation.

Ici, nous nous proposons d'analyser la relation ville-transports-environnement sur la Côte d'Azur à l'aide de la technique des réseaux bayésiens. L'aire d'étude est celle définie par l'Enquête Ménages sur la mobilité quotidienne de 1998 [CERTU-CETE Nord-Picardie 1998, CETE Méditerranée 1998, 1999]. Elle correspond à l'ensemble du littoral des Alpes-Maritimes et à son moyen-pays, un espace

fortement urbanisé (on parle également de "conurbation azuréenne") couvrant les deux aires urbaines INSEE 1999 de Nice et de Menton-Monaco, à l'exclusion de la Principauté (figure 1 et annexe A dans le cd rom). La complexité et l'étendue du domaine d'étude nous ont fait privilégier l'appréhension des phénomènes étudiés par le biais d'un nombre restreint d'indicateurs clés, quantitatifs ou qualitatifs. L'indicateur est un paramètre capable d'appréhender de façon synthétique des phénomènes plus complexes. On lui reconnaît la capacité à fournir une connaissance approximative sur le fonctionnement des systèmes réels [Meadows 1998, Pileri 2002]. Le caractère approximatif des connaissances apportées par les indicateurs impose aux modèles et aux analyses à base d'indicateurs la nécessité d'intégrer l'incertitude dans les relations entre les phénomènes étudiés.

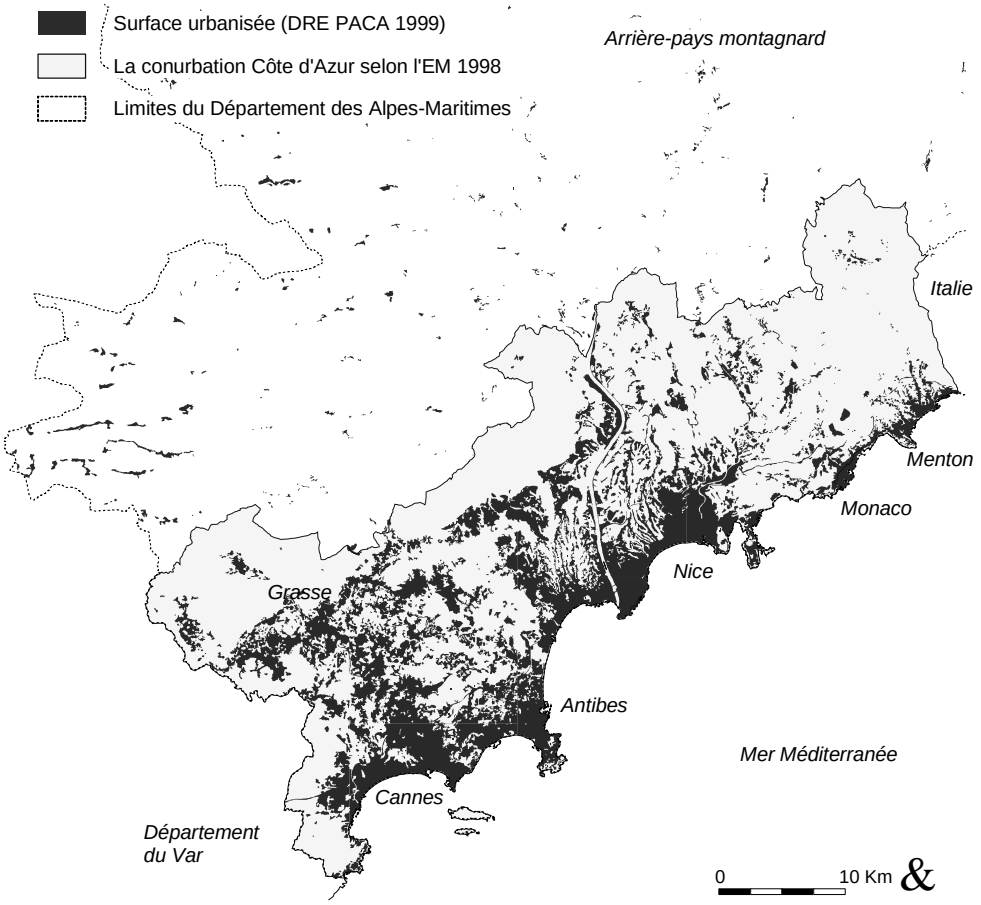

Figure 1 – La conurbation Côte-d'Azur selon l'Enquête Ménages 1998.

La technique des réseaux bayésiens répond aux contraintes de l'information à notre disposition. Se situant à l'intersection des statistiques multivariées et de l'intelligence artificielle, elle constitue un outil puissant de modélisation causale en domaine incertain [Pearl 2000, Jensen 2001], particulièrement apte à représenter le caractère incertain et "flou" des relations existantes entre indicateurs territoriaux. De ce fait, les réseaux bayésiens sont susceptibles d'apporter une contribution à la compréhension des dynamiques territoriales complexes, liées à la mobilité quotidienne et opérant dans l'espace urbain de la Côte d'Azur.

Dans cette contribution, après une brève introduction à la théorie des réseaux bayésiens, nous produirons d'abord un modèle de fonctionnement de la relation ville-transports-environnement sur la Côte d'Azur, sous la forme d'un réseau bayésien à base d'indicateurs. Puis, nous utiliserons le modèle établi pour la mise en évidence de dynamiques territoriales bien déterminées, caractérisant les différents sous-espaces de la conurbation azuréenne et constituant des enjeux pour la durabilité de son développement.

1 . Les réseaux bayésiens, outil de modélisation causale probabiliste

Le réseau bayésien est un modèle graphique (dans le sens de la théorie des graphes) de connaissance en probabilité. Graphiquement, il est constitué d'un ensemble d'évènements, ou variables, reliés par des flèches (figure 2). Une flèche orientée allant d'un évènement *A* à un événement *B* peut être utilisée pour symboliser un lien de cause-à-effet. Il peut s'agir d'une causalité stricte (*A* est une cause nécessaire et suffisante de *B)* ou d'un type de dépendance causale moins contraignante (*A* influence de façon générale *B*). Selon la terminologie des graphes, *A* est un nœud parent de *B* et *B* est un nœud enfant de *A*. Finalement, dans la figure 2, *A* est la seule variable indépendante du réseau.

Couplant ainsi le formalisme des graphes causaux à celui des équations probabilistes, les réseaux bayésiens sont un instrument apte à représenter un modèle de dépendance causale entre variables stochastiques [Pearl 2000]. L'utilisation des graphes orientés permet d'appréhender l'asymétrie fondamentale introduite par l'existence de relations causales dans les phénomènes observés. Par rapport à une simple matrice des corrélations, le résultat est un modèle beaucoup plus simplifié, mais également beaucoup plus puissant.

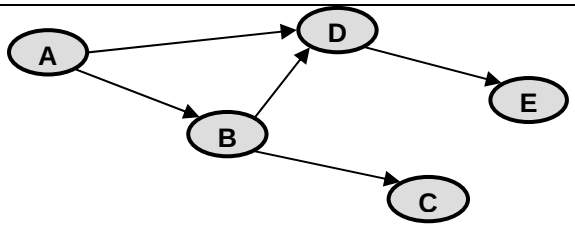

Figure 2 – La structure d'un simple réseau bayésien constitué de cinq variables

On appelle "structure" du réseau bayésien, l'ensemble des relations causales qui relient ses variables (les arcs orientés). La théorie des probabilités permet d'associer à chaque nœud enfant du graphe des fonctions de probabilité conditionnelle à la connaissance de ses nœuds parents. L'ensemble des distributions de probabilités non conditionnées (pour les variables indépendantes) et des distributions de probabilités conditionnelles (pour les variables dépendantes) constituent les "paramètres" du réseau. La plus grande partie des algorithmes de calcul de réseaux bayésiens opèrent sur des variables discrètes. L'information probabiliste associée au graphe se réduit dans ce cas à des vecteurs de probabilités pour les nœuds indépendants et à des tables de probabilité conditionnelles pour les nœuds enfants. Une table de probabilités conditionnelles fournit, pour les valeurs du nœud enfant, un vecteur de probabilité différent pour chaque combinaison possible des valeurs des variables parents. Dans la Figure 3, nous montrons la table des probabilités des valeurs du nœud enfant *B* par rapport aux valeurs de son nœud parent *A*. Cette table quantifie en probabilité la dépendance causale montrée de façon qualitative dans la Figure 2. La table doit être lue en ligne : si, par exemple, la variable *A* est comprise entre 1 et 8, alors la variable *B* assumera une valeur comprise entre 10 et 20 avec probabilité 0.90, comprise entre 20 et 40 avec probabilité 0.08 et comprise entre 12 et 20 avec probabilité 0.02.

VARIABLE B			
Variable A	[10 20)	[20 40)	[40 60]
[1 8)	0.90	0.08	0.02
[8 12)	0.10	0.50	0.40
[12 20]	0.02	0.18	0.80

Figure 3 – Table des probabilités conditionnelles de la variable B

L'une des utilisations les plus intéressantes des réseaux bayésiens est celle de la *knowledge discovery*, c'est-à-dire de la recherche automatique des liens systémiques entre les variables d'une base de données. À partir d'un ensemble de variables observées sur un certain nombre d'individus, même en l'absence d'information temporelle, de puissants algorithmes de génération de réseaux

bayésiens permettent de déduire en probabilité des liens de cause-à-effet entre les variables, produisant ainsi des modèles causaux pour les phénomènes étudiés. Pearl et Russell (2000) soulignent que les structures causales réelles ont normalement une stabilité de comportement qui fait qu'elles produisent des ensembles de données qui, tout en étant dépourvus d'information temporelle, sont compatibles avec certaines asymétries dans les relations entre les données et pas avec d'autres. Mises ensemble de façon systématique, ces asymétries peuvent être utilisées pour inférer, à partir des données, les structures causales originelles et pour garantir que toute autre structure alternative compatible avec les données soit moins stable de celle (ou celles) inférée(s). Cette tache peut être accomplie, en probabilité, par les algorithmes d'apprentissage bayésien. Les algorithmes les plus complets peuvent apprendre, et ainsi reproduire, tant la structure que les paramètres du réseau [Becker et Naïm 1999].

2 . Les éléments de la modélisation

Afin de développer un modèle bayésien du système de la mobilité urbaine sur la Côte d'Azur et de ses relations avec la ville et l'environnement, nous avons sélectionné trente et un indicateurs (tableau 1) permettant d'appréhender les principaux éléments de cette relation à l'échelle intra-urbaine. Les indicateurs sont structurés selon six aspects fondamentaux de l'interaction ville-transports-environnement : la structure urbaine, les facteurs socio-économiques, l'offre de transport, la demande de mobilité, les flux de trafic produits et, enfin, la performance du système des transports en termes de pressions et qualité de vie. Les indicateurs ont été chiffrés pour les soixante-seize zones de l'Enquête Ménages 1998 (annexe B), négligeant la Principauté de Monaco pour laquelle les données nécessaires n'étaient souvent pas disponibles.

Plusieurs indicateurs sont issus directement des résultats de l'Enquête Ménage 1998, d'autres ont été calculés à partir des données de l'enquête ou de la cartographie numérique de la zone d'étude (DRE PACA 1999) par des algorithmes développés dans l'environnement de travail de MF Works® [ThinkSpace 2001]. Tous les indicateurs sont donc évalués pour la période 1998-99. L'époque principale de l'urbanisation et la caractérisation du site sont des indicateurs de type qualitatif, évalués à partir de la représentation cartographique de la zone d'étude et de la connaissance du terrain.

La description des pressions environnementales et socio-économiques des transports et de la qualité de vie qui en résulte reste relativement limitée. Faute de données désagrégées à l'échelle des 76 zones, les pressions se limitent à la prise en compte de la consommation de temps (la durée des déplacements motorisés et le budget-temps journalier moyen des habitants pour les déplacements) et de la

consommation énergétique. La qualité de vie est réduite aux niveaux d'accessibilité produits par les réseaux de transports et néglige la qualité environnementale des différentes zones urbaines (pollution de l'air, pollution sonore, sécurité routière). De même, la prise en compte de l'offre de transport se limite à la desserte par les réseaux de transports rapides (réseau ferré, autoroutes urbaines) et à l'équipement des ménages. En revanche, les descriptions des caractéristiques d'urbanisme, des facteurs socio-économiques et de la demande de mobilité sont relativement détaillées. La structure spatiale de la demande de mobilité, par exemple, est appréhendée par la longueur moyenne du déplacement, mais également par l'indice de fermeture/ouverture de la zone (défini comme le poids des déplacements des résidents dans les déplacements vers la zone) et par l'indice d'autonomie (défini comme le pourcentage des déplacements des résidents ayant comme destination l'intérieur de la zone).

Libellé	Indicateur	Unité de mesure
Structure urbaine		
site	caractéristiques topographiques du site de l'urbanisation	littoral - vallée - colline
distance_centre	distance à vol d'oiseau du centre-ville	Km
époque_urb	époque principale de l'urbanisation (a : avant-guerre; b : jusqu'aux années 70; c : des années 70 à présent)	a - b - c
habitat_ind	pourcentage de ménages vivant en habitat de type individuel	%
densité	densité nette de population (habitants / surface urbanisée)	habitants / ha
taux_emploi	taux d'emploi (rapport emplois / population résidente)	emplois / habitants
Facteurs socio-économiques		
revenus_men	revenus moyens des ménages	milliers € / ménage / an
ménages	taille moyenne des ménages	personnes / ménage
vieillesse	taux de vieillesse (population de 65 ans et plus / population 0-14 ans)	adimensionnel
actifs_étude	poids des actifs, des étudiants et des écoliers dans la population résidente	%
Offre de transport		
voirie_rapide	distance (à vol d'oiseau) du barycentre de la surface urbanisée à l'échangeur routier le plus proche	Km
réseau_ferré	distance (à vol d'oiseau) du barycentre de la surface urbanisée à la gare ou l'arrêt le plus proche	Km
motorisation_m	voitures par ménage	véhicules / ménage
park_privé	pourcentage des véhicules des ménages disposant	%

	d'une place de stationnement privée la nuit	
Demande de mobilité		
mobilité	demande totale de mobilité par habitant dans un jour ouvrable	déplacements / hab / jour
part_Doux	part de la marche et du vélo dans la mobilité totale	%
part_MP	part des modes motorisés privés dans la mobilité totale	%
part_TC	part des transports en commun dans la mobilité totale	%
part_syst	part des déplacements systématiques (motifs travail ou études) sur l'ensemble des déplacements (sauf rentrées au domicile)	%
autonomie	Indice d'autonomie : part des déplacements des résidents ayant destination à l'intérieur de la zone (sauf rentrées au domicile)	%
fermeture	Indice de fermeture : part des résidents dans les déplacements vers la zone	%
longueur	longueur moyenne des déplacements (internes à l'aire d'étude)	Km
Flux de trafic		
passKm_motor	distance parcourue quotidiennement dans les modes motorisés	passagers Km / hab / jour
part_TC_passKm	part des transports en commun dans les distances parcourues dans les modes motorisés	%
flux_trafic	flux de trafic de véhicules privés généré quotidiennement par habitant	véhicules Km / hab / jour
vitesse_route	vitesse moyenne du réseau routier dans un jour ouvrable	Km/h
Pressions et qualité de vie		
énergie	consommation quotidienne d'énergie pour les véhicules privés	MJ / habitant / jour
durée_dépl_mot	durée moyenne d'un déplacement motorisé	minutes
budget_temps	budget-temps journalier individuel pour les déplacements	minutes
accessibilité_TC	accessibilité aux emplois par les transports en commun	milliers emplois < 30 min
accessibilité_MP	accessibilité aux emplois par le réseau routier	milliers emplois < 30 min

Tableau 1 - Les 31 indicateurs à la base du modèle bayésien.

À l'échelle intra-urbaine, il est intéressant d'analyser les différenciations socio-démographiques dans l'espace. À côté des deux indicateurs classiques (la taille moyenne des ménages et l'indice de vieillesse de la population), nous avons

considéré, pour chaque zone urbaine, le revenu moyen du ménage, et le poids des actifs, des étudiants et des écoliers dans la population résidente.

En matière de structure urbaine, nous avons pu inclure dans l'étude le taux d'emploi (le rapport entre les emplois de la zone et sa population résidente). Il s'agit d'un indicateur fondamental dans l'analyse intra-urbaine [Merlin 1991]. L'espace métropolitain azuréen possède dans l'hypercentre de Nice son principal pole de centralité. Cet hypercentre fonctionnel est conventionnellement identifié par la Place Masséna, au milieu du centre-ville de Nice. Nous avons ainsi inclus, en tant qu'indicateur de la position de chaque zone, la distance du barycentre de la surface urbanisée de chaque zone à ce centre.

Le logiciel utilisé pour la génération et l'analyse du réseau bayésien de la relation ville-transports-environnement sur la Côte d'Azur est *Discoverer* de *Bayesware* (2000). *Discoverer* utilise uniquement des variables discrètes et permet de discrétiser les variables continues soit par des intervalles d'amplitude égale, soit par des intervalles d'effectifs approximativement égaux. Compte tenu du faible nombre d'individus dans notre base de données urbaines (les 76 zones), nous avons toujours effectué une discrétisation en trois seules classes d'effectifs égaux.

L'algorithme utilisé par *Discoverer* pour la génération des réseaux bayésiens est *K2*, mis au point par G. Cooper au début des années 90 [Cooper et Hersovits 1992]. *Discoverer* exploite cet algorithme par différentes stratégies de recherche qui mélangent connaissance acquise des données et connaissance fournie par le modélisateur. En effet, *K2* sélectionne le réseau bayésien le plus probable *a posteriori* (c'est-à-dire sachant les données) parmi un sous-ensemble de réseaux possibles. Ce sous-ensemble est défini par le modélisateur, qui doit identifier une hiérarchie causale entre variables, contraignant la recherche du réseau le plus probable. La position de chaque variable dans cette hiérarchie détermine le nombre de variables qui seront testées comme parents possibles. Soit X la variable de plus bas niveau dans la hiérarchie causale. L'implémentation de l'algorithme commence avec la prise en compte de X, et calcule en premier lieu la probabilité (plus précisément la log-vraisemblance) du modèle sans aucun lien causal allant des autres variables vers X. L'étape suivante est le calcul de la log-vraisemblance de tous les modèles avec un seul lien causal vers X. Si aucune de ces dépendances ne possède une log-vraisemblance supérieure à celle du modèle sans lien vers X, ce dernier est assumé comme modèle le plus probable et *Discoverer* passe à l'évaluation de la seconde variable dans la liste. Si au moins l'un de ces modèles possède une log-vraisemblance supérieure à celle du modèle sans lien vers X, le lien correspondant de dépendance causale est retenu et la recherche continue en essayant d'ajouter un deuxième lien vers X, et cela jusqu'à ce que la log-vraisemblance ne cesse d'augmenter. Une fois l'évaluation d'une variable terminée,

l'algorithme passe, par la même méthode, à la recherche des liens les plus probables vers la variable suivante dans la hiérarchie.

Ordre	Indicateur	Thème			
			16	autonomie	DEMANDE
1	site	STRUCTURE	17	vitesse_route	FLUX
2	distance_centre	STRUCTURE	18	accessibilité_MP	ACCESSIBILITÉ
3	réseau_ferré	OFFRE	19	accessibilité_TC	ACCESSIBILITÉ
4	voirie_rapide	OFFRE	20	part_syst	DEMANDE
5	époque_urb	STRUCTURE	21	longueur	DEMANDE
6	habitat_ind	STRUCTURE	22	durée_dépl_mot	PRESSIONS
7	densité	STRUCTURE	23	mobilité	DEMANDE
8	taux_emploi	STRUCTURE	24	part_Doux	DEMANDE
9	revenus_men	SOCIO-ECON	25	part_MP	DEMANDE
10	taille_ménages	SOCIO-ECON	26	part_TC	DEMANDE
11	vieillesse	SOCIO-ECON	27	part_TC_passKm	FLUX
12	actifs_étude	SOCIO-ECON	28	passKm_motor	FLUX
13	park_privé	OFFRE	29	flux_trafic	FLUX
14	motorisation_m	OFFRE	30	énergie	PRESSIONS
15	fermeture	DEMANDE	31	budget_temps	PRESSIONS

Tableau 2 - La hiérarchie causale entre les indicateurs du système de la mobilité.

L'algorithme *K2* peut être implémenté selon deux stratégies : *Greedy* et *ArcInversion*. Dans *Greedy*, les variables testées comme parents possibles d'une variable donnée sont seulement celles qui la précèdent dans la hiérarchie causale. Dans *ArcInversion*, au contraire, les variables plus en bas dans l'échelle peuvent elles-aussi être testées comme parents, à condition que cela ne produise pas une boucle (les réseaux bayésiens ne peuvent pas contenir de boucles). *Greedy* est la stratégie la plus simple qui donne au modélisateur le plus grand contrôle du processus de génération du modèle. Elle est la stratégie utilisée dans la génération du réseau présenté dans cette étude.

Le tableau 2 montre la hiérarchie causale utilisée par *K2* dans la génération du réseau bayésien pour l'interaction ville-transports-environnement sur la Côte d'Azur. Le site et la position des zones urbaines sont considérés en tant qu'éléments primordiaux, suivis par la desserte des grandes infrastructures (réseau ferré, voirie rapide) et par les autres éléments de la structure urbaine. Il est donc supposé que les infrastructures de transports rapides sont susceptibles d'influencer la structure urbaine. À l'échelle intra-urbaine, les caractéristiques socio-économiques de la population sont susceptibles de dépendre des caractéristiques physiques du quartier en termes de structure urbaine et d'offre de transport : nous supposons que les localisations des différentes couches de la population sont influencées par les caractéristiques urbanistiques et de transport des différentes zones urbaines. À son tour, l'équipement des ménages est un aspect de l'offre

susceptible de dépendre tant de la structure urbaine que des caractéristiques socio-économiques.

Dans la suite de l'ordonnancement des variables, nous trouvons les indicateurs de structure spatiale de la demande de mobilité (les indices de fermeture et d'autonomie, la longueur des déplacements), la vitesse moyenne du réseau routier, les niveaux d'accessibilité, les autres aspects de la demande de mobilité (motifs, partage modal) avec la durée des déplacements et, finalement, les flux de passagers et de véhicules et la consommation de ressources.

Dans notre étude, nous avons testé de nombreuses hypothèses par le biais de différentes hiérarchies causales. Ici, nous nous limitons à présenter la hiérarchie causale qui a produit le meilleur réseau bayésien, en termes d'explication causale des phénomènes modélisés.

3 . Un modèle bayésien sous la forme de deux sous-réseaux déconnectés

Le réseau bayésien produit à partir des trente et un indicateurs est présenté dans la Figure 3. Globalement, il s'agit d'un réseau très bien connecté (seulement deux éléments n'ont pas pu être liés aux autres) représentant un modèle causal particulièrement convaincant pour le système de la mobilité urbaine dans l'espace urbain azuréen. Avec une log-vraisemblance de -2217[1], sa particularité est d'être constituée de deux sous-réseaux indépendants.

Le sous-réseau principal : site, époque d'urbanisation et tissu urbain

Le point de départ de la lecture du sous-réseau principal est la variable qualitative du site urbain. Les caractéristiques du site ont, historiquement, déterminé l'offre d'infrastructures ferrées. La ligne principale est-ouest des chemins de fer a utilisé la bande littorale, tandis que des lignes secondaires ont été mises en place dans les vallées (vallées du Var pour les Chemins de Fer de Provence et du Paillon pour la ligne Nice-Coni). À partir de la seconde moitié du XIXème siècle, la présence du réseau ferré a déterminé le premier essor urbain de la Côte d'Azur : les zones littorales et les vallées ont su tirer profit de la présence des infrastructures ferrées pour constituer un système urbain de villes et bourgades reliées par les chemins de fer. L'urbanisation des collines, loin du réseau ferré, est postérieure à la guerre, avec la diffusion de la motorisation de masse. Cette partie

[1] La mesure de la probabilité *a posteriori* d'un réseau bayésien (la vraisemblance) est toujours donnée en logarithme. Notons que le logarithme de la probabilité d'obtenir les données des 76 zones de la Côte d'Azur à partir d'un modèle aléatoire (sans aucune connexion parmi les éléments) est de -2588. Le modèle trouvé est par conséquent 1,14 E161 fois plus probable que ce modèle aléatoire.

du réseau bayésien retrouve les caractéristiques principales de la genèse de l'espace urbain azuréen.

Plusieurs éléments du modèle sont des conséquences directes de l'époque d'urbanisation. D'abord, la taille moyenne des ménages dans un quartier dépend de l'époque de son urbanisation : les couples avec enfants se localisent dans les zones d'urbanisation plus récente, aux logements plus confortables, plus grands et moins chers. Les ménages plus petits (retraités, jeunes célibataires) restent dans les zones d'urbanisation plus ancienne. Par conséquent, le taux de vieillesse de la zone urbaine dépend directement de la taille des ménages (les enfants sont dans les ménages grands, les personnes âgées dans les petits). Le poids des déplacements systématiques dans la mobilité quotidienne dépend de la structure d'âge de la population (les retraités effectuent uniquement des déplacements non systématiques). Enfin, la mobilité journalière totale est liée à sa typologie (systématique ou non) : plus la mobilité d'une zone urbaine est de type non-systématique, plus elle est quantitativement importante au cours de la journée. Pour résumer, la mobilité totale journalière est plus importante dans les zones d'urbanisation ancienne, aux petits ménages de retraités ou de jeunes célibataires avec une mobilité de type non systématique. Or, le niveau de mobilité journalière totale ne semble pas jouer un rôle déterminant dans le fonctionnement du système : il s'agit apparemment d'une faiblesse du réseau bayésien trouvé, car au niveau de la ville dans son ensemble, la mobilité totale déterminait, avec la longueur des déplacements, les flux de passagers-Km par habitant.

Une seconde conséquence de l'époque d'urbanisation de la zone concerne la répartition des logements en habitat individuel et collectif. L'urbanisation ancienne s'est faite essentiellement (mais pas uniquement) sous la forme d'habitat collectif. Puis, l'habitat individuel a pris un poids croissant dans les nouveaux développements urbains. La densité urbaine dépend directement du pourcentage d'habitat individuel dans la zone, mais également de l'époque d'urbanisation : à parité de poids de l'habitat individuel, les zones de plus récente urbanisation présentent des densités plus faibles que celles bâties avant les années 70. À son tour, la densité urbaine détermine la vitesse moyenne du réseau routier, phénomène déjà entrevu à l'échelle de la ville dans son ensemble.

La typologie de l'habitat de la zone urbaine est un indicateur fondamental, correspondant à la fois les caractéristiques sociologiques (les revenus moyens des ménages qui s'y installent), l'équipement en parkings privés et en automobiles (toujours croissants avec le pourcentage d'habitations individuelles) et finalement, l'accessibilité par les transports en commun (les quartiers pavillonnaires sont moins desservis et imposent aux utilisateurs des temps plus longs de marche et d'attente aux arrêts).

En poursuivant la lecture du sous-réseau principal, l'époque d'urbanisation et le taux de motorisation déterminent la longueur des déplacements qui sont en effet plus longs dans les zones où la population est fortement motorisée et dans les zones de plus récente urbanisation : les distances entre origines et destinations possibles sont supérieures dans les quartiers résidentiels de l'après guerre, et, encore plus, dans les zones périurbaines d'urbanisation récente. La longueur moyenne des déplacements est capable d'expliquer (dans une perspective causale), à elle seule, les flux de passagers-Km motorisés produits en moyenne par chaque habitant d'une zone urbaine donnée, indépendamment du nombre de déplacements journaliers. Cette indication du réseau bayésien trouve une explication logique dans le fait que, dans l'espace urbain azuréen, les zones d'ancienne urbanisation, dans lesquelles la mobilité par habitant est plus élevée, sont également celles à plus faible motorisation et aux déplacements les plus courts. Par conséquent, l'effet du nombre supérieur de déplacements par habitant est absorbé par la réduction des distances et n'apparaît pas dans le réseau.

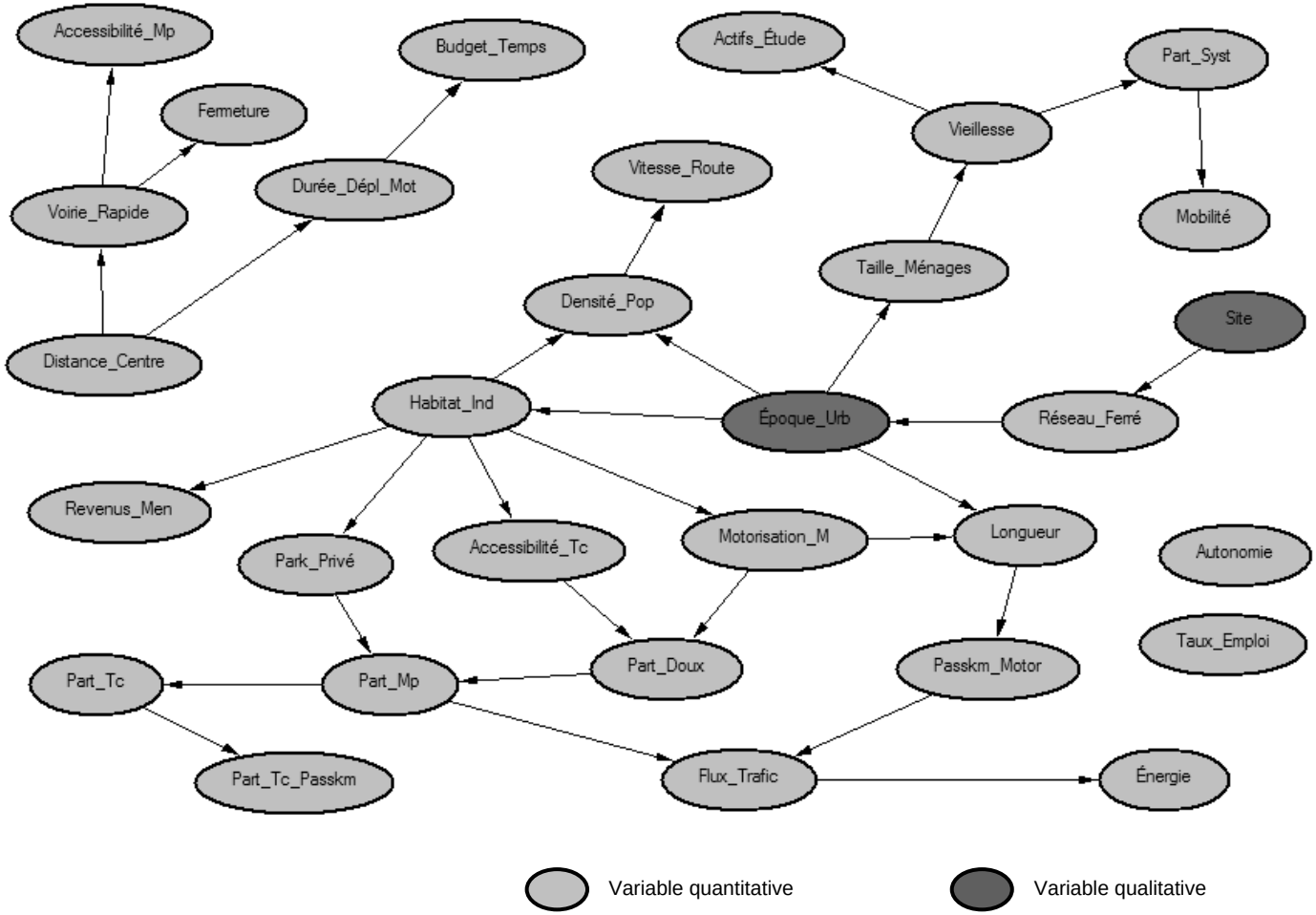

Figure 3 - Le réseau bayésien pour le système de la mobilité urbaine à Nice-Côte d'Azur.

Les facteurs déterminant le partage modal des déplacements sont la disponibilité de parkings privés, la motorisation de la population et l'accessibilité par les transports en commun. Une bonne accessibilité par les transports en commun et une faible motorisation amènent la population à utiliser davantage la marche et le vélo dans leur mobilité quotidienne, à réduire les déplacements en voiture et à augmenter les déplacements par les transports en commun.

Dans la partie finale de l'enchaînement causal de ce premier sous-réseau, la part des modes motorisés privés et les flux de passagers-Km motorisés déterminent, tout naturellement, les flux de véhicules routiers produits par chaque habitant d'une zone urbaine. Les flux de véhicules sont, à leur tour, la cause de la consommation énergétique par habitant.

Globalement, dans le sous-réseau principal, le site, l'époque d'urbanisation et les caractéristiques du tissu urbain (la typologie de l'habitat, la densité) sont des variables clés, qui déterminent, directement ou indirectement, d'importants aspects du fonctionnement de la mobilité urbaine : d'un côté, les caractéristiques socio-économiques de la population et son niveau de mobilité, de l'autre, l'équipement des ménages, l'accessibilité par les transports en commun, le partage modal de la mobilité, les flux de trafic et la consommation énergétique.

Le sous-réseau sécondaire : le rôle de la distance au centre

Le second sous-réseau, plus petit, décrit l'effet du gradient centre-périphérie dans le fonctionnement du système azuréen de la mobilité urbaine. La création d'un gradient centre-périphérie à l'intérieur de la conurbation à partir de son hyper-centre niçois avait déjà été prévue par A. Dauphiné (1990). Dans le modèle bayésien, la distance au centre est le facteur clé expliquant l'offre de voirie rapide. Les zones à proximité du centre sont également plus proches d'un échangeur du système autoroutier urbain, car les infrastructures de voirie rapide ont été bâties prioritairement pour desservir le centre de l'agglomération (la ville de Nice et, en particulier, ses zones centrales). La proximité à la voirie rapide augmente l'accessibilité routière aux emplois et l'indice d'ouverture de la zone, qui devient plus attractive pour les déplacements des non-résidents.

Deux remarques peuvent être faites sur le rôle de l'accessibilité par le réseau routier dans le système azuréen de la mobilité urbaine. D'abord le partage modal de la mobilité quotidienne est lié davantage au niveau de l'accessibilité par les transports en commun que par le réseau routier. En d'autres termes, l'automobile est le choix modal par défaut pour les déplacements motorisés, à moins que l'accessibilité par les transports publics ne soit suffisamment élevée pour être concurrentielle. Ensuite, le principal facteur de l'accessibilité routière d'une zone urbaine est sa desserte par des infrastructures de voirie rapide. D'autres études, conduites à l'échelle des agglomérations urbaines dans leur ensemble et ayant recours toujours à la modélisation bayésienne, parviennent à des conclusions opposées [Fusco 2004]. Il s'agit d'un phénomène très intéressant, révélateur du changement d'appréciation des phénomènes à une échelle d'observation différente. Une ville avec un réseau d'autoroutes urbaines très développé produit normalement des faibles niveaux d'accessibilité routière aux emplois, car les activités économiques se dispersent dans l'espace urbain, et moins de destinations peuvent être atteintes dans la demi-heure. Par contre, à l'intérieur de chaque ville, une zone urbaine avec une bonne desserte de voirie rapide bénéficie d'une plus grande accessibilité routière aux emplois. Le résultat au niveau macro n'est donc pas la somme des résultats au niveau méso : si chaque zone urbaine faisait pression pour obtenir une bonne desserte autoroutière et améliorer son accessibilité aux emplois de la ville, le résultat serait probablement une diminution de l'accessibilité de toutes les zones urbaines à cause de la redistribution des emplois dans l'espace.

Pour terminer la lecture du sous-réseau secondaire, la durée des déplacements motorisés est plus courte pour les habitants des zones plus périphériques en dépit de la distance supérieure aux autoroutes urbaines. Dans ce cas, le réseau bayésien n'a pas été capable de déduire le lien avec la vitesse du réseau routier à partir des données. Enfin, le budget-temps pour la mobilité quotidienne augmente avec la durée moyenne des déplacements motorisés et est donc supérieur dans les zones centrales de la conurbation.

Deux éléments restent déconnectés du modèle bayésien et ne semblent jouer aucun rôle dans le fonctionnement du système azuréen de la mobilité urbaine : le taux d'emploi et l'indice d'autonomie. Il s'agit de deux paramètres normalement liés entre eux et susceptibles d'influencer d'autres éléments de la demande de mobilité (en particulier la part des modes non motorisés et la longueur des déplacements). Le rôle négligeable de ces deux paramètres est probablement aussi le résultat du découpage particulièrement grossier de l'espace urbain azuréen constitué par les 76 zones de l'Enquête Ménages. À l'exception des zones centrales des villes principales (Nice, Cannes, Antibes, Grasse), les zones d'enquête sont beaucoup plus vastes que ce qui pourrait être considéré comme l'espace de la mobilité de proximité, à l'intérieur duquel un taux d'emploi ou un indice d'autonomie élevé peuvent se traduire par une pratique plus importante de la marche et du vélo. Cependant, le rôle négligeable du taux d'emploi pourrait également indiquer des styles de vie moins axés sur la proximité ; la population de la Côte d'Azur serait habituée à tirer profit de toutes les opportunités offertes par la ville et par ses multiples centres d'activité, selon ce que V. Kaufmann (2000) appelle des attitudes "métropolitaines" et "rurbaines" à la mobilité quotidienne.

Plusieurs simulations numériques peuvent être effectuées pour vérifier les points de force et de faiblesse du réseau bayésien pour la Côte d'Azur. Dans l'annexe D du cd rom, nous avons testé la force prédictive du réseau et avons analysé les résidus du calcul des niveaux d'accessibilité pour les 76 zones.

4 . Des dynamiques causales aux impacts différents sur la durabilité urbaine

Des enchaînements causaux particulièrement significatifs pour le fonctionnement du système azuréen de la mobilité peuvent être identifiés dans chaque sous-réseau du modèle bayésien. Le premier sous-réseau, par exemple, présente un enchaînement complexe allant des caractéristiques du site jusqu'à la consommation énergétique des transports. Dans la Figure 4, nous avons décrit les deux formes extrêmes que cet enchaînement peut prendre. Ces enchaînements représentent une simplification du réseau bayésien de la Figure 3.

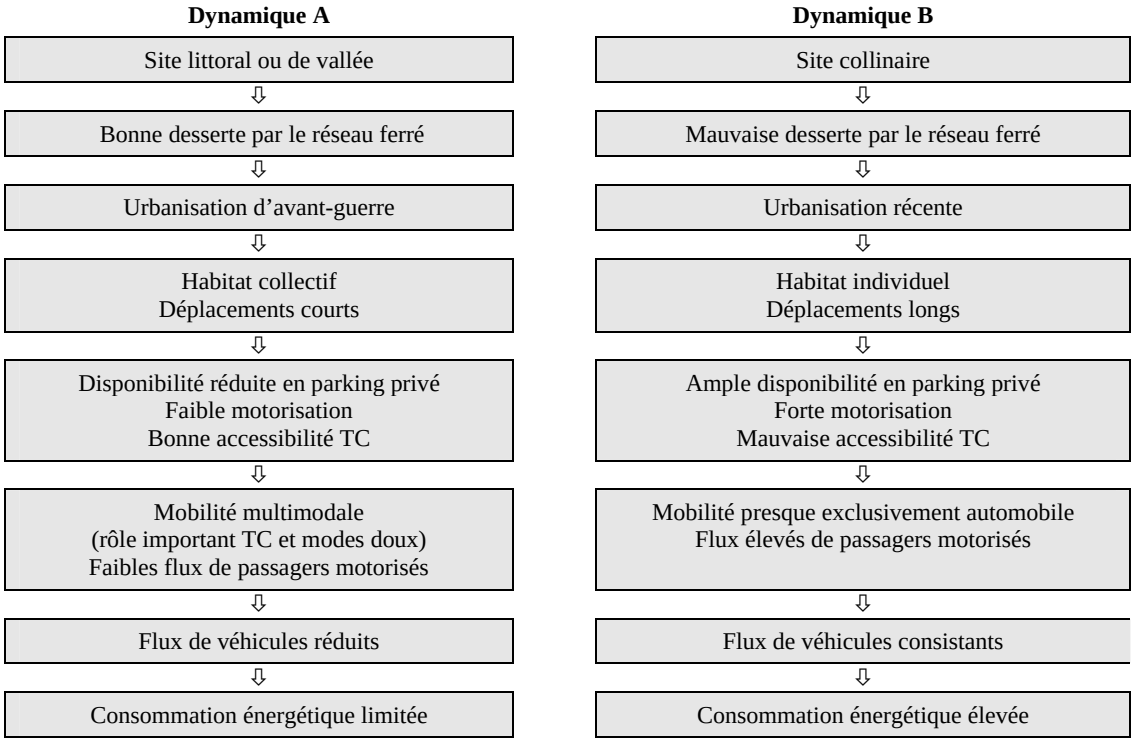

Figure 4 - Les dynamiques opposées A et B à l'œuvre dans l'espace urbain azuréen.

Pour identifier précisément les causes et les effets, nous invitons le lecteur à parcourir le graphe causal du réseau. La première dynamique causale est celle des zones urbaines littorales ou de vallée, susceptibles d'avoir une bonne desserte par le réseau ferré et d'avoir été urbanisées avant la guerre ; l'habitat y est majoritairement de type collectif et les déplacements y sont courts. Par conséquent, elles présentent une disponibilité réduite en parkings privés, une motorisation de la population relativement faible et une bonne accessibilité par les transports en commun. À leurs tours, ces conditions produisent une mobilité multimodale et des flux réduits de passagers-Km motorisés. Enfin, les flux de véhicules émis par leurs habitants sont relativement faibles, tout comme leur consommation énergétique. Nous avons appelé cet enchaînement causal de situations *dynamique A*.

La *dynamique A* s'oppose à la *dynamique B* des zones urbaines développées sur des sites collinaires, non connectées au réseau ferré, et d'urbanisation récente. Ces zones montrent une prévalence de l'habitat individuel et conduisent à des déplacements longs pour leurs résidents. Elles offrent une ample disponibilité en parkings privés et présentent une forte motorisation couplée à une mauvaise accessibilité par les transports en commun. Par conséquent, la mobilité y est presque exclusivement automobile, les flux de passagers motorisés et de véhicules routiers y sont consistants, tout comme la consommation énergétique de la mobilité de leurs habitants.

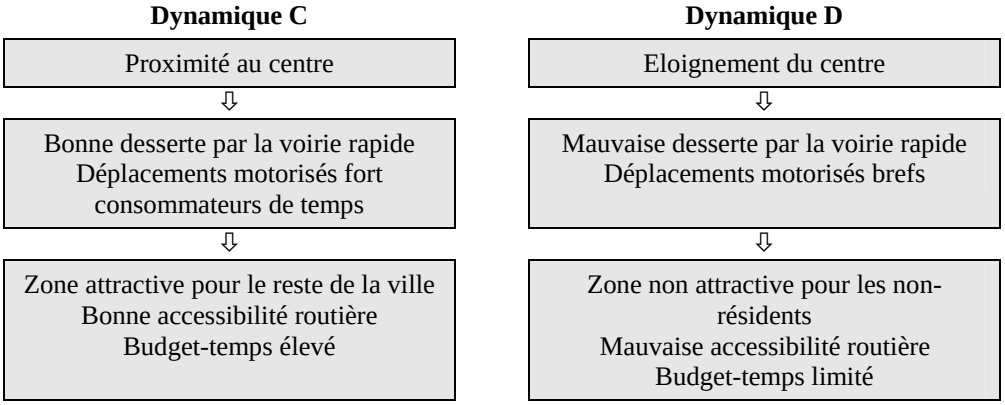

Figure 5 - Les dynamiques opposées C et D à l'œuvre dans l'espace urbain azuréen.

Dans le second sous-réseau, nous pouvons mettre en évidence un enchaînement causal plus court, qui part de la position de la zone urbaine pour aller à l'accessibilité routière et au budget-temps de ses habitants. Les dynamiques *C* et *D* constituent les deux cas extrêmes (figure 5). Dans le premier, les zones urbaines proches du centre se caractérisent par une bonne desserte de voirie rapide mais également par des déplacements motorisés fort consommateurs de temps. Par conséquent, ces zones sont attractives pour le reste de la ville et présentent une bonne accessibilité routière mais leurs habitants sont obligés de consacrer un budget-temps plus important à la mobilité quotidienne. Dans le second cas, les zones urbaines éloignées du centre sont mal desservies par la voirie rapide, tout en étant caractérisées par des déplacements motorisés de brève durée. Comme conséquence, ces zones sont peu attractives pour les non-résidents et montrent une mauvaise accessibilité routière ; cependant, leurs habitants consacrent moins de temps à leur mobilité quotidienne.

Les dynamiques mises en évidence présentent un grand intérêt dans l'évaluation de la durabilité du système de la mobilité urbaine. Les dynamiques de type *A* sont clairement très positives, car capables de produire des niveaux élevés d'accessibilité par les transports en commun, une mobilité multimodale (il s'agit d'une des caractéristiques de la ville à mobilité durable) et une consommation réduite d'énergie. L'évaluation des dynamiques de type *B* est, pour les mêmes raisons, très négative d'un point de vue de la durabilité urbaine. Les dynamiques *C* et *D*, en revanche, présentent des points de force et de faiblesse complémentaires. Les zones caractérisées par une dynamique de type *C* possèdent un bon niveau d'accessibilité routière, mais obligent leurs habitants à un budget-temps plus important : l'attractivité pour les déplacements des non-résidents est un atout économique, mais comporte également des problèmes de congestion et de dégradation environnementale. L'évaluation opposée

peut être faite pour la dynamique *D* : faible accessibilité routière et risque de ségrégation spatiale, mais également moins de problèmes de congestion et budget-temps plus réduit. Nous remarquons que l'évaluation des dynamiques locales est faite en termes de contribution à la durabilité du système de la mobilité urbaine dans son ensemble (le seul niveau auquel l'analyse de durabilité a un sens).

5 . La différenciation de l'espace urbain azuréen par rapport aux dynamiques causales

Les dynamiques identifiées dans les deux sous-réseaux peuvent être utilisées pour caractériser les zones urbaines de la conurbation azuréenne. Clairement, les dynamiques sélectionnées constituent des cas extrêmes. Rarement les zones réelles de l'espace urbain azuréen présentent toutes les situations caractéristiques d'une de ces dynamiques. Nous avons par conséquent procédé à une comparaison des situations enregistrées dans chaque zone urbaine avec les quatre dynamiques sélectionnées.

Pour chaque zone et pour chaque couple de dynamiques antagonistes (*A-B* et *C-D*), il s'agit de déterminer si l'une des deux dynamiques peut être considérée comme prévalente, ou bien si la zone présente des caractéristiques intermédiaires aux deux cas extrêmes. Comme dans le cas des villes internationales et des profils de durabilité, il s'agit d'évaluer la distance entre des situations réelles et des situations extrêmes non observables. Pour chaque zone, nous avons pris en considération les éléments contenus dans chaque couple de dynamiques antagonistes. Nous avons alors assigné la valeur +1 aux situations concordant avec la première dynamique et -1 à celles concordant avec la seconde (la valeur 0 étant attribuée aux situations intermédiaires). Quand le score moyen de la zone sur l'ensemble des éléments est supérieur à 0.5 ou inférieur à -0.5, on considère que la zone est caractérisée par la première ou par la seconde dynamique, respectivement. Lorsque le score est compris entre -0.5 et 0.5, la zone est considérée comme présentant des situations intermédiaires par rapport aux deux extrêmes.

Par cette procédure, il est possible de produire une cartographie des dynamiques dominantes dans chaque zone urbaine de la conurbation azuréenne (Figure 6). On remarquera, d'abord, que certaines zones sont caractérisées en même temps par une dynamique forte allant de la structure urbaine à la consommation énergétique en passant par le partage modal (dynamiques *A-B*) et par une dynamique forte allant de la distance au centre à l'accessibilité routière et au budget-temps (dynamique *C-D*). La carte résultante permet alors de mettre en évidence des sous-espaces homogènes par rapport aux dynamiques identifiées dans le modèle bayésien.

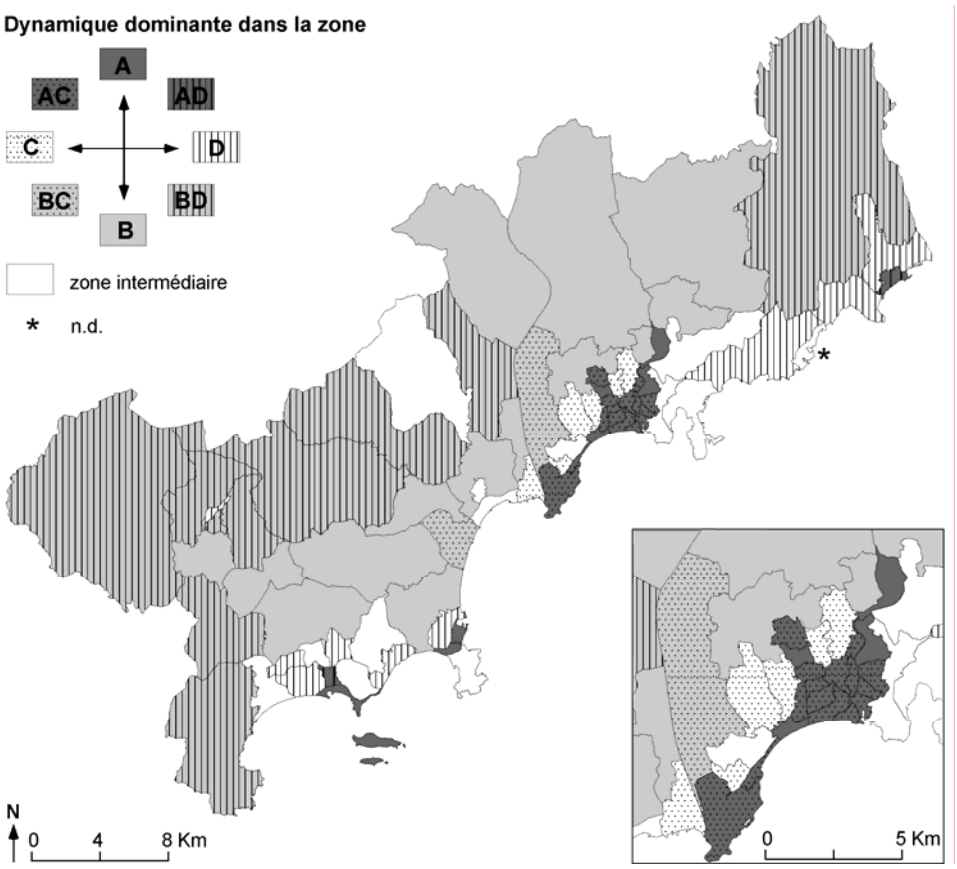

Figure 6 - Caractérisation des zones d'enquête selon les dynamiques à l'œuvre.

- **L'espace central niçois.** Les zones centrales et littorales de la ville de Nice sont caractérisées à la fois par des dynamiques de type *A* et *C*. Du point de vue de la durabilité de la mobilité urbaine, elles présentent l'avantage de posséder une mobilité multimodale, des bons niveaux d'accessibilité et une consommation réduite d'énergie. En revanche, elles subissent la congestion de la mobilité motorisée produite par l'ensemble de la conurbation, et leurs habitants doivent consacrer davantage de temps aux déplacements quotidiens.
- **La nouvelle urbanisation à proximité du centre niçois.** Quelques zones collinaires de Nice-Nord et Nice-Ouest et la zone littorale de Saint-Laurent du Var présentent uniquement une dynamique de zones centrales (bonne desserte autoroutière, bonne accessibilité automobile, budgets-temps élevés et, pour certaines zones telles Saint-Laurent-du-Var, une certaine attractivité pour les déplacements des non-résidents).
- **Anciens centres-villes secondaires et zones marginales à Nice.** Certaines zones marginales de la ville de Nice et les centres-villes de Cannes et de Antibes-Juan-les-Pins, se caractérisent uniquement par la dynamique *A* (site littoral, urbanisation ancienne, mobilité multimodale, faible consommation d'énergie). Elles ne bénéficient pas des meilleurs niveaux d'accessibilité routière, mais les déplacements y sont moins consommateurs de temps. Pour certaines zones aux marges de la ville de Nice, le risque de ségrégation spatiale doit également être pris en compte. Le centre-ville de Menton et la zone du Bd Carnot à Cannes présentent également une dynamique prévalente de type *A*, mais couplée avec une forte dynamique d'espace périphérique (*D*). Les niveaux d'accessibilité routière sont faibles, les budget-temps réduits et, pour le meilleur et pour le pire, ce sont des zones qui attirent relativement de non-résidents.
- **Le littoral périphérique.** Plusieurs zones littorales ou à proximité du littoral, à l'est et à l'ouest de la conurbation, avec le centre-ville de Grasse, sont uniquement marquées par la dynamique *D* des zones périphériques. Les niveaux d'accessibilité routière y sont faibles, les budget-temps réduits et elles sont peu attractives pour les déplacements des non-résidents.
- **L'espace périurbain résidentiel en position périphérique.** La plupart du moyen pays à l'ouest du Var, ainsi que le moyen pays Mentonnais et l'extrémité occidentale de la

conurbation, sont caractérisés à la fois par la dynamique *D* des zones périphériques et par la dynamique *C* des sites collinaires avec une expansion périurbaine récente de type presque exclusivement résidentiel, une mobilité dépendante de l'automobile et une forte consommation énergétique.

- **L'espace périurbain à centralité émergeante.** Le moyen pays Niçois, la vallée du Var et la zone collinaire qui, à l'ouest du Var, s'étend jusqu'à Mougins et Mouans-Sartoux, en passant par Sophia-Antipolis et Super-Antibes, est fortement caractérisée par des dynamiques de type *C*. Ces zones constituent un vaste espace périurbain à forte mobilité automobile. Par sa position dans la conurbation azuréenne, il ne peut être considéré comme espace périphérique, car il bénéficie (certes dans une moindre mesure en comparaison des espaces centraux) d'une discrète desserte par le réseau des autoroutes urbaines, d'un bon niveau d'accessibilité routière et, pour certaines zones, d'une importante attractivité pour les déplacements des non-résidents. La partie niçoise de la vallée du Var et la zone littorale de Villeneuve-Loubet vont jusqu'à présenter les caractéristiques des dynamiques des zones centrales.
- **Les espaces intermédiaires.** Un certain nombre de zones, enfin, présente des caractéristiques intermédiaires qui ne permettent pas de les appréhender par une des quatre dynamiques sélectionnées. Il s'agit des zones à l'est de Nice (du Mont Boron à Beaulieu, en passant par Villefranche et La Trinité), du littoral et du centre de Cagnes-sur-Mer et, à l'ouest, de nombreuses zones proches du littoral (de Cannes la Bocca au Cap d'Antibes, en passant par Le Cannet et Vallauris).

La maîtrise des vastes espaces périurbains caractérisés par des dynamiques de type *B*, *BC* ou *BD*, constitue l'enjeu émergent pour la durabilité de la mobilité urbaine sur la Côte d'Azur. Par leur étendue et par leur poids démographique, ces zones contribuent lourdement à déterminer les caractéristiques globales de la mobilité azuréenne. Pour rapprocher son système de la mobilité d'une situation économiquement, socialement et écologiquement plus durable, la conurbation azuréenne doit compacter et densifier les espaces périurbains, et concentrer et relier au réseau des transports en commun les zones d'activité, pour permettre une mobilité multimodale, réduire les flux de trafic et limiter la consommation énergétique. Il s'agit, là, d'indications bien confirmées par d'autres analyses [Jourdan 2003] et qui s'expriment aujourd'hui également dans le débat local. Des enjeux existent évidemment aussi au niveau de l'espace central niçois et des anciens centres-villes secondaires de la conurbation. Les centres-villes secondaires doivent préserver leurs centralités (Menton et Grasse présentent déjà des caractéristiques de zone périphérique). Les espaces centraux niçois doivent maîtriser la congestion et améliorer les conditions de la mobilité de leurs habitants. Le risque est de voir un nombre croissant de niçois quitter les espaces centraux à la mobilité individuellement problématique (même si collectivement plus vertueuse) et alimenter davantage l'expansion périurbaine dépendante de l'automobile.

6 . Conclusions

Cette étude a permis de montrer l'intérêt d'une modélisation à base d'indicateurs ayant recours aux réseaux bayésiens pour analyser les dynamiques territoriales liées au système de la mobilité quotidienne dans l'espace urbain de la Côte d'Azur. Cette modélisation embrasse un large ensemble de problématiques (urbanisme, transports, environnement, etc.) et touche aux questions transversales du développement durable. Les réseaux bayésiens permettent d'intégrer la complexité du domaine d'étude et l'incertitude des relations possibles, pour parvenir à un modèle causal de type probabiliste.

En dépit de quelques faiblesses et de l'appréhension parfois grossière de certains phénomènes, le réseau bayésien développé constitue un bon modèle causal du fonctionnement du système de la mobilité dans l'espace urbain azuréen. Il permet ainsi de parvenir à un certain nombre de conclusions sur les particularités du fonctionnement de ce système, élargi à ses interactions avec la structure urbaine et l'environnement.

Dans la conurbation azuréenne, le site, l'époque d'urbanisation et les caractéristiques du tissu urbain (la typologie de l'habitat, la densité) sont des variables clés, qui déterminent, directement ou

indirectement, d'importants aspects du fonctionnement de la mobilité dans chaque zone urbaine : d'un côté, les caractéristiques socio-économiques de la population installée dans la zone et son niveau de mobilité ; de l'autre l'équipement des ménages, l'accessibilité par les transports en commun, le partage modal de la mobilité, les flux de trafic et la consommation énergétique. Tout en étant une conurbation comprenant plusieurs centres urbains précédemment autonomes, l'espace urbain azuréen présente un gradient centre-périphérie non négligeable par rapport à son hyper-centre fonctionnel niçois. La distance au centre est déterminante pour la proximité aux points nodaux de la voirie rapide et, par là, pour le niveau de l'accessibilité routière. En outre, elle influence la durée des déplacements et le budget-temps des résidents pour la mobilité quotidienne.

Le modèle bayésien permet également d'identifier deux couples de dynamiques antagonistes, appelées *A-B* et *C-D*, liant dans un enchaînement causal plus ou moins complexe certaines situations d'urbanisme, d'offre de transport, de demande de mobilité, etc. Les dynamiques *A-B* lient le site aux caractéristiques du tissu urbain et, en passant par l'accessibilité par les TC, par le partage modal et par la production de flux de trafic, arrivent jusqu'à la consommation d'énergie. Les dynamiques *C-D* lient la distance au centre à l'accessibilité routière et à la consommation de temps, dans un enchaînement causal plutôt court.

Les dynamiques mises en évidence présentent un grand intérêt dans l'évaluation de la durabilité du système de la mobilité urbaine. Elles peuvent également être utilisées pour identifier des sous-espaces homogènes par rapport aux dynamiques causales du modèle bayésien. À l'intérieur de la conurbation azuréenne, nous avons ainsi pu identifier six sous-espaces différents : l'espace central niçois, la nouvelle urbanisation à proximité du centre niçois, l'espace des anciens centre-villes secondaires et des zones marginales niçoises, le littoral périphérique, l'espace périurbain résidentiel en position périphérique et l'espace périurbain à la centralité émergeante. Il existe enfin des espaces intermédiaires aux caractéristiques de transition. Ces différenciations spatiales s'avèrent particulièrement pertinentes par rapport à la connaissance du terrain de l'aire d'étude.

À l'exception des espaces intermédiaires, chacun de ces sous-espaces est donc marqué par des dynamiques causales bien déterminées constituant des opportunités ou des difficultés pour la durabilité du système de la mobilité urbaine. Le principal enjeu pour la durabilité de la mobilité urbaine sur la Côte d'Azur est la maîtrise des vastes espaces périurbains caractérisés par des dynamiques de type *B*, conduisant à la dépendance automobile et à la grande consommation énergétique.

Cette analyse des différenciations spatiales, par le biais de modèles causaux à base d'indicateurs, constitue une application très novatrice des techniques de l'intelligence artificielle en géographie. Sa nature directement opérationnelle permet également d'envisager son utilisation dans le cadre des études d'aménagement, dans la planification de la ville et de son système de la mobilité.

Les limites de ce travail doivent être également soulignées. La modélisation bayésienne développée a été clairement limitée par les données disponibles. La connaissance sur les phénomènes économiques et environnementaux, par exemple, mériterait d'être développée davantage. Des données évaluées à des dates différentes permettraient de mieux intégrer les dynamiques temporelles. En outre, l'analyse que nous avons conduite n'a pas exploité toutes les potentialités de la modélisation bayésienne. Nous nous sommes limité à utiliser le réseau bayésien comme un modèle causal pour la compréhension du fonctionnement du système étudié. Nous avons analysé l'explication que le réseau fournit pour les données observées, mais nous n'avons pas exploité sa capacité d'inférence pour effectuer des simulations en probabilité (comme, par exemple dans Fusco 2004). L'utilisation du modèle bayésien ici présenté en tant qu'outil de simulation stratégique en probabilité constitue une extension naturelle du travail effectué. Le réseau bayésien pourrait être utilisé, par exemple, pour simuler les effets de scénarios futurs de la planification de l'urbanisme et des transports sur la Côte d'Azur.

Enfin, le travail présenté, ne constitue pas une analyse exhaustive de la relation ville-transports-environnement sur la Côte d'Azur. Les orientations stratégiques qu'il suggère ne représentent pas non plus un cahier de route incontestable pour les politiques de mobilité et d'urbanisme. L'étude part d'un

point de vue bien précis (celui de l'analyste). En utilisant un outil spécifique (la modélisation bayésienne), elle se range aux côtés d'études plus classiques. Elle constitue un enrichissement certain pour la prise de décision stratégique en matière de mobilité, d'urbanisme et d'environnement dans cet important espace urbain de l'Arc Latin Méditerranéen.

7 . Bibliographie

Bayesware (2000) *Bayesware Discoverer – User Manual*, Londres : Bayesware Limited

Becker A., Naïm P. (1999) *Les réseaux bayésiens – Modèles graphiques de connaissance*, Paris : Eyrolles

Brunet R. (2001) *Models in Geography? A sense to research, Cybergéo*, n° 204, 18 décembre 2001

Bussière Y., Bonnafous A. (dir.) (1993) *Transport et étalement urbain : les enjeux*, Les chemins de la Recherche n° 13, Lyon : Centre Jacques Cartier

Camagni R., Gibelli M.C., Rigamonti P. (2002) *I costi collettivi della città dispersa*, Florence : Alinea

CE (1996) *Villes durables européennes*, Rapport du Groupe d'experts sur l'environnement urbain, Bruxelles : Commission Européenne, Direction Générale XI

CERTU, CETE Nord-Picardie (1998) *Exploitation "standard" de l'enquête ménages-déplacements de la Métropole Côte d'Azur 1997/1998*, Lille : CETE Nord-Picardie, 7 volumes

CETE Méditerranée (1998) *Enquête sur les déplacements auprès des ménages de la Métropole Côte d'Azur 1997-1998 – Guide de lecture de l'exploitation standard*, Aix-en-Provence : CETE Méditerranée

CETE Méditerranée (1999) *Enquête sur les déplacements auprès des ménages de la Côte d'Azur 1998 – Analyse des résultats*, Aix-en-Provence : CETE Méditerranée

Cooper G., Hersovits E. (1992) A *Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data*, Machine Learning, n° 9, p. 309-347

Dauphiné A. (1990) *Nice – Une eurocité méditerranéenne*, Nice : Serre

DRE PACA (1999) *Carte d'occupation du sol des Alpes-Maritimes*, CD ROM, Marseille : Direction Régionale de l'Equipement

Fusco G. (2004, en cours de publication) *Looking for Sustainable Urban Mobility through Bayesian Networks*, SR Scienze Regionali / Italian Journal of Regional Sciences, Milan, 19 p.

Jensen F.V. (2001) *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York : Springer

Jourdan G. (2003) *Transports, planification et gouvernance urbaine, étude comparée de l'aire toulousaine et de la conurbation Nice-Côte d'Azur*, Paris : L'Harmattan

Kaufmann V. (2000) *Mobilité Quotidienne et Dynamiques Urbaines - La question du report modal*, Science, Technique, Société, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes

Meadows D. (1998) *Indicators and Information Systems for Sustainable Development*, Hartland Four Corners, VT : The Sustainability Institute

Merlin P. (1991) *Géographie, économie et planification des transports*, Paris : Presses Universitaires de France

Newman P., Kenworthy J. (1998) *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Washington : Island Press

Pearl J. (2000) *Causality – Models, Reasoning and Inference*, Cambridge : Cambridge University Press

Pearl J., Russell S. (2000) *Baysian Networks*, Working paper, Los Angeles : University of California

Pileri P. (2002) *Interpretare l'ambiente – Gli indicatori di sostenibilità per il governo del territorio*, Florence : Alinea Editrice

Sanders L., Durand-Dastès F. (1985) *L'effet régional : les composantes explicatives dans l'analyse spatiale*, Collection Espaces, modes d'emploi, Montpellier : RECLUS

ThinkSpace (2001) *MF Works, version 6.2.5*, CD-ROM, ThinkSpace

Voiron Canicio Ch. (1993) *Espaces, structures et dynamiques régionales – L'Arc Méditerranéen, Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée,* n° 33-34, Nice : Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard, Université de Nice-Sophia Antipolis

Wiel M. (1999) *La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée*, Collection Architecture + recherches, Liège : Mardaga