



HAL
open science

Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile

Cyrille Genre-Grandpierre, Giovanni Fusco, Milos Balac, Francesco Ciari, Serigne Gueye, Cyril Sahuc, Philippe Michelon, Matteo Caglioni, Diego Moreno, Fabrice Decoupigny, et al.

► **To cite this version:**

Cyrille Genre-Grandpierre, Giovanni Fusco, Milos Balac, Francesco Ciari, Serigne Gueye, et al.. Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile. [Rapport de recherche] Subvention 11-MT6PREDITG06-5-CVS-053, UMR Espace, Université d'Avignon; UMR Espace, Université de Nice; ETH Zurich; Laboratoire d'informatique d'Avignon, Université d'Avignon; UNIVERSITE Nice Sophia Antipolis; LET. 2015, pp.186. <halshs-01708490>

HAL Id: halshs-01708490

<https://shs.hal.science/halshs-01708490v1>

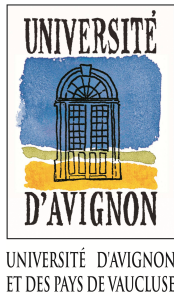
Submitted on 13 Feb 2018

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

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

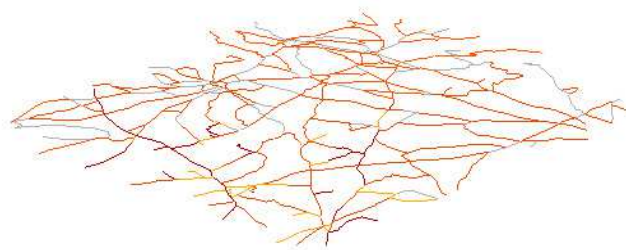


HAL Authorization



Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile

Juin 2015



Responsables scientifiques
Cyrille Genre-Grandpierre
Giovanni Fusco

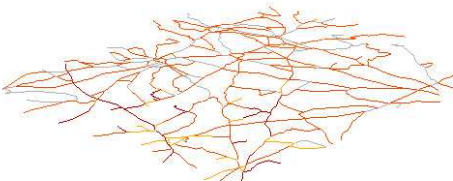




Participants : M. Balac, F. Ciari, S. Gueye, C.Sahuc, P. Michelon, M. Caglioni, M. Caglioni, D. Moreno, F. Decouigny, A. Araldi, A. Mercier, N. Ovtracht, Y. Crozet

PREDIT 4 GO 6 Politiques de transport

Dynamiques de localisation et mobilité à l'horizon 2025.

Prospective, politiques et outils

Subvention 11-MT6PREDITG06-5-CVS-053

 <p>Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile</p>	<p>Partenaires scientifiques</p>
	<p>UMR ESPACE 7300 CNRS Avignon Université d'Avignon 74 rue Louis Pasteur – Case n°17 84029 Avignon Cedex 1 – France Téléphone : 33-(0)4 90 16 26 94 Contact : cyrille.genre-grandpierre@univ-avignon.fr</p>
 <p>Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Swiss Federal Institute of Technology Zurich</p>	<p>ETH Zurich Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) Wolfgang-Pauli-Strasse 15 8093 Zürich SWITZERLAND Téléphone : +41 44 633 71 65 Contact : Francesco Ciari ciari@ivt.baug.ethz.ch</p>
	<p>Laboratoire d'Economie des Transports Institut des Sciences de l'Homme 14, Avenue Berthelot F-69363 Lyon Cedex 07 France Téléphone : 33 (0)4 72 72 64 03 Contact : Aurélie Mercier aurelie.mercier@let.ish-lyon.cnrs.fr</p>
	<p>Laboratoire d'informatique d'Avignon Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse 339 chemin des Meinajaries, Agroparc BP 1228, 84911 Avignon cedex 9 +33 (0)4 90 84 35 00 Contact : Serigne Gueye serigne.gueye@univ-avignon.fr</p>

Sommaire

1. OBJECTIFS DU PROJET « VERS DE NOUVELLES DYNAMIQUES DE LOCALISATION DES MENAGES ET DES ACTIVITES DANS LES TERRITOIRES URBAINS POUR DECOUPLER ACCESSIBILITE ET MOBILITE AUTOMOBILE »	6
2. VITESSE VS LOCALISATIONS POUR QUELLE ACCESSIBILITE ?	13
2.1. introduction	13
2.2. L'accessibilité gravitaire à l'emploi dans le Grand Lyon avec et sans l'Anneau des Sciences	15
2.2.1. L'accessibilité gravitaire	15
2.2.2. Les effets de l'Anneau des Sciences sur l'accessibilité gravitaire	16
2.3. Relocaliser les emplois pour maximiser l'accessibilité : méthode	18
2.4. Assurer un bon potentiel d'accessibilité sans vitesse : c'est possible !	21
2.4.1. Maximiser l'accessibilité moyenne	21
2.4.2. Minimiser les relocalisations à effectuer pour atteindre le niveau d'accessibilité de 2030 avec l'ADS	23
2.5. Conclusion	27
2.6. Bibliographie	29
3. LES DYNAMIQUES DE RELOCALISATION DES ACTIVITES COMMERCIALES : LE ROLE DES CONFIGURATIONS DES RESEAUX VIAIRES	31
3.1. Introduction	31
3.2. Méthodologie	32
3.2.1. Présentation de la démarche de recherche	32
3.2.2. L'aire d'étude et les données	34
3.2.3. Les indicateurs configurationnels de l'analyse de centralité multiple	38
3.2.4. Le calcul des indicateurs configurationnels	43
3.2.5. Les indicateurs intrinsèques	46
3.2.6. Les grandes surfaces commerciales	47
3.2.7. L'interpolation des valeurs sur le réseau	48
3.2.8. La distribution des activités commerciales sur le réseau	50
3.2.9. L'unité de base : le segment viaire	53

3.2.10.	La recherche de relations statistiques entre paramètres du réseau et distributions commerciales : les réseaux bayésiens	54
3.2.11.	L'analyse par stress test : modification des réseaux et conséquences sur le potentiel commercial	57
3.3.	Résultats	60
3.3.1.	Les caractéristiques configurationnelles des réseaux viaires de l'agglomération niçoise	60
3.3.2.	Les localisations commerciales dans l'agglomération niçoise	80
3.3.3.	La recherche de règles liant les configurations aux commerces	83
3.3.4.	Modifier les réseaux viaires pour redistribuer les potentiels commerciaux : stress tests sur l'agglomération niçoise	98
3.4.	Conclusion	117
3.5.	Bibliographie	121
4.	METRIQUE DES RESEAUX ET LOCALISATION DES AMENITES : QUEL COUPLAGE POUR UNE ACCESSIBILITE DURABLE ?	125
4.1.	Introduction	125
4.2.	Méthode	127
4.2.1.	Le simulateur Matsim (www.matsim.org)	127
4.2.2.	Le processus de relocalisation	130
4.2.3.	Le grand Zurich comme zone d'étude	132
4.2.4.	Les métriques testées	134
4.3.	Résultats	136
4.3.1.	Baisser les vitesses routières conduit à une baisse des distances parcourues, mais pas à un réel meilleur partage modal et à la satisfaction individuelle	136
4.3.2.	La nécessité de coupler politiques de vitesse et réflexion sur les localisations pour une accessibilité plus durable	144
4.4.	conclusion	148
4.5.	Bibliographie	149
5.	PRESSIONS URBAINES ET DYNAMIQUES DES RESEAUX DE VILLES : COUPLAGE DE L'ACCESSIBILITE ET DE L'OCCUPATION DES SOLS	151
5.1.	Introduction : dynamiques urbaines et extension des espaces métropolitains	152
5.2.	Pression urbaine et croissance urbaine sur un réseau de villes	154
5.2.1.	Deux facteurs : la disponibilité des sols et l'accessibilité	154
5.2.2.	Formalisation du modèle des pressions urbaines	157

5.2.3.	Les pressions urbaines sur la région PACA	159
5.3.	Prospective territoriale	164
5.3.1.	Modèle de croissance urbaine	164
5.3.2.	Prospective 2040	165
5.3.3.	Impacts du contournement routier de Nice	173
5.4.	Conclusion	176
5.5.	Bibliographie	177
6.	CONCLUSION	179
	TABLE DES FIGURES	182

1. Objectifs du projet « Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile »

Depuis plus de quatre décennies les territoires urbains se sont construits sur la base de l'accès à une mobilité facilitée, peu chère, largement partagée et qui rime le plus souvent avec mobilité automobile (Wiel 2002). En effet, dans les territoires urbains contemporains la réflexion sur la localisation des composantes de la ville (logements, emplois, commerces, loisirs, etc.) a très largement été reléguée au deuxième plan derrière la réflexion sur les conditions de la mobilité. On s'est peu soucié de savoir où localiser les différentes aménités urbaines, peu soucié de leurs associations locales (cf. la question de la mixité des fonctions), en bref peu soucié de géographie, fort de la certitude que, quel que soit le pattern des localisations, l'accès à la mobilité motorisée pour le plus grand nombre les rendrait accessibles. Rien n'est plus considéré comme central ou périphérique, en référence à l'espace euclidien, que ce soit à l'échelle urbaine ou métropolitaine, tout doit être accessible dans l'espace réseau. Dans cette perspective, accessibilité rimant avec mobilité automobile l'important est de garantir les conditions optimales de cette mobilité à grand renfort d'autoroutes, voies rapides et autres boulevards, avec pour conséquence une forte hiérarchisation fonctionnelle dont les principes de base (jamais vraiment remis en question depuis) ont été posés par Le Corbusier avec la Charte D'Athènes, puis par le rapport Buchanan. Cette amélioration et hiérarchisation permanente des infrastructures routières devant permettre de garantir, voire d'augmenter, le niveau de performance de l'accessibilité automobile, perpétuellement remise en cause par l'augmentation de la mobilité motorisée, qui dans une logique systémique est suscitée par l'amélioration des infrastructures routières, qui revient à dévaloriser la qualité de l'offre de transport non automobile, avec pour conséquence un report modal vers l'automobile, mais aussi par la mécanique, aujourd'hui bien connue, du trafic induit par la construction d'infrastructures (cf. le cercle vicieux de la dépendance automobile de G. Dupuy, 1999).

Garantir les conditions de la mobilité pour assurer l'accessibilité aux aménités urbaines et un fort potentiel d'interactions multiples, un fort potentiel de co-présence, qui est l'essence même du phénomène urbain, car il permet notamment l'émergence des économies d'agglomération (Huriot, 1998), peut apparaître comme un véritable tonneau des Danaïdes pour l'investissement public : toujours plus d'investissements pour une amélioration de la mobilité automobile qui permet aux logiques de localisation de s'affranchir toujours plus des contraintes liées à la proximité physique, mais rendent en retour ces territoires dépendant de l'automobile pour leur fonctionnement.

Dans un contexte de raréfaction des financements publics nécessaires à l'amélioration constante des infrastructures routières ; sous la pression de considérations environnementales toujours plus prégnantes, qui placent la réduction de la mobilité motorisée parmi les objectifs les plus importants à atteindre dans le moyen terme notamment pour réduire la pollution et les émissions de gaz à effet de serre ; avec la volonté de limiter les consommations foncières liées au processus d'étalement urbain, lui-même intimement lié à la mobilité automobile ; face au

constat des inégalités sociales produites par la promotion d'une accessibilité avant tout automobile qui exclue les plus jeunes, les plus âgés et tous ceux qui n'ont pas accès à ce mode, ce fonctionnement territorial qui s'est basé sur une mobilité automobile exacerbée pour garantir l'accessibilité, au fondement même du phénomène urbain, semble devoir être très largement remis en cause sans pour autant que l'appétence pour de bons niveaux d'accessibilité (et le niveau de choix qui va avec) soit réellement questionné et remis en cause.

Ainsi, aux politiques répondant systématiquement à toute demande de mobilité assurée le plus souvent par l'automobile, tendent à se substituer des politiques plus intégrées, articulant transport et urbanisme qui, à terme, visent à découpler l'accessibilité du recours systématique à la mobilité motorisée, ce qui passe notamment, condition nécessaire mais pas suffisante, par l'amélioration de l'offre de transport non automobile.

Si on ne peut pas revenir sur les niveaux d'accessibilité aujourd'hui atteints, car ce sont eux qui « font la ville » grâce à un niveau de potentiel d'interactions (et donc de choix) qui permet l'émergence des économies d'agglomération et in fine un bon niveau de productivité (cf. R. Prud'homme, 2006, a par exemple montré les liens entre vitesse des déplacements, densité urbaine, taille du marché de l'emploi et productivité) il semble en revanche obligatoire de revenir sur les moyens d'atteindre ces niveaux d'accessibilité. Plus précisément la question de la localisation des aménités urbaines se (re)pose donc avec force, comme au temps de la mobilité couteuse (Wiel, 1999)

Le challenge consiste donc à savoir comment conserver, voire améliorer les niveaux d'accessibilité (d'interactions spatiales) actuels en les rendant moins dépendants de la mobilité automobile et en faisant dans le même temps en sorte que ces nouvelles configurations spatiales répondent du mieux possible aux aspirations, souvent complexes, des individus.

Dit autrement, la question est de savoir à quelles conditions il est possible de faire de l'accessibilité autrement qu'à travers la seule vitesse des déplacements automobiles, mais en jouant sur les localisations des différentes ressources de la ville (emplois, logements, commerces, etc.). Cette approche vise par ailleurs à une meilleure résilience des formes urbaines en les rendant moins dépendantes dans leur fonctionnement de l'automobile et de la consommation d'énergies fossiles qui lui est associée.

Une première approche possible pour relever ce challenge consiste à « inventer » des structures urbaines et à les évaluer quant à leurs externalités en termes d'accessibilité, de réduction possible de la mobilité, d'impacts sur l'environnement, etc. Emprunter cette ligne de travail permettrait de connaître les avantages comparés de telle ou telle forme de ville plus ou moins stylisée (ville compacte, ville étalée, ville polynucléaire, ville s'inspirant des formes fractales, cf. par exemple Genre-Grandpierre, C. Frankhauser P, 1998, Cavailhès et al. 2004, etc.) en jouant à la fois sur la taille, le nombre, la localisation, le type d'aménités et sur les conditions de transport (présence ou pas de transport public, de péages urbains, etc.). Un tel travail permet de dépasser le débat, souvent un peu simpliste, qui oppose ville compacte et ville étalée et qui ne retient le plus souvent comme variable descriptive des formes urbaines que la seule densité (comme si à densité égale les structures et fonctionnements urbains ne pouvaient pas être résolument différents). Cette approche basée sur la modélisation pourrait

avec profit être rapprochée des travaux plus empiriques menés par exemple par Banister 1997, Breheny 1992, Camagni 1997, qui cherchent à mesurer les externalités des villes réelles qu'ils classent dans des catégories plus ou moins complexes.

Plutôt que de choisir cette voie, qui nécessite une réflexion a priori sur les formes urbaines et leur optimalité, nous avons choisi de répondre à l'appel à proposition « dynamiques de localisation et mobilité à l'horizon 2025 » non pas en « inventant et testant des formes urbaines jusqu'à trouver la ou les formes optimales (qu'il sera en tout état de cause difficile d'atteindre étant donné l'inertie des structures bâties et les moyens « relativement limités » de la planification spatiale), mais en testant la réponse des systèmes territoriaux actuels à différents stimuli. L'approche générale consiste donc à savoir « que se passerait-il en termes de localisations des ménages et activités si on jouait sur tel ou tel levier impactant la construction des territoires ». Dit autrement, on simule des modifications des conditions actuelles de vie des territoires, puis on estime les dynamiques de localisation et les pratiques de mobilité consécutives aux changements et enfin on évalue le résultat de ces dynamiques du point de vue de l'accessibilité et plus globalement de la mobilité durable.

Plus spécifiquement, les stress test réalisés dans ce projet à l'échelle urbaine, mais aussi métropolitaine, consiste à modifier les réseaux routiers, tant en termes de topologie que de fonctionnalités (changement de vitesse de circulation par exemple) pour ensuite explorer les impacts de ces modifications des conditions de l'accessibilité sur les dynamiques de localisations induites, pour enfin estimer les formes – fonctionnement obtenues au prisme du développement durable.

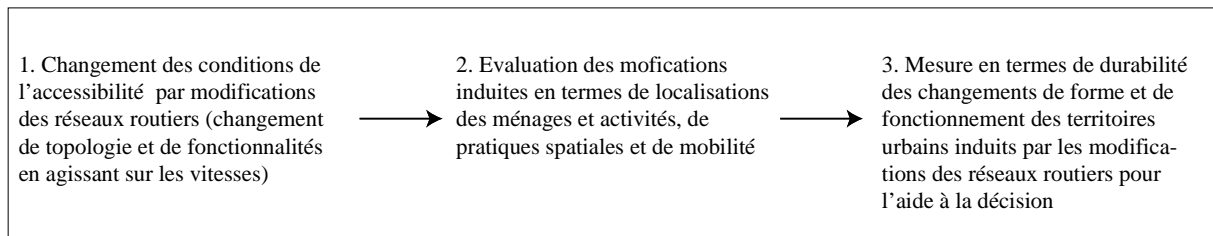


Figure 1 La démarche stress test du projet DAMA

La démarche est donc proche de celle des travaux d'Isabelle Thomas (2002) qui, dans son livre « *Transportation networks and the optimal location of human activities: a numerical geography approach* », testait l'effet de différentes configurations de réseaux stylisés (hiérarchique, radiaux, etc.) sur la localisation optimale d'activités. La différence tient ici au fait que les calculs de l'accessibilité ne se font pas sur la seule base de la topologie, que les réseaux utilisés sont réels (et non des « réseaux-jeux » de petite taille), et que les relocalisations ne se font pas toujours selon le modèle de la p-médiane.

La notion d'accessibilité, qui peut se définir comme la facilité d'accès au départ d'un lieu i à un ensemble de lieux j ou à une ressource localisée en j , est donc au cœur de ce travail. L'accessibilité dépend en effet de la vitesse des déplacements et donc des réseaux de transport (accéder vite à des lieux ou de la ressource), mais aussi, comme on l'a depuis trop longtemps oublié, de la localisation de la ressource (avoir la ressource à proximité : emplois, logements, populations, etc.).

En effet, depuis des décennies, la recherche de bons niveaux d'accessibilité (notamment à l'emploi qui est une des principales qualités de la ville et conditions de sa compétitivité (Prud'Homme, 1999), eu égard à l'émergence des économies d'agglomération et d'urbanisation qu'elle permet, est essentiellement passée par l'amélioration des conditions de transport et plus précisément par l'augmentation de la vitesse des déplacements grâce à l'amélioration des infrastructures, particulièrement les routes.

Aujourd'hui, avec des ressources publiques plus réduites et dans un contexte où la problématique du développement durable est plus prégnante et va notamment de plus en plus de pair avec des aspirations à plus de lenteur pour des raisons de sécurité, de limitation des émissions de polluants, mais aussi pour la recherche de fonctionnements territoriaux davantage basés sur la proximité plus que sur la vitesse (cf par exemple le concept de « ville à portée de main »), la construction de nouvelles infrastructures rapides paraît de plus en plus difficile, mais sans pour autant que l'on veuille renoncer à l'accessibilité. Aussi, dans le cadre de cet appel à projets « Dynamiques de localisation et mobilité à l'horizon 2025 » une réflexion en profondeur sur la notion d'accessibilité semble importante.

Il s'agira notamment voir ce que l'on peut attendre en termes d'accessibilité et de fonctionnement urbain induit, de processus de relocalisation de ressources (emplois, commerces) consécutifs à différents scénarios concernant l'évolution des réseaux routiers. Formulé autrement, il s'agit de savoir dans quelle mesure il est possible de rendre l'accessibilité en milieu urbain moins dépendante de la vitesse automobile pour plus de durabilité.

Ce travail sur l'impact des types de réseaux sur l'accessibilité, et in fine sur la construction des territoires, revient à montrer l'importance stratégique de considérer les réseaux routiers à petite échelle comme des « acteurs » de la construction du territoire et pas seulement pas comme des supports passifs facilitant les circulations. En effet, si les réseaux routiers sont très largement étudiés, il n'en reste pas moins qu'ils restent « mal connus » globalement et qu'il reste difficile de relier des types de réseaux à des métriques particulières et à des externalités conséquentes. La faute à un manque de vision globale de ces réseaux qui ne sont pas suffisamment pensés globalement, car les opérateurs sont nombreux, agissent à différentes échelles et ne se coordonnent que rarement : état, conseil régional, intercommunalités, communes, voies privées, etc.

Pour contribuer à cet objectif très large d'exploration des liens entre types de réseaux routiers – formes induites d'accessibilité – localisations conséquentes – et mesures des externalités en termes de durabilité, différents axes de travail qui comprennent des problématiques, des méthodes, des terrains et échelles spécifiques ont été fixés et structurent ce rapport.

1. La première partie consiste à savoir à quelle condition en termes de localisations des aménités il est possible d'atteindre de bons niveaux d'accessibilité sans recourir à la construction d'infrastructures routières. Dit autrement il s'agit de savoir s'il est possible de « faire de l'accessibilité » sans vitesse pour construire des territoires plus durables. Ce travail, conduit en collaboration entre l'UMR ESPACE, le laboratoire d'informatique d'Avignon (LIA) et le laboratoire d'économie des transports de Lyon (LET), a abouti à la création d'un logiciel pour l'aide à la décision en termes « d'accessibility planning ». Dans une logique

proche de celle de la « ville cohérente » (Korsu et al., 2012) le logiciel créé permet d'explorer les accessibilités automobiles induites par des changements de réseaux routiers (construction d'infrastructures changements de politique de vitesse par exemple) VS par la relocalisation d'aménités (emplois, logements, etc.). Il peut donc être utilisé dans le processus d'évaluation de nouvelles infrastructures de transport, puisqu'il permet notamment de mesurer l'ampleur des relocalisations à envisager pour obtenir les mêmes effets en termes d'accessibilité que ceux induits par une nouvelle infrastructure. Le cas d'étude utilisé à titre heuristique est « l'Anneau des sciences » qui est une voie rapide d'une quinzaine de kilomètres prévue pour 2028 qui viendrait boucler entièrement le périphérique du Grand Lyon en reliant les zones d'activités de l'ouest lyonnais.

2. La deuxième partie porte sur l'exploration des liens entre structures des réseaux routiers et localisations commerciales. Les dynamiques commerciales sont très sensibles aux changements d'accessibilité (et donc peuvent être considérées comme des précurseurs d'autres dynamiques). Le développement de la motorisation et des réseaux a ainsi conduit depuis plus de 30 ans à de fortes concentrations commerciales en périphérie des villes, avec pour conséquences des pratiques commerciales peu durables, car dépendantes de l'usage de la voiture sur de relativement longues distances à parcourir (les mobilités commerciales pèsent fortement aujourd'hui dans le total des mobilités urbaines). Dans ce contexte général, ici caricaturé à grands traits, l'objectif est de voir quelle est l'influence du réseau routier sur les localisations commerciales (en particulier les commerces de petite taille), en vue d'élaborer un outil d'aide à la décision pour promouvoir des localisations commerciales plus durables. Une première phase consiste, grâce à des méthodes de data mining, à comprendre le rôle de la structure des réseaux routiers sur les localisations commerciales. Une fois ces règles extraites, une application informatique a été créée de façon à modifier le réseau routier en fonction de règles topologiques (augmentation de la connectivité, limitation de la taille des mailles par exemple). Ces modifications topologiques (définies grâce à l'extraction des règles réalisée en phase 1) sont réalisées afin d'augmenter le potentiel pour l'implantation de commerces de façon à limiter leur concentration. L'approche permet donc l'aide à la décision pour des implantations commerciales, en focalisant sur le rôle déterminant de la structure du réseau routier. Le terrain d'étude porte sur la métropole azurienne et les travaux ont été réalisés par l'UMR ESPACE en collaboration avec l'École Polytechnique de Milan.

3. La troisième partie adopte un angle plus comportemental. Il s'agit d'explorer les liens entre métriques des réseaux (i.e. les formes d'accessibilité), comportements de mobilité et durabilité. L'objectif est de voir quel type de réseau est plus propice à une mobilité moins automobile. La méthode se base sur l'utilisation du système multiagents Matsim de l'ETH Zurich. Dans ce simulateur, les individus (les agents) ont un programme d'activités quotidiennes à réaliser et cherchent à maximiser leur utilité individuelle en choisissant tel ou tel mode de transport, telles routes, tels horaires ou encore de fréquenter tels ou tels lieux. (quand ce choix est permis). Grâce à ce simulateur, on peut donc étudier le rôle de la structure du réseau routier sur les choix des agents pour savoir si certains réseaux sont intrinsèquement plus favorables que d'autres à une mobilité plus durable.

Malheureusement, un réseau peut intrinsèquement favoriser un meilleur partage modal, mais ne pas satisfaire les agents qui voient leur utilité individuelle diminuer (par exemple parce que les vitesses ont baissé). Aussi, dans un deuxième temps Matsim a été couplé avec des méthodes de localisations optimales issues de la recherche opérationnelle pour étudier dans quelle mesure la combinaison : modification des réseaux + relocalisation d'aménités pouvait permettre tout à la fois de tendre vers une mobilité plus durable, tout en satisfaisant l'utilité individuelle des agents. Les agents n'ayant pas tous les mêmes caractéristiques sociodémographiques et de programmes d'activités, il est possible de discriminer gagnants et perdants pour les différents scénarios d'aménagement réalisés. Ce simulateur, développé en collaboration entre l'UMR ESPACE, le LIA et l'ETH Zurich, offre ainsi un outil très opérationnel permettant une vision intégrée transport-urbanisme pour une planification urbaine plus durable. Le terrain d'étude est l'agglomération de Zurich en raison de la disponibilité des données nécessaires aux simulations.

4. La quatrième partie se propose de changer d'échelle pour explorer le lien entre structures des réseaux routiers et dynamiques de localisation à l'échelle métropolitaine. L'objectif est ici de savoir comment la métrique des réseaux routiers à l'échelle métropolitaine agit sur la dynamique des réseaux de villes. Ce changement d'échelle est important, car si la recherche de la proximité (compacité densité) est un objectif relativement partagé à l'échelle urbaine, il n'en est pas de même à l'échelle des réseaux de villes : doit-on ou pas encourager la constitution de réseaux de villes très hiérarchisés ou au contraire une distribution plus homogène des populations et comment y parvenir ? Pour aborder cette vaste question, l'angle de travail est le suivant. Il s'agit tout d'abord d'élaborer un indicateur de « pression urbaine » qui indique où le développement de l'urbain, en lien avec les stratégies de localisation des ménages, est le plus probable. Cet indicateur de pression va dépendre de la localisation de la ville considérée dans le réseau de villes et de l'intensité des relations qu'elle entretient avec les autres villes, relations qui dépendent, dans une logique gravitaire, à la fois des populations en présence, mais aussi des distances et donc des réseaux de transport. L'indicateur de pression dépendra aussi des possibilités effectives d'extension qui sont conditionnées à la présence de zones urbanisables. Une fois le modèle de simulation permettant d'établir où s'exerce la pression urbaine à l'échelle métropolitaine, on peut simuler des changements de réseaux (ajout d'infrastructure, modification de vitesse) pour en étudier l'impact sur la distribution de la pression urbaine. On cherche donc à savoir dans quelle mesure différents types de réseaux routiers peuvent conduire à des distributions différentes de pression urbaine et donc in fine de croissance urbaine. Le terrain d'étude est la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et le travail a été réalisé par l'UMR ESPACE.

Problématique générale : Quelle(s) structure(s) des réseaux routiers pour quelle(s) accessibilité(s), quelle(s) dynamique(s) de localisations et quelle durabilité des territoires urbains ?
--

Bibliographie

- Breheny M., 1992: "The contradictions of the compact city. A review", in Breheny M. (dir), *Sustainable Development and Urban Form*, Pion, London.
- Banister D., Watson S., Wood C., 1997 : "Sustainable cities : transport, energy and urban form". *Environment and Planning B*, 24, pp.125-145
- Camagni R., Gibelli M.C., 1997 : *Développement urbain durable : quatre métropoles européennes à l'épreuve*, Paris, éd. de l'Aube.
- Cavailhès J, Frankhauser P, Peeters D, Thomas I, 2004, "Where Alonso meets Sierpinski: an urban economic model of a fractal metropolitan area", *Environment and Planning A* 36(8), pp. 1471-1498
- Dupuy G., (1999). *La dépendance automobile*. Paris, Economica, 161 p.
- Frankhauser P., Genre-Grandpierre C. 1998 : « La géométrie fractale un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 33, pp. 41-79.
- Huriot J.-M. (dir), 1998 : *La ville ou la proximité organisée*, Économica, Paris.
- Huriot J.-M., Thisse J.-F. 2000 : *Economics of Cities. Theoretical Perspectives*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Prud'homme, R., 2006, Développement urbain : les nouvelles contraintes, Institut Véolia Environnement, <http://www.institut.veolia.org/fr/cahiers/developpement-urbain/>
- Prud'homme R., Lee C. 1999 : « Size, sprawl, speed and the efficiency of cities, *Urban Studies*, 36(11), pp.1849-58
- Korsu E., Massot M.-H. et Orfeuil, J.-P. 2012 : *La ville cohérente. Penser la proximité autrement*, Paris : La Documentation Française.
- Thomas I., *Transportation networks and the optimal location of human activities: a numerical geography approach*. Transport economics, management, and policy ». Cheltenham, UK: E. Elgar, 2002.
- Wiel M. 1999 : *La transition urbaine*, Paris, Mardaga
- Wiel M. (2002). *Ville et automobile*. Paris, Descartes et Cie.

2. Vitesse VS localisations pour quelle accessibilité ?

Contact : Cyrille Genre-Grandpierre - UMR 7300 ESPACE :

cyrille.genre-grandpierre@univ-avignon.fr,

Objectif : voir dans quelle mesure il est possible d'atteindre de bons niveaux d'accessibilité en milieu urbain en jouant sur la localisation des aménités plus que sur les vitesses de circulation ou la construction d'infrastructures. La question de l'évaluation des infrastructures est donc posée de manière « originale » en cherchant à savoir comment s'en passer ? Dit autrement, on cherche à savoir si l'investissement dans une bonne politique d'aménagement peut se substituer à l'investissement dans la politique de transport.

2.1. introduction

Pendant longtemps, l'évaluation coûts-bénéfices des nouvelles infrastructures routières de transport s'est très largement basée sur l'estimation des gains de temps générés par ces infrastructures (« les gains de temps représentent 80 à 90 % des avantages mesurés par les évaluations socioéconomiques des grands projets » ; Boiteux, 2001). Caricaturalement, ces gains de temps sont monétarisés, pour estimer, à échéance donnée, si l'infrastructure est, ou pas, « rentable ».

Aujourd'hui, les processus d'évaluation se veulent beaucoup plus complets et cherchent notamment à analyser les effets territoriaux des infrastructures en commençant par mesurer les changements d'accessibilité qu'elles induisent¹. C'est particulièrement vrai, pour l'accessibilité à l'emploi qui est une des principales qualités de la ville et conditions de sa compétitivité (Prud'Homme, 1999), eu égard à l'émergence des économies d'agglomération et d'urbanisation qu'elle permet. Dans cette approche, la localisation des points de mesure de l'accessibilité (ex les domiciles) et des ressources (ex les emplois) sont données, de même que le réseau de transport considéré comme fixe, à l'exception de la nouvelle infrastructure (Crozet *et al.*, 2013). Une fois la mesure des changements d'accessibilité appréhendée, on peut chercher à en modéliser les effets à terme sur l'utilisation du sol et plus précisément sur la localisation des ménages et activités, comme le font les modèles LUTI land-use transport integrated (Simmonds *et al.*, 1999), tel que Pirandello (Piron, Delons, 2008).

Quelle que soit l'approche, le principe général consiste à analyser les effets de la nouvelle infrastructure soit sur l'accessibilité, soit sur le développement urbain, plus qu'à réellement en tester la pertinence en se posant par exemple la question de savoir à quelles conditions, notamment en termes d'agencement urbain, on pourrait se passer de cette infrastructure tout en obtenant des résultats du même ordre en termes d'accessibilité. En effet, depuis des décennies, la recherche de cette bonne accessibilité à l'emploi (cf. le concept d'accessibility planning), gage d'une bonne adéquation entre l'offre et la demande, profitable tant aux entreprises qu'aux salariés (l'accessibilité à l'emploi est très directement reliée au taux de chômage, Mignot, Rosales-Montano, 2006), est essentiellement passée par l'amélioration des

¹ L'accessibilité se définit comme la facilité depuis un lieu pour atteindre un (des)autre(s) lieu(x) ou une ressource localisée.

conditions de transport et plus précisément par l'augmentation de la vitesse des déplacements grâce à l'amélioration des infrastructures, particulièrement les routes. La vitesse est souvent posée comme un préalable pour obtenir de l'accessibilité et pour le développement des villes. Or, aujourd'hui, avec des ressources publiques plus réduites et dans un contexte où la problématique du développement durable est plus prégnante et va notamment de plus en plus de pair avec des aspirations à plus de lenteur pour des raisons de sécurité, de limitation des émissions de polluants, mais aussi pour la recherche de fonctionnements territoriaux davantage basés sur la proximité plus que sur la vitesse (cf. par exemple le concept de ville des courtes distances ou encore ville-intense de Lille Métropole), la construction de nouvelles infrastructures rapides paraît de plus en plus difficile, mais sans pour autant que l'on veuille renoncer à l'accessibilité.

L'accessibilité dépendant certes de la vitesse (accéder vite à des lieux ou ressources), mais aussi, comme on a trop tendance à l'oublier, de la localisation des aménités (avoir la ressource à proximité), l'objectif de ce travail est de voir dans quelle mesure il est possible d'évaluer la pertinence d'une infrastructure routière (ou toute autre politique de transport), non en simulant les effets, mais en voyant dans quelle mesure il est possible de s'en passer en jouant sur les localisations pour obtenir les mêmes effets en termes d'accessibilité. Formulé autrement, il s'agit de savoir dans quelle mesure il est possible de rendre l'accessibilité moins dépendante de la vitesse automobile, d'avoir les mêmes effets bénéfiques sur l'accessibilité que ceux qu'apporterait la mise en place d'une infrastructure rapide, mais en jouant sur les localisations. La logique rejoint donc celle de la « ville cohérente » (Korsu et al., 2012) puisqu'il s'agit de jouer sur les proximités pour atteindre de bons niveaux d'accessibilité.

A titre heuristique, le travail porte sur le cas de l'Anneau des Sciences (ADS) du Grand Lyon qui est une infrastructure autoroutière prévue pour 2028 visant à relier différentes zones d'activités scientifiques de l'Ouest de l'agglomération (Grand Lyon, 2012) en vue d'améliorer l'accessibilité.

La méthode consiste à calculer et à comparer pour chacun des 744 iris du Grand Lyon l'accessibilité à l'emploi pour différents scénarios de transport et de localisation des emplois notamment :

- La localisation de l'emploi prévue en 2030 dans les prospectives du Grand Lyon sans l'ADS
- La localisation de l'emploi prévu en 2030 dans les prospectives du Grand Lyon avec l'ADS
- La localisation de l'emploi de 2030 optimisée de façon à maximiser l'accessibilité moyenne des IRIS sans l'ADS
- La localisation de l'emploi optimisée de façon à maximiser l'accessibilité moyenne des IRIS avec l'ADS
- Les mêmes scénarios que précédemment, mais en se basant sur la localisation de l'emploi en 2010.

Ces scénarios sont par ailleurs testés avec les temps de transports actuels, mais aussi en simulant des augmentations de ces temps de 15 à 30 %. Il s'agit ici de tester la sensibilité des niveaux d'accessibilité obtenus par relocalisation à des baisses de vitesses. On cherche ici à savoir s'il est possible d'avoir « une ville lente, mais accessible ».

Méthodologiquement, l'accessibilité gravitaire à l'emploi est calculée grâce à la plateforme MOSART développée par la Laboratoire d'Economie des Transports de Lyon (Bonnaïous *et al.*, 2010). La relocalisation optimale des emplois se fait en utilisant un programme développé ad hoc par le Laboratoire d'informatique d'Avignon dans le cadre de ce projet. Il utilise les outils de la recherche opérationnelle.

La relocalisation des emplois (ou de toute autre aménité sachant que l'emploi n'est pris ici qu'à titre heuristique, mais qu'on peut de la même manière relocaliser n'importe quelle ressource : commerces, services, etc.) peut se faire soit :

- en cherchant à maximiser l'accessibilité moyenne
- soit en cherchant le nombre minimum de relocalisations à effectuer en partant d'une situation donnée pour atteindre un certain niveau d'accessibilité (par exemple celui fourni par l'ADS en 2030). Dans ce processus, les IRIS ont alors, ou pas, des capacités limitées pour recevoir de nouveaux emplois.

Après un rappel sur le calcul de l'accessibilité gravitaire et son utilisation dans une approche classique, qui compare l'accessibilité avant et après la mise en place de l'infrastructure routière, nous présenterons la méthode de relocalisation utilisée puis les résultats obtenus pour les différents scénarios.

2.2. L'accessibilité gravitaire à l'emploi dans le Grand Lyon avec et sans l'Anneau des Sciences

2.2.1. L'accessibilité gravitaire

L'accessibilité locale exprime la facilité avec laquelle une ressource (emplois) ou des lieux peuvent être atteints au départ d'un lieu i à l'aide d'un système de transport donné. L'accessibilité dépend donc à la fois de l'organisation spatiale (la distribution de la ressource) et de la qualité du système de transport qui offre la possibilité d'accéder plus ou moins facilement aux différents lieux abritant la ressource (Geurs and Wee, 2004). La facilité d'accès peut être exprimée de différentes façons selon les problématiques. L'accessibilité peut par exemple être donnée par la distance minimale (mesurée en kilomètres, temps ou toute autre unité de mesure de distance) pour joindre au départ d'un lieu i la ressource la plus proche, ou par la distance qui permet d'accéder à $x\%$ de la ressource, ou encore par la somme des distances permettant de joindre tous les lieux où la ressource est localisée etc. Dans ce travail nous utiliserons la mesure dite d'accessibilité gravitaire qui permet au départ d'un lieu i de relativiser l'intérêt de la ressource présente en j en fonction de sa quantité et de la distance entre i et j . Au départ de i , plus la ressource en j est importante et proche, plus elle contribuera fortement à la qualité de l'accessibilité mesurée en i .

L'accessibilité gravitaire mesurée en i s'écrit ainsi :

$$A_i = D_j \exp(-\beta C_{ji})$$

Avec A_i l'accessibilité en i (ici le centre des IRIS),

D_j la ressource présente en j (ici les emplois),

β un paramètre traduisant la sensibilité au coût généralisé du déplacement (0.18)

C_{ji} le coût généralisé du transport entre i et j qui est donné par :

$$C_{ji} = Cm_{ij} + T_{ij} * VdT$$

Avec Cm_{ij} le coût monétaire qui dépend de la distance en kilomètres entre i et j et d'un coût moyen au kilomètre (incluant le carburant, la maintenance du véhicule et les frais d'assurance) ici fixé à 0.49, T_{ij} le temps de trajet entre i et j aux heures de pointe et VdT la valeur du temps par heure telle qu'elle est définie par le gouvernement français pour les déplacements urbains (ici 11.4).

2.2.2. Les effets de l'Anneau des Sciences sur l'accessibilité gravitaire

Cette accessibilité gravitaire est tout d'abord utilisée pour voir dans quelle mesure l'Anneau des Sciences est susceptible d'améliorer l'accessibilité à l'emploi à l'échelle des 777 IRIS du Grand Lyon. Ceux-ci comptent 1647722 habitants pour 803479 emplois en 2010 et les projections sont de 1982833 habitants pour 982775 emplois en 2030. Cette infrastructure de 14.8 km, prévue pour 2028, correspond à la partie ouest de la rocade autoroutière qui relie différentes zones d'activités scientifiques autour de Lyon et qui vise notamment à améliorer l'accessibilité des principaux sites d'activités du Grand Lyon, et à développer les activités dans l'ouest.



Figure 2 le projet d'Anneau des Sciences

Que l'on utilise la distribution des emplois en 2010 ou celle prévue en 2030 par le Grand Lyon, l'ADS améliore logiquement l'accessibilité à l'emploi, mais de façon réduite seulement puisque le gain n'est que de l'ordre de 2% à l'échelle de la métropole.

Précisons que le nombre et la localisation des emplois et le coût de transport au kilomètre sont identiques dans les deux situations avec et sans ADS. Une variation positive de l'accessibilité représente donc une diminution du coût de trajet, due à une diminution des distances ou des temps de trajets.

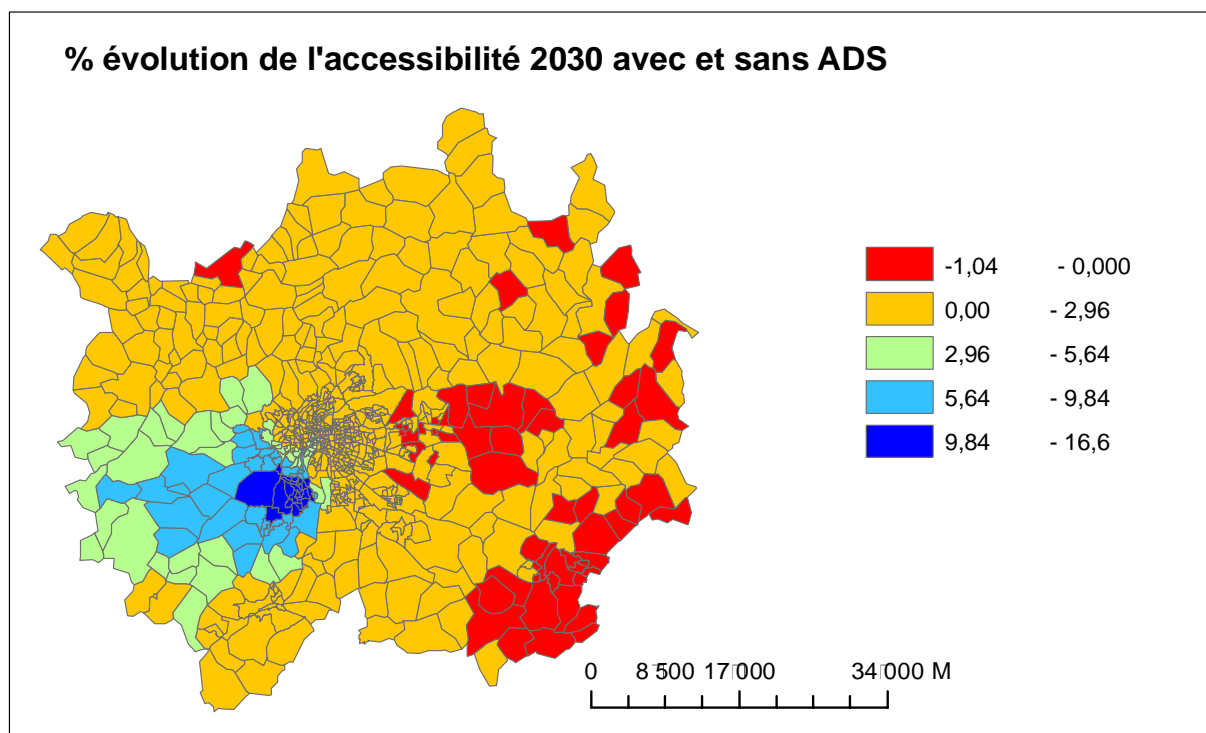


Figure 3 Evolution de l'accessibilité gravitaire à l'IRIS avec l'Anneau des Sciences

Spatialement, on observe que les gains les plus importants se font logiquement à l'ouest de Lyon, à proximité de l'ADS, mais aussi dans les zones plus lointaines qui y sont bien connectées, ce qui permet d'éviter le tunnel sous Fourvière aussi bien pour accéder aux emplois au sud qu'à l'ouest.

A ce gain moyen d'accessibilité relativement réduit, s'ajoute le fait que la mesure de l'accessibilité ne tient ici pas compte du fait que l'usage de cette infrastructure sera payante ce qui devrait en diminuer d'autant l'attractivité pour les usagers. Enfin, il est également connu que ce type d'infrastructure induit en lui-même du trafic (jusque-là contenu en raison de temps de transport trop importants mais qui peut se réaliser une fois l'infrastructure réalisée) ce qui dans les faits peut réduire les gains de temps projetés. Enfin, comme l'ADS ne relie pas le centre de Lyon (contrairement au tunnel sous Fourvière) il est d'un intérêt faible pour les travailleurs se rendant au centre, contrairement à ceux allant à l'ouest dont l'attractivité est renforcée.

L'objet n'étant pas de développer ces problématiques de développement de la métropole lyonnaise en lien avec cette infrastructure, nous utiliserons cette première analyse comme point de repère, notre objectif étant de savoir dans quelle mesure l'apport de l'ADS en termes d'accessibilité (limitée ici à 2% même dans la configuration la plus favorable à savoir pas de

péage ni de trafic induit) peut être obtenu en jouant sur les localisations des emplois. A cette fin, nous présentons tout d'abord la méthode de relocalisation utilisée avant de la tester pour différents scénarios.

2.3. Relocaliser les emplois pour maximiser l'accessibilité : méthode

L'objectif consiste à savoir comment relocaliser les emplois afin de maximiser l'accessibilité moyenne au départ du centre de chaque IRIS ou, a minima, obtenir le même niveau d'accessibilité que celui donné par l'ADS en 2030. La ville est donc vue ici comme un potentiel, une offre (ici d'emplois) dont on veut faciliter l'accès en tout lieu. Cette vision de la ville comme un potentiel, plutôt par exemple que d'analyser les navettes domicile-travail actuelles des travailleurs, puis de chercher à en minimiser la somme des distances, s'inscrit dans une visée prospective et de résilience. On ne sait pas qui va où (ce qui peut changer rapidement), mais on cherche à faciliter l'accès au marché de l'emploi en tout lieu, ce qui permet une adaptation plus aisée de la ville (la nature des emplois, la distribution des travailleurs et leur type peuvent changer, il n'en reste pas moins que le potentiel d'accès est là et qu'il est une des principales qualités urbaines, Glaeser, 2011)

Notons I l'ensemble des Iris, avec $q = |I|$ le nombre total d'Iris. La quantité à faire varier est donc D_j , où $j \in I$, qui donne le nombre d'emplois par Iris. On suppose par ailleurs, qu'il y a un nombre d'emplois total T possible, et que chaque variable D_j est bornée supérieurement par une quantité connue \overline{D}_j .

$$i.e \sum_{j \in I} D_j = T, \text{ et } D_j \leq \overline{D}_j \forall j \in I$$

L'absence de bornes de ce type aurait en effet pour corollaire de concentrer tous les emplois sur l'Iris le mieux positionné. Par la suite, quand $D_j = \overline{D}_j$ nous dirons que l'Iris j est saturé en emplois (a contrario non saturé). Pour chaque Iris $i \in I$, nous savons que l'accessibilité est définie par la quantité suivante :

$$A_i = \sum_{j \in I} D_j \frac{1}{e^{\beta C_{ij}}}$$

Où $C_{ji} = C_{ij} + T_{ij} * VdT$

L'accessibilité moyenne se définit alors par la quantité :

$$\frac{1}{q} \sum_{i \in I} A_i$$

Comme q est une constante, il apparait qu'en termes d'optimisation mathématique, déterminer la localisation maximisant l'expression ci-dessus revient à maximiser uniquement :

$$f(D) = \sum_{i \in I} A_i = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} D_j \frac{1}{e^{\beta C_{ij}}}$$

En permutant les deux sommes ci-dessus, on obtient l'expression équivalente suivante :

$$f(D) = \sum_{j \in I} D_j \left[\sum_{i \in I} \frac{1}{e^{\beta C_{ij}}} \right]$$

Soit $\alpha_j = \sum_{i \in I} \frac{1}{e^{\beta C_{ij}}}$. α_j dépend uniquement des valeurs C_{ij} donc implicitement des temps de transport entre Iris, car à aucun moment n'intervient dans cette expression le nombre d'emplois ou les flux Origine-Destination entre Iris. Cette observation est à l'origine de la relative simplicité de la méthode de calcul des localisations optimales que l'on peut résumer par la proposition suivante.

Proposition 1. Les valeurs D_j ($j \in I$) maximisent la fonction $f(D)$ (i.e accessibilité moyenne) si et seulement si elles vérifient la propriété suivante :

(P) : pour tout Iris j et k , si $\alpha_j > \alpha_k$ alors soit j est saturé (i.e $D_j = \overline{D}_j$) ou $D_k = 0$

Démonstration. La propriété signifie, en d'autres termes, que si la valeur α_j est supérieure à α_k alors la localisation optimale (i.e celle maximisant l'accessibilité moyenne) des emplois saturera l'Iris j ou sinon ne placera aucun emploi dans k . Pour démontrer cette propriété, raisonnons par l'absurde et supposons le contraire. Admettons donc que dans la localisation optimale des emplois, ils existent deux Iris j et k pour lesquels $\alpha_j > \alpha_k, D_j < \overline{D}_j$ (i.e j n'est pas saturé) et $D_k > 0$ (i.e l'Iris k contient des emplois). Dans ce cas, il suffirait de déplacer un emploi de l'Iris k vers j pour augmenter l'accessibilité moyenne de $(\alpha_j - \alpha_k) > 0$. Ce qui est absurde puisque la localisation est supposée optimale. La propriété énoncée dans la proposition ci-dessus, et la preuve qui l'accompagne, conduisent alors à une méthode simple de calcul de la relocalisation optimale. Elle consiste à saturer d'emplois les Iris dans l'ordre décroissant des valeurs α_j . En procédant de la sorte, la propriété (P) est nécessairement vérifiée et les localisations ainsi trouvées optimales.

Cette méthode a été testée avec les données disponibles de 2010 et projetées pour 2030 de la métropole lyonnaise, en prenant en compte plusieurs types de bornes supérieures sur le nombre d'emplois de chaque Iris. Le premier type de borne, appliqué sur les données de 2010, consiste à fixer le nombre maximal d'emplois pouvant être localisés dans un IRIS à la population en 2010 * 1.5. Dans le second type, le maximum est égal à la population de 2030 de chaque Iris. Afin d'éviter que le processus de relocalisation ne vide entièrement certains Iris de leurs emplois, un nombre minimum d'emplois a été considéré pour chaque Iris, sans incidence sur l'optimalité des résultats obtenus. Ce nombre minimum a été fixé à la moitié du nombre d'emplois de l'IRIS en 2010. Précisons que ces valeurs des capacités d'accueil minimum et maximum des IRIS ne font l'objet d'aucune discussion théorique et qu'elles n'existent pas en réalité (le nombre d'emplois d'un IRIS est théoriquement illimité). Toutefois, si elles n'existent pas théoriquement, elles existent de fait dans les pratiques d'aménagement, tant il est peu pensable de vider totalement un IRIS de tous ses emplois, ou au contraire d'en concentrer un très grand nombre au même endroit (fût-ce une zone

d'activité). Les valeurs choisies l'ont donc été à titre heuristique et sont donc discutables, mais elles ne changent rien à la démonstration.

Le modèle développé permet deux types d'optimisation :

- de maximiser l'accessibilité moyenne des IRIS (ou accessibilité totale ce qui revient au même étant donné que le nombre d'IRIS ne change pas). Dans ce cas plusieurs possibilités existent :
 - o soit on peut relocaliser librement tous les emplois. Les résultats de cette option ne seront pas présentés, car ils correspondent mal à la réalité (cf la question des capacités minimums et maximums des IRIS).
 - o soit on donne seulement une capacité d'accueil maximale à chaque IRIS (population en 2010 * 1.5 ou population en 2030)
 - o soit on donne une capacité maximale d'accueil à chaque IRIS (comme ci-dessus), mais aussi un nombre minimum d'emplois afin d'éviter de vider entièrement certains IRIS (seuil = la moitié du nombre d'emplois de l'IRIS en 2010 ou 2030).
- Le modèle développé permet par ailleurs de trouver le nombre d'emplois minimum à ajouter à une situation donnée (ici celle de 2010) et leur distribution spatiale pour atteindre un niveau d'accessibilité donné (ici celui de 2030 avec l'ADS). On cherche donc ici en quelque sorte à minimiser « l'effort », le coût de changement, pour atteindre un niveau fixé d'accessibilité.

L'accessibilité a ensuite été calculée pour ces différentes logiques d'optimisation et pour différents scénarios de transport : temps de transport inter et intra-iris actuels, temps avec l'ADS, temps actuels *1.15 et temps actuels *1.3. Ces deux derniers cas ont pour objectif de voir si de bons niveaux d'accessibilité peuvent être obtenus non seulement en n'augmentant pas la vitesse, mais au contraire en la diminuant. Les temps de transport Iris à Iris sont calculés de centroïde à centroïde, ceux intra-iris ont été estimés en calculant les distances moyennes séparant 50 points tirés aléatoirement par IRIS (soit 2500 valeurs).

Le tableau ci-dessous synthétise une partie des résultats pour les simulations assurant que chaque IRIS aura, suite au processus de relocalisation, au minimum 50% des emplois prévus en 2030, ce qui constitue le cas le plus défavorable en termes d'optimisation de l'accessibilité. Précisons que les résultats suivent la même logique si on laisse la liberté à la méthode d'optimisation de vider totalement certains Iris de leurs emplois, à la différence près que les gains d'accessibilité augmentent encore en moyenne d'une dizaine de pour cent pour les scénarios 21 à 32.

N° Scenario	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Opération	Relocalisation des emplois de 2030											
ADS	Pas d'Anneau des Sciences						Avec l'Anneau des Sciences					
Limite de capacité d'accueil des IRIS	Nombre d'emplois 2010 * 1,5			Population de 2030 de l'IRIS			Nombre d'emplois 2010 * 1,5			Population de 2030 de l'IRIS		
Scenario de vitesse	temps de transports actuels	temps de transport * 1,15	temps de transport * 1,3	temps de transports actuels	temps de transport * 1,15	temps de transport * 1,3	temps de transports actuels	temps de transport * 1,15	temps de transport * 1,3	temps de transports actuels	temps de transport * 1,15	temps de transport * 1,3
Type d'optimisation	Maximiser l'accessibilité moyenne											
% des emplois relocalisés	24%			34,35%			24%			34,35%		
Accessibilité avant (*10 ⁶)	122,55	114,6	107,28	122,55	114,6	107,28	124,92	117,07	109,84	124,92	117,07	109,84
Accessibilité après (*10 ⁶)	148,31	139,14	130,67	152,63	143,37	134,76	151,01	141,98	133,61	155,32	146,2	137,69
Gain accessibilité (en %)	21,03%	21,41%	21,79%	24,54%	25,11%	25,61%	20,88%	21,26%	21,63%	24,33%	24,87%	25,35%

N° Scenario	33	34	35	36	37	38	39	40
Opération	Relocalisation des emplois 2010				Relocalisation emplois minimum(2010,2030)			
ADS	Pas d'Anneau des Sciences							
Limite de capacité d'accueil des IRIS	Nombre d'emplois de 2010 * 1,5	Population de 2030 de l'IRIS	Nombre d'emplois de 2010 * 1,5	Population de 2030 de l'IRIS	Nombre d'emplois 2010 * 1,5	Population de 2030 de l'IRIS	Nombre d'emplois 2010 * 1,5	Population de 2030 de l'IRIS
Type d'optimisation	Maximiser l'accessibilité moyenne		Minimiser le nombre d'emplois à relocaliser pour obtenir l'accessibilité 2030 avec ADS		Maximiser l'accessibilité moyenne		Minimiser le nombre d'emplois à relocaliser pour obtenir l'accessibilité 2030 avec ADS	
Nombre d'emplois ajoutés	179296 (2030-2010)		97738	97360	276278 (2030-min(2030;2010))		170693	169088
Accessibilité avant (*10 ⁶)	106,25				92,34			
Accessibilité après (*10 ⁶)	139,14	140,3	124,92 (=2030 avec rocade)	124,92 (=2030 avec rocade)	141,84	144,6	124,92 (=2030 avec rocade)	124,92 (=2030 avec rocade)
Gain accessibilité (en %)	31,15%	32,24%	17,74%	17,74%	53,58%	56,58%	35,27%	35,27%

Figure 4 Accessibilité à l'emploi pour différents scénarios

2.4. Assurer un bon potentiel d'accessibilité sans vitesse : c'est possible !

2.4.1. Maximiser l'accessibilité moyenne

La comparaison des accessibilités obtenues pour les différents scénarios envisagés montre qu'il est possible de se passer de l'ADS pour fournir un bon niveau d'accessibilité moyen. Par exemple, en relocalisant optimalement 24% des emplois de 2030, on augmente de 19% l'accessibilité obtenue en 2030 avec rocade sans relocalisation (124.92) avec comme contrainte de limiter la capacité d'accueil des IRIS à 1.5 fois le nombre d'emplois de 2010 et en assurant que chaque Iris aura en 2030 au minimum 50% des emplois qu'il avait en 2030 (sans cette dernière contrainte le gain est de près de 30%).

Spatialement le couplage de l'outil de relocalisation avec un système d'information géographique permet de cartographier les résultats. On voit ainsi ci-dessous que le processus de relocalisation des emplois qui maximise l'accessibilité moyenne sur la base des emplois de 2030 (scénario 21) améliore sensiblement la situation des Iris les centraux où se concentre la majorité des emplois relocalisés.

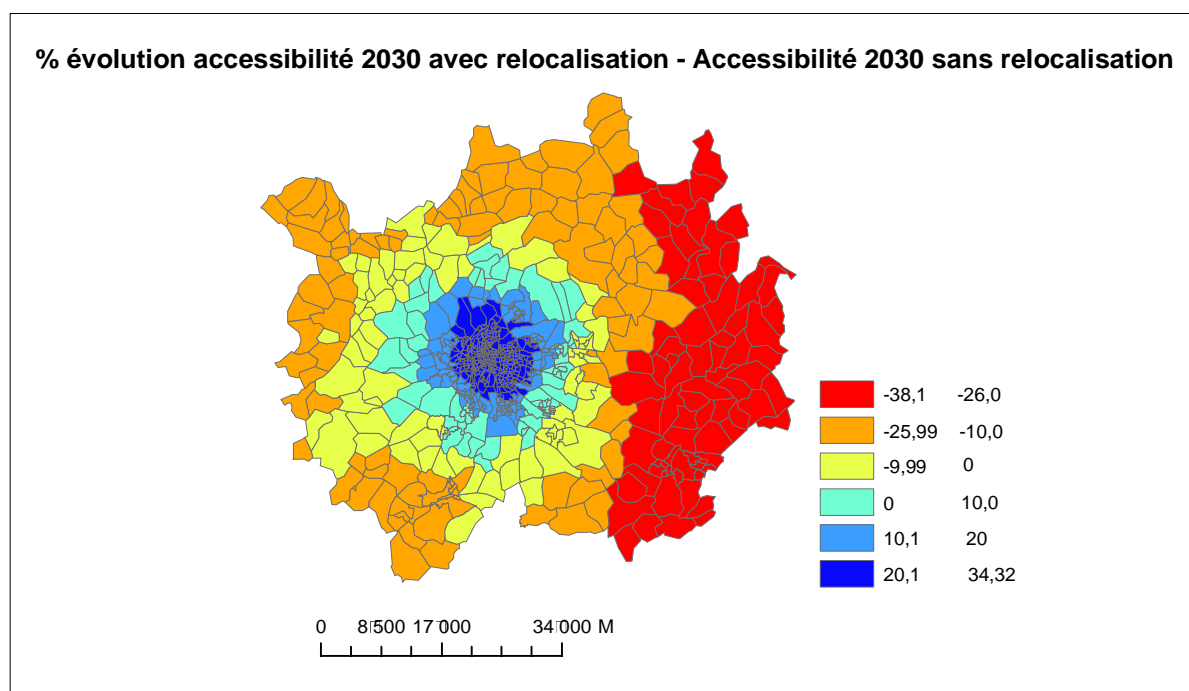


Figure 5 Evolution de l'accessibilité à l'IRIS consécutive au processus de relocalisation des emplois

En moyenne le processus de relocalisation des emplois augmente l'accessibilité d'une vingtaine de pour cent (scénarios de 1 à 30) et même davantage dans les cas où on se donne de liberté sur le nombre d'emplois relocalisables et sur la capacité d'accueil des IRIS. Les plus fortes valeurs d'accessibilité sont ainsi obtenues en limitant la capacité d'accueil des IRIS à la population 2030 ce qui conduit à pouvoir relocaliser 35% des emplois.

On remarque aussi qu'il n'y a pas de proportionnalité directe entre baisse des vitesses et diminution de l'accessibilité. En effet, que ce soit avec ou sans relocalisation la baisse d'accessibilité n'est que de 6% quand on multiplie les temps d'accès par 1.15 et de 12% pour une multiplication par 1.3. Le processus de relocalisation apparaît en outre d'autant plus performant en termes de comparaison de l'accessibilité avant/après que les vitesses sont basses, même si les différences sont faibles (de même la baisse d'accessibilité due à l'augmentation de transport est en moyenne de 1 à 2% moins forte pour les emplois relocalisés que pour les emplois d'origine). L'explication tient au fait que la géographie (i.e. les localisations) ont d'autant plus d'importance que les vitesses sont faibles, car ces dernières ne parviennent alors pas à « lisser » les situations géographiques comme peuvent le faire les hautes vitesses.

On peut aussi voir que le processus de relocalisation permet de sensiblement améliorer l'accessibilité même en présence de la rocade (scénario 27). Relocaliser optimalement 24% des emplois avec l'ADS augmente ainsi de 20% l'accessibilité obtenue avec l'ADS seulement. C'est d'ailleurs logiquement dans cette situation (avec rocade et relocalisation) que les plus fortes valeurs d'accessibilité sont obtenues (151.01).

Si ces résultats qui montrent qu'il est possible d'obtenir le même niveau d'accessibilité qu'avec l'ADS en jouant « seulement » sur la localisation des emplois, ils peuvent toutefois paraître difficilement atteignables concrètement puisqu'ils conduisent à relocaliser entre un

quart et un tiers des emplois selon la marge que l'on se donne quant aux capacités d'accueil des IRIS. Si cette ampleur de relocalisation à horizon 2030 n'est concrètement pas impossible, elle reste toutefois difficile à réaliser, ou du moins le coût du changement risque d'être élevé surtout pour les emplois non tertiaires.

2.4.2. Minimiser les relocalisations à effectuer pour atteindre le niveau d'accessibilité de 2030 avec l'ADS

Aussi, nous intéresserons nous à présent à la deuxième logique d'optimisation, qui cherche à minimiser le nombre d'emplois à relocaliser pour obtenir un niveau d'accessibilité donné (ici celui de 2030 avec ADS) en partant d'une situation donnée (celle de 2010). On note (scénario 35 à 40) que les conclusions précédentes restent valables à savoir que de bons niveaux de potentiel d'accessibilité peuvent être atteints sans ADS.

Ainsi, si on prend comme situation l'emploi de 2010, il « suffit » par exemple de relocaliser optimalement 97738 emplois pour obtenir le niveau d'accessibilité de 2030 avec rocade, toujours dans la situation où les capacités d'accueil des IRIS sont limitées à 1.5 fois l'emploi de 2010 et où chaque iris doit garder 50% des emplois de 2030 (pour mémoire les projections du grand Lyon prévoient une augmentation totale du nombre d'emplois par rapport à 2010 de 179296). Dit autrement, la localisation optimale des premiers 97738 emplois qui vont s'ajouter à la base de 2010 permet d'obtenir la même chose en termes d'accessibilité moyenne que l'ADS.

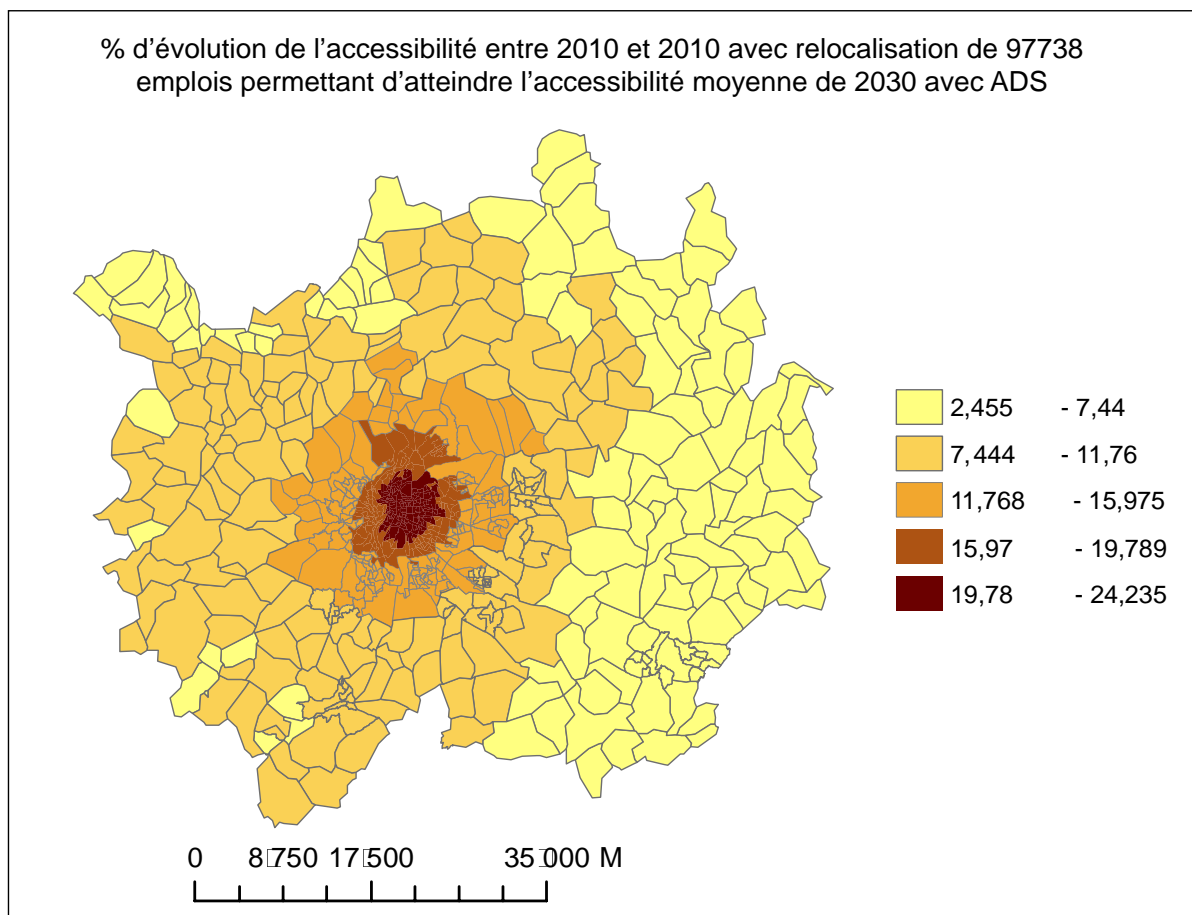


Figure 6 *Atteindre un niveau d'accessibilité donné en minimisant le nombre d'emplois à relocaliser*

Si à présent on relocalise optimalement l'ensemble des 179296 emplois prévus d'ici 2030 à partir de la situation 2010 alors on améliore l'accessibilité de 2030 avec ADS de 11.5%.

Un autre cas de simulation a consisté à prendre comme situation de départ de l'emploi non pas celle de 2010 stricto sensu, mais une situation virtuelle donnant à chaque Iris le nombre minimum d'emplois qu'il a en comparant les valeurs 2010 ou 2030. Ce scénario revient à avoir à relocaliser 276278 emplois plutôt que 179296. Avec cette situation, qui offre plus de marge pour l'optimisation et qui vise à tenir compte du fait que des emplois vont s'ajouter, mais aussi qu'un certain nombre vont se déplacer, l'amélioration de l'accessibilité est encore plus sensible (13,5% par rapport à la situation 2030 avec rocade ou 15,7% par rapport à l'accessibilité de 2010).

Spatialement, les emplois relocalisés de façon à atteindre l'accessibilité de 2030 avec ADS, le sont dans les petits IRIS du centre de l'agglomération, qui sont ceux pour qui chaque ajout d'emplois augmente le plus l'accessibilité moyenne. Ceci s'explique tout d'abord par leur localisation (ils sont en moyenne les plus accessibles), et par leur taille et leur nombre. Comme ils sont petits et concentrés l'algorithme de relocalisation les privilégie, car c'est là que chaque emploi supplémentaire contribue le plus à l'augmentation de l'accessibilité moyenne étant donné que ces IRIS centraux ont de nombreux voisins accessibles. Cette relocalisation au centre s'explique aussi par un effet de bord. En effet, plus on va en périphérie moins les IRIS ont de voisins à une distance donnée (on sort de la zone d'étude) ce qui les rend moins attractifs pour le processus de relocalisation. Pour limiter ce problème classique, il serait possible de collecter des données à une échelle plus large pour replacer chaque IRIS dans son contexte spatial. Précisons que ce problème n'est pas seulement technique, mais qu'il est aussi un problème en aménagement du territoire, où très souvent on « ignore » ce qui est à côté du territoire à aménager, secteur sur lequel les aménageurs n'ont pas la main (les PLU voisins, ou encore les SCOT s'élaborent par exemple en grande majorité indépendamment les uns des autres, les PLUi et l'interscot étant encore embryonnaires).

Outre la collecte de données à des échelles plus larges pour limiter l'« effet centre », lié au découpage, une autre possibilité consisterait à utiliser un découpage parfaitement homogène sous forme de grille par exemple, à l'image des données carroyées de l'INSEE. Ici la difficulté tient à la l'élaboration des données puisqu'il faut être en mesure de désagréger à des échelles plus fines les données des IRIS périphériques et d'au contraire les agréger pour les IRIS les plus centraux, avec dans les deux cas un processus qui assure des données de qualité. Plutôt que de tester cette possibilité qui ne pose pas de difficulté majeure autre que la collecte des données, nous avons choisi ici de présenter deux autres façons de limiter l'effet centre vu plus haut.

La première consiste à introduire dans l'algorithme de relocalisation les populations présentes dans chaque IRIS. Il ne s'agit plus de maximiser l'accessibilité moyenne (algorithme qui ne tient pas compte des populations en présence), mais de faire en sorte que la population qui profite de bons niveaux d'accessibilité soit la plus nombreuse possible. Plutôt que de maximiser l'accessibilité moyenne, on maximise alors l'accessibilité moyenne pondérée par la population de chaque IRIS. La logique de l'optimisation est donc différente de celle vue jusqu'à présent, puisqu'il ne s'agit plus de maximiser un potentiel théorique d'accès à

l'emploi en tout lieu, mais de tenir compte de la structure actuelle du territoire et plus spécifiquement de la distribution de la population, pour maximiser la population ayant un bon niveau d'accessibilité.

La seconde, qui revient peu ou prou à travailler avec un découpage de taille homogène, cherche à tenir compte de la surface des IRIS. L'algorithme cherche alors à maximiser le fait que n'importe quelle portion du territoire, n'importe quel mètre carré, bénéficie du meilleur niveau d'accessibilité possible. On maximise alors le niveau « d'accessibilité surfacique » c'est-à-dire l'accessibilité pondérée par la surface de l'IRIS.

Le tableau ci-dessous donne des exemples de résultats pour la relocalisation de l'emploi 2030 sans ADS avec des capacités maximums des IRIS limitées à 1.5*emploi 2010 et des seuils minimums d'emplois de 0.5 emploi 2030.

	Accessibilité avant la relocalisation	Accessibilité après la relocalisation	Gain	Gain pour cette relocalisation calculée pour l'accessibilité gravitaire standard	taux de relocalisation de l'emploi
Maximisation de l'accessibilité moyenne	1,2255 *10 ⁶	1,48 *10 ⁶	21%	21%	24%
Maximisation de la population 2030 ayant un bon niveau d'accessibilité (accessibilité pondérée par la population des IRIS)	186637713	226654029	21,44%	15,80%	23%
Maximisation de "l'accessibilité surfacique" (accessibilité pondérée par la surface des IRIS)	68387138	83288928	21,80%	-8,70%	18%

Figure 7 *Relocalisation et évolution de l'accessibilité selon son mode de calcul*

On peut voir que le processus de relocalisation optimale, quelle que soit sa logique, améliore l'accessibilité dans tous les cas d'une vingtaine de % pour une relocalisation d'un petit quart des emplois. Le calcul systématique de l'évolution de l'accessibilité gravitaire pour les relocalisations correspondantes aux différentes logiques de maximisation de l'accessibilité (population et surface) montre, pour ce scénario, que si la maximisation de l'accessibilité pondérée par la population va de pair avec un accroissement de l'accessibilité gravitaire, ce n'est pas le cas de la maximisation de l'accessibilité surfacique. En effet, dans ce cas pour compenser la grande taille et la périphéricité des IRIS aux marges de l'agglomération, l'algorithme de relocalisation y localise de nombreux emplois, diminuant alors d'autant l'accessibilité gravitaire moyenne standard que l'on a vu être « portée » par les IRIS centraux. La carte ci-dessous illustre cette perte d'emplois, et par conséquent d'accessibilité, des petits IRIS centraux lorsque l'on cherche à maximiser le niveau d'accessibilité de n'importe quel mètre carré du territoire.

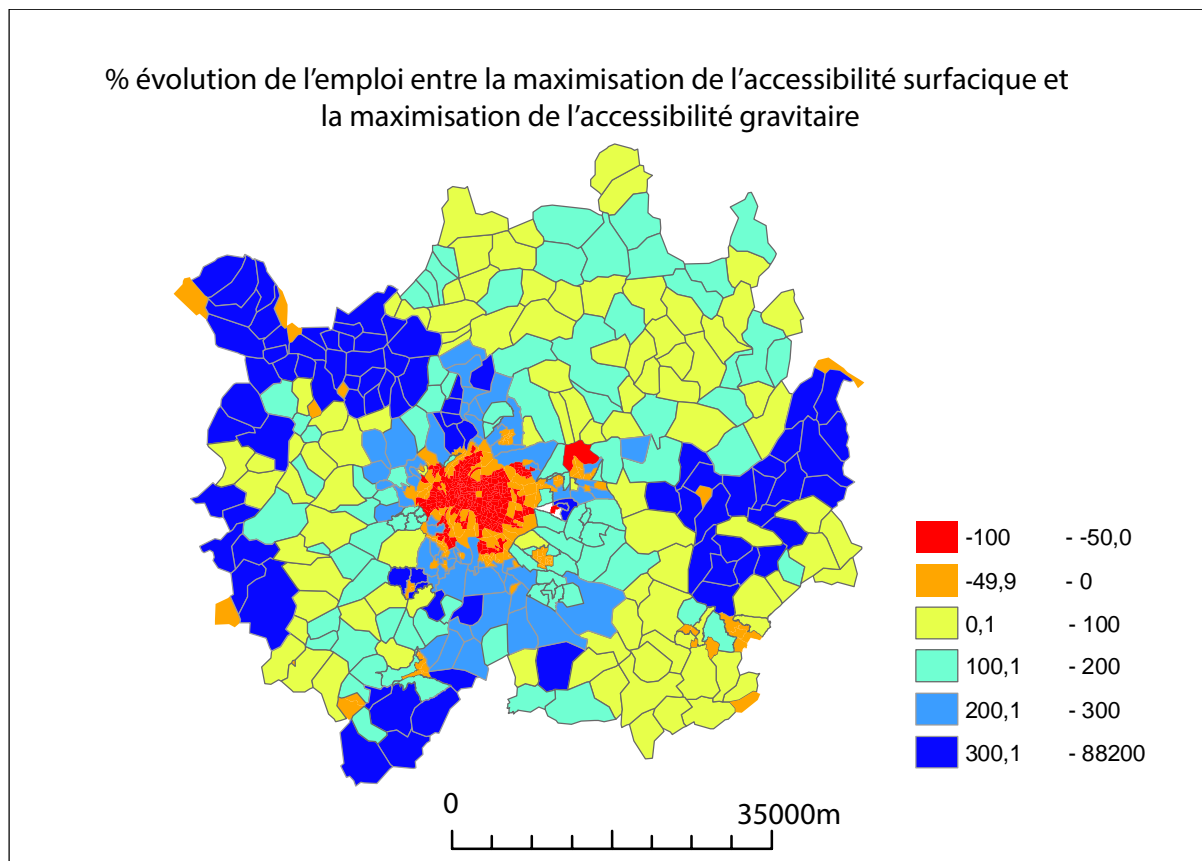


Figure 8 *Relocalisation de l'emploi 2030 en maximisant le niveau d'accessibilité pour chaque mètre carré du territoire*

Enfin, outre les possibilités de maximiser différents types d'accessibilité et de choisir si tout ou partie des emplois peuvent être relocalisés, le logiciel développé permet aussi dans une logique exploratoire et heuristique de produire des courbes synthétisant un ensemble de simulations telles que

- l'évolution de l'accessibilité moyenne (quelle qu'en soit le mode de calcul) en fonction de la baisse ou hausse des vitesses. Pour la maximisation de l'accessibilité gravitaire moyenne, on voit par exemple sur la courbe ci-dessous qu'une multiplication par 1.5 des temps de transport correspond à une baisse de 20% de l'accessibilité, ce qui, dit autrement, signifie que les localisations pèsent davantage en termes d'accessibilité que la vitesse

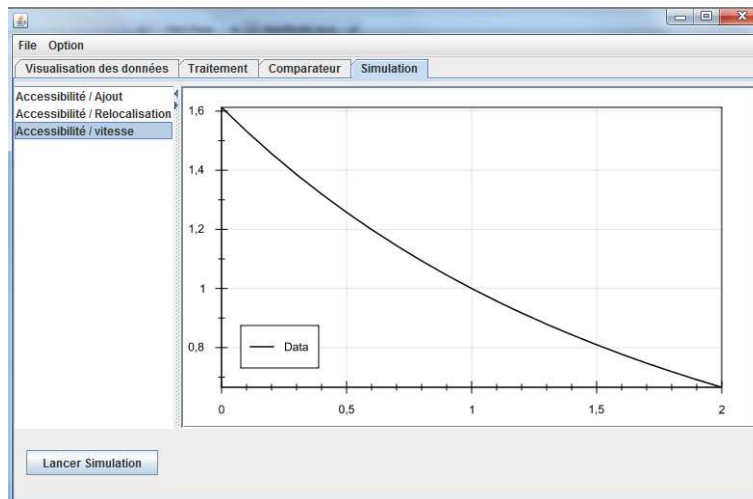


Figure 9 *Vitesse et accessibilité*

- ou encore le gain d'accessibilité en % en fonction du % d'emplois que l'on relocalise. Toujours pour la logique de maximisation de l'accessibilité gravitaire, on note ici que ce gain n'est pas directement proportionnel au pourcentage d'emplois relocalisés puisque la courbe n'est pas une droite. Ainsi, c'est pour une relocalisation portant sur moins de 40% des emplois, que le bénéfice relatif en termes d'accessibilité est le plus important.

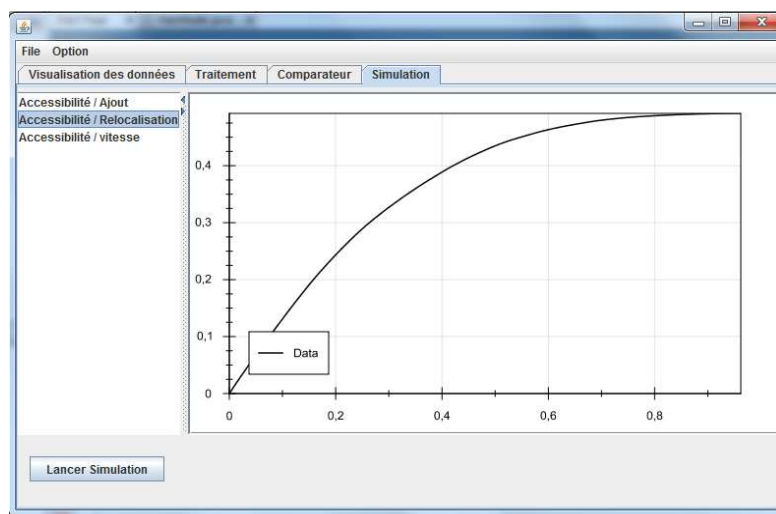


Figure 10 *Relocalisation et accessibilité*

2.5. Conclusion

L'accessibilité est faite de vitesse, mais aussi est surtout de localisations. C'est ce que les simulations réalisées ont permis de montrer puisque les gains d'accessibilité dus à l'Anneau des Sciences (2%) apparaissent très faibles au regard de ceux possibles en jouant sur la localisation des emplois. Les simulations réalisées en augmentant les temps de transport de 15 et 30% ou encore la figure 9 retranscrivent également cette idée puisqu'on peut y voir qu'il n'y a pas de proportionnalité directe entre vitesse et accessibilité. Certes, et c'est logique, la vitesse améliore l'accessibilité, mais les gains obtenus peuvent l'être sans infrastructure avec des relocalisations relativement limitées (97000 emplois). Précisons ici que pour être plus précise, l'évaluation de l'accessibilité après relocalisation, devrait se baser sur le calcul de

temps de transport intégrant les flux inhérents aux relocalisations de l'emploi. Si cela ne pose pas de difficulté technique grâce aux plateformes telle que Mosart ou aux simulateurs de transport basés sur des systèmes multi-agents tel que Matsim (Balmer et al., 2009), cela pose en revanche des difficultés liées à la collecte des données puisqu'il est nécessaire de disposer de nouvelles (et coûteuses) matrices origines-destinations.

Plus que la construction d'infrastructure, la relocalisation des emplois paraît susceptible de redistribuer en profondeur les niveaux d'accessibilité des lieux et d'en augmenter très sensiblement le niveau (+25%). Logiquement plus on se donne de liberté sur l'ampleur des relocalisations possibles, plus les niveaux d'accessibilité s'accroissent.

Conséquemment à sa définition et à son mode de calcul, la maximisation de l'accessibilité moyenne tend à privilégier les zones les plus centrales en termes de relocalisation de l'emploi. Si toutefois, on ne souhaite pas trop concentrer l'emploi dans les zones les plus accessibles, il est possible, mais en changeant de logique, pour tenir davantage compte des structures spatiales actuelles, de maximiser la population ayant de bons niveaux d'accessibilité ou encore, et l'effet est plus important, de maximiser le niveau d'accessibilité de chaque mètre carré du territoire, ce qui conduit à relocaliser l'emploi dans les zones périphériques pour compenser le poids de la géométrie euclidienne.

Par ailleurs, même en cherchant à maximiser l'accessibilité gravitaire moyenne, on peut potentiellement éviter que le processus de relocalisation ne privilégie trop les zones les plus centrales. Il faudrait alors intégrer dans l'objectif d'optimisation, un coût de relocalisation dépendant de la localisation géographique de l'Iris, ce qui avantagerait les IRIS périphériques si on suppose que ce coût est plus fort au centre qu'en périphérie (notamment en raison des prix du foncier et de l'immobilier). Cette possibilité existe d'ores et déjà mais nécessite des données sur le marché foncier qui restent peu accessibles.

Si les résultats présentés pour différents scénarios pour le cas de l'Anneau des Sciences peuvent être discutés, notamment la fixation des capacités maximales et minimales des IRIS en termes d'emplois, il n'en reste pas moins que l'approche et l'outil exploratoire développés offrent de très intéressantes perspectives et possibilités. Pour de l'accessibility planning tout d'abord, puisqu'il offre la possibilité de relier les niveaux d'accessibilité, les localisations et la vitesse, mais aussi, dans le processus d'évaluation des infrastructures de transport, puisqu'il permet de savoir comment obtenir, grâce à des relocalisations, le même gain en termes d'accessibilité que celui dû à une infrastructure. Ici la principale difficulté n'est pas technique, mais réside dans le fait d'être capable d'évaluer le coût de localisation ou relocalisation d'un emploi.

Précisons enfin qu'un ajout de fonctionnalité est en cours de réalisation et qu'il s'agit de trouver les localisations qui minimisent la variance en termes d'accessibilité des unités spatiales considérées. On ne cherche donc pas les répartitions qui maximisent l'efficacité globale, mais l'équité spatiale.

Bilan:

Ce travail sur la composition de l'accessibilité a permis de montrer :

- que les localisations pèsent davantage dans le pattern et le niveau moyen de l'accessibilité que les vitesses de déplacement

- une baisse des vitesses ne revient donc pas à systématiquement condamner les niveaux d'accessibilité

- ces résultats doivent encourager l'accessibility planning à s'intéresser davantage aux localisations qu'aux vitesses et infrastructures qui y sont liées, et plus particulièrement en ce qui concerne les niveaux d'accessibilité à l'emploi, à sa concentration dans des zones d'activités, qui est un facteur majeur de l'importance de la longueur des navettes domicile-travail et des niveaux très relatifs d'accès à l'emploi au départ des domiciles.

- on a pu aussi voir que plus on se donne de degrés de liberté pour localiser les emplois, plus il est possible de se passer d'infrastructures pour atteindre de bons niveaux d'accessibilité. Ce point plaide donc pour des PLU « plus permissifs » ou à tout le moins assurant une bonne mixité des fonctions.

- que le pattern général de l'accessibilité reste déterminé par la géométrie euclidienne : le centre restant plus accessible que les périphéries. Ce sont donc les localisations les plus centrales qui contribuent le plus à l'augmentation de l'accessibilité généralisée. Toutefois, en changeant la nature de l'accessibilité à maximiser pour maximiser la population actuelle bénéficiant de bons niveaux d'accessibilité (on s'éloigne alors de l'idée de potentielle pour davantage prendre en compte les structures territoriales actuelles) ou encore à faisant en sorte dans une visée d'équité spatiale, que chaque m² du territoire bénéficie de la meilleure accessibilité possible, alors la relocalisation des emplois est fortement modifiée et peut profiter, selon les cas, aux zones périphériques.

Méthodologiquement le logiciel mis au point constitue un outil opérationnel, peu gourmand en données, qui peut être utilisé dans une perspective exploratoire tant pour de l'accessibility planning que pour de l'évaluation d'infrastructure de transport.

2.6. Bibliographie

Balmer, M., M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre and K. Nagel, 2009 : MATSim-T: Architecture and simulation times, in A. L. C. Bazzan and F. Klügl (eds.) *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, 57–78, Information Science Reference, Hershey.

Boiteux M., 2001 : Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Commissariat Général du Plan, la Documentation Française.

Bonafous, A., & Crozet, Y., & Mercier, A., & Ovtracht, N., & Puech, F., & Péguay, P-Y. (2010). MOSART et le projet PLAINSUD : une plate-forme de modélisation et de simulation de l'accessibilité pour l'aide à la décision et l'aménagement du territoire. In *Modéliser la ville*, J-P. Antoni (sous la direction de), Economica.

Crozet, Y., & Mercier, A., & Ovtracht, N. (2013). MOSART : Les politiques de mobilité urbaine à la lumière de l'accessibilité, *Transports*, 479, 9-16.

Genre-Grandpierre C. (dir.), 2012 – 2015 : DAMA « vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile » MEDDTL, PREDIT G06 Politiques de Transport

Geurs, K.T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography* 12, 127-140.

Glaeser E., 2011 : *Des villes et des hommes. Enquête sur un mode de vie planétaire*, Flammarion, 364 p.

Grand Lyon & Conseil Général du Rhône. (2012). *Débat public Anneau des Sciences, le dossier*, 132p. Disponible sur <http://www.debatpublic-anneau-top.org/docs/documents-maitre-ouvrage/dossier-mo-ads-top-121102-.pdf>, 25 sept. 2013.

Korsu E., Massot M.-H. et Orfeuil, J.-P. 2012 : *La ville cohérente. Penser la proximité autrement*, Paris : La Documentation Française.

Mignot D., Rosales-Montano S., 2006 : *Vers un droit à la mobilité pour tous*, La Documentation Française

Piron V., Delons J., 2008 : Pirandello, un nouvel outil d'aide à la décision, *Transports*, n° 449.

Prud'homme R., Lee C. 1999 : « Size, sprawl, speed and the efficiency of cities, *Urban Studies*, 36(11), pp.1849-58

Simmonds D., Echenique M. et al. Bates J., 1999, *Review of Land-Use/ Transport Interaction Models*, Department of the Environment, Transport and the Regions: London, 72p.

3. Les dynamiques de relocalisation des activités commerciales : le rôle des configurations des réseaux viaires

Contact : Giovanni Fusco, UMR 7300 ESPACE : Giovanni.fusco@unice.fr,

Objectifs

Le principal objectif de ce travail est de comprendre les caractéristiques morphologiques des réseaux routiers (permettant donc la mobilité automobile) et des réseaux viaires (permettant le mouvement piéton) qui constituent des facteurs positifs ou négatifs pour le développement de l'offre commerciale, et notamment celle des petites et des moyennes surfaces. Dans un second temps, la recherche essayera de comprendre, par une démarche de stress test, quels effets peuvent avoir les modifications des réseaux actuels sur le potentiel commercial des différents quartiers. L'objectif opérationnel est d'identifier les moyens pour parvenir à une plus large diffusion du potentiel commercial dans l'espace urbain. Une répartition plus homogène du commerce dans la ville nous semble en effet un élément essentiel à l'animation de l'espace public et donc à l'urbanité des différents quartiers, mais également un moyen pour atteindre une véritable ville des courtes distances où l'accessibilité sera finalement découplée de la forte mobilité automobile.

3.1. Introduction

« La fonction commerciale et les mobilités qui lui sont liées sont particulièrement révélatrices des transformations récentes des fonctionnements urbains » (Boquet et Desse, 2010). Les structures commerciales apparaissent comme les plus réactives à toute modification des conditions du fonctionnement territorial. Elles préfigurent souvent les évolutions des autres sphères d'activités comme ce fût le cas pour l'installation des hypermarchés en périphérie dans les années 70. En même temps, la recherche en sciences géographiques a commencé à explorer les liens existant entre formes urbaines et localisation des activités commerciales (Cutini 2001, Porta et al. 2007, 2009). Ces considérations justifient une analyse plus approfondie des logiques spatiales des localisations commerciales dans l'espace urbain contemporain, des relations qu'elles entretiennent avec les formes urbaines ainsi qu'une prospective des leurs relocalisations dans différents scénarios d'évolution de la forme urbaine. Les principales tendances actuelles dans l'équipement commercial des villes françaises, suite au développement du système automobile et des formes urbaines associées sont ainsi (Wiel 1999) :

- Le fort développement des grandes surfaces commerciales périphériques, suivant une logique de dépendance automobile (proximité aux échangeurs routiers et autoroutiers, offre abondante de stationnement, desserte par les transports en commun faible ou nulle, accessibilité piétonne presque inexistante). L'offre des concentrations commerciales de périphérie s'est en même temps diversifiée : les grandes surfaces alimentaires et de l'équipement de la maison ont été rejointes par des nouveaux commerces, des services et des loisirs (cinémas multisalles, activités sportives, etc.).
- Un repositionnement de l'offre commerciale des espaces centraux de la ville, qui ont perdu une partie de l'offre commerciale traditionnelle, mais l'ont remplacée par des

nouveaux commerces spécialisés, surtout dans l'équipement de la personne, les services, les loisirs et l'hôtellerie-restauration. Des grandes locomotives commerciales ont également été accueillies dans les espaces centraux. L'accessibilité automobile de ces espaces a été souvent maintenue (offre de stationnement, accès routiers), mais elle s'est accompagnée de nouvelles dessertes en transports en commun (tramway, métro) et d'une requalification de l'espace public pour le piéton et le cycliste.

- Une raréfaction du maillage commerciale des espaces intermédiaires, des périphéries urbaines (et souvent même d'espaces relativement péri-centraux) qui n'ont probablement pas les caractéristiques morphologiques pour offrir des opportunités de marché significatives aux acteurs du commerce. Or ces vastes espaces, qui incluent des quartiers résidentiels, des cités de logements sociaux, des lotissements périurbains et même des espaces fonctionnellement plus mixtes, abritent une fraction considérable de la population urbaine. La raréfaction du tissu commercial dans ces espaces rend l'objectif de la ville aux courtes distances impossible et oblige les habitants à une dépendance accrue des modes de transports motorisés (et en premier chef de l'automobile) pour l'essentiel de leurs mobilités commerciales.

Or, quel rôle jouent les morphologies urbaines dans ces phénomènes ? Est-il possible d'intervenir sur ces formes pour rééquilibrer le maillage commercial de l'espace urbain ?

Dans ce qui suit, nous présenterons d'abord la méthodologie de notre recherche et ensuite ses principaux résultats pour le cas d'étude de l'agglomération de Nice, dans le sud-est français.

3.2. Méthodologie

3.2.1. Présentation de la démarche de recherche

La démarche générale de la recherche du travail est montrée dans la Figure 11. Les données d'entrée des analyses et des modélisations sont montrées en haut du schéma :

- D'une part, nous avons le système morphologique urbain, fait des tronçons du réseau viaire (rues permettant le mouvement piéton) et du réseau routier (routes permettant le mouvement automobile), ainsi que l'ensemble du bâti urbain. La source de ces données est la BD TOPO de l'IGN. Les tronçons viaires et routiers coïncident dans la plupart de l'espace urbain, à l'exception des voies rapides et autoroutes urbaines (non accessibles au piéton) et des rues piétonnes, sentiers et escaliers (non accessibles à l'automobile).
- D'autre part, nous avons la distribution des petits et moyens commerces, représenté chacun par un point géolocalisé au numéro civique, selon la base de données fournie par la Chambre de Commerce et Industrie de Nice Côte d'Azur (CCINCA). Les grandes surfaces commerciales (> 2000 m² de surface de vente) seront exclues de notre analyse (même si leur influence dans l'espace urbain sera modélisée par quelques paramètres configurationnels).

L'objectif de la recherche, au moins dans une première phase, est d'expliquer la distribution des commerces par les caractéristiques configurationnelles du système morphologique. Les données ont ainsi d'abord fait l'objet de quelques pré-traitements (élimination des erreurs, filtrage des commerces de gros et des grandes surfaces, transformation des bâtiments en points, etc.).

Successivement, l'outil UNA (Urban Network Analyst, voir section 1.3) a été utilisé pour implémenter les algorithmes de l'analyse de centralité multiple au système morphologique urbain. Les chemins minimaux de tout point-bâtiment à tout point-bâtiment ont été déterminés sur les réseaux viaire et routier. Les principaux indicateurs configurationnels ont ainsi pu être calculés pour chaque point bâtiment, en prenant en compte à tour de rôle le mouvement piéton et le mouvement automobile : accessibilité simplifiée, centralité de proximité, centralité de rectilinéarité, intermédiarité, etc. Grâce à l'outil SANET, des valeurs moyennes de ces indicateurs ont pu être calculées par interpolation réticulaire sur les tronçons des réseaux urbains.

L'outil de calcul réticulaire SANET a également été utilisé pour calculer la densité de kernel des commerces sur les segments viaires. La localisation des commerces est en effet le résultat d'un géocodage à l'adresse, et nous devons interpréter le point qui localise chaque commerce comme une estimation de sa position réelle. Il est dès lors nécessaire de calculer une densité de probabilité de présence commerciale, ayant l'allure d'une gaussienne, avec la valeur maximale en correspondance du point-commerce, mais arrivant à zéro aux bornes de l'intervalle de calcul. Cette densité commerciale est additive: nous pouvons ainsi calculer la moyenne de la somme des densités commerciales pour chaque tronçon du réseau viaire urbain.

Ayant réduit les propriétés configurationnelles et les densités commerciales à l'unité de base qui est le tronçon du réseau viaire, nous pouvons finalement rechercher quels liens existent entre les premières et les secondes: quels paramètres configurationnels sont susceptibles d'expliquer la plus ou moins grande présence commerciale dans les segments du réseau viaire ? L'outil employé dans cette recherche de relations statistiquement significatives est celui des réseaux bayésiens, une des techniques les plus puissantes pour la fouille de données probabiliste. Les chercheurs de l'UMR ESPACE possèdent en effet d'importants acquis dans l'utilisation des réseaux bayésiens sur les données urbaines (Fusco 2004, 2008, 2010, 2012). Les résultats de cette première phase de la recherche sont :

- Un ensemble de règles probabilistes résumant la relation existante entre les paramètres configurationnels et les densités commerciales pour les tronçons du réseau viaire de l'agglomération niçoise.
- La détermination des potentiels commerciaux des tronçons de l'aire d'étude par le modèle probabiliste et l'analyse des écarts entre ces potentiels et les données empiriques, permettant d'identifier à la fois des potentiels inexploités et des particularités locales qui ne sont pas intégrées dans le modèle.

La seconde phase de la recherche est un stress test du rapport existant entre système morphologique et distribution des activités commerciales. L'analyse des tendances d'évolution des morphologies urbaines permet de construire six scénarios contrastés d'évolution des réseaux urbains. Il s'agit de six scénarios idéalisés, portant à l'extrême la transformation topologique des réseaux : densification et de-densification du maillage, transformation du réseau dans une structure arborescente par privatisation des tronçons redondants, augmentation de la connectivité, poursuite de la croissance arborescente sans diminuer le maillage actuel, homogénéisation des vitesses du réseau routier. Des scripts en langage python ont permis la production automatique de ces scénarios morphologiques même si au prix du réalisme des scénarios. L'outil UNA est à nouvel employé pour recalculer les paramètres configurationnels des réseaux ainsi modifiés. Les règles probabilistes du modèle bayésien sont alors utilisées pour inférer les évolutions les plus probables des potentiels

commerciaux suite à la transformation des morphologies dans chaque scénario. Cette seconde phase de la recherche est riche en enseignements et en indications opérationnelles pour l'aménagement urbain. Même si le modèle n'a pas vocation à être utilisé pour la prédiction des modifications du potentiel commercial dans tel ou tel segment viaire, les indications fournies pour l'ensemble de l'espace urbain sont relativement claires pour élaborer des nouvelles politiques sur la forme urbaine susceptibles d'augmenter le potentiel commercial dans l'ensemble de l'espace urbain et contribuer ainsi à la construction d'une ville aux courtes distances.

Dans les sections qui suivent, nous allons détailler les différentes phases de la méthodologie, en commençant par les données d'entrée des analyses et des modèles.

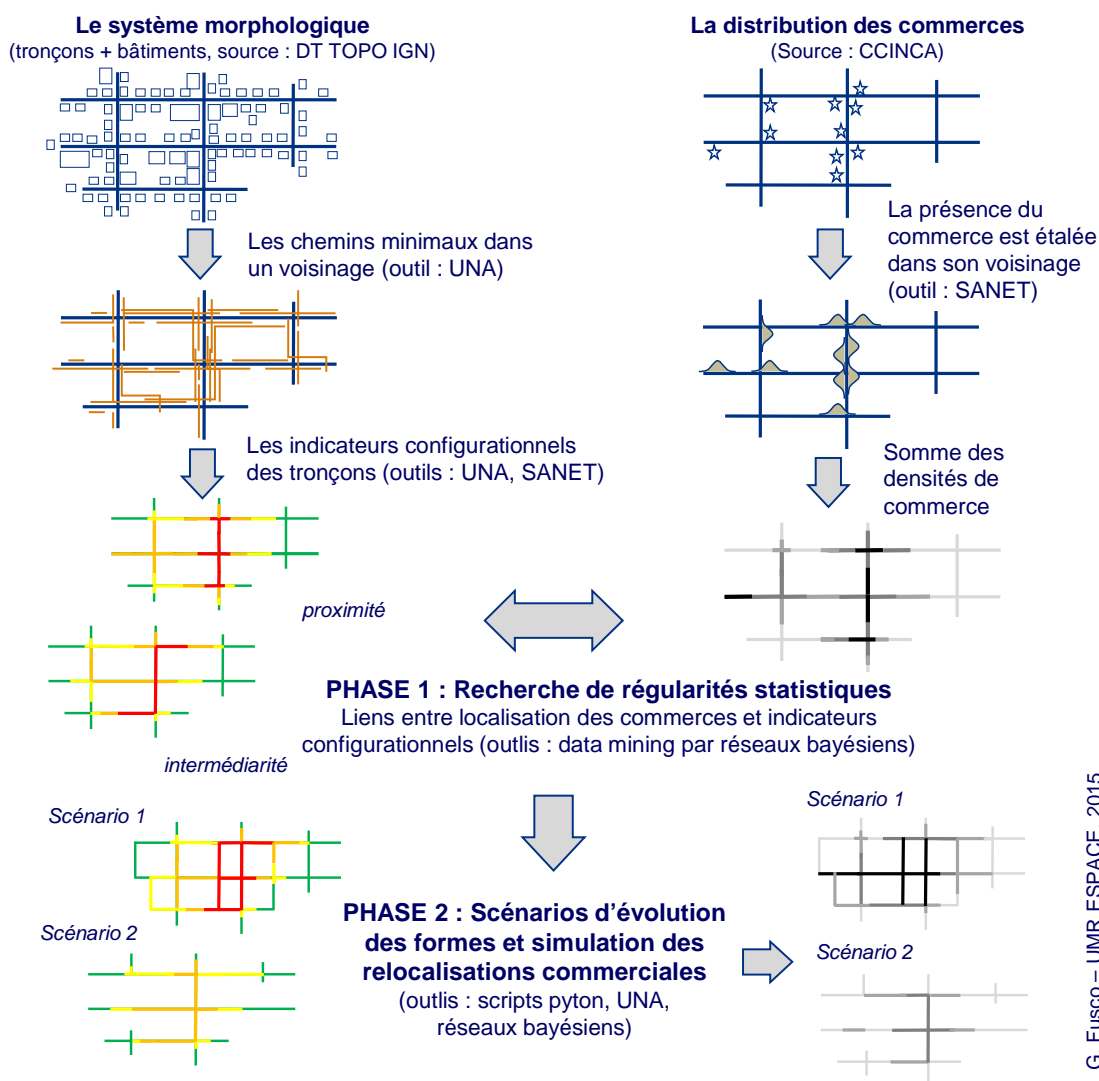


Figure 11 Démarche générale de la recherche.

3.2.2. L'aire d'étude et les données

Au sens large, l'aire d'étude est l'agglomération de Nice, au centre de la bande littorale du Département des Alpes-Maritimes. Plus précisément, nous avons sélectionné 24 communes qui couvrent la bande littorale d'Eze-sur-Mer à Villeneuve-Loubet et leur proche arrière-pays. L'ensemble de l'aire d'étude couvre une surface de 325 km² et a une population résidente de

524 000 habitants en 2013. Les trois communes principales dans cette aire d'étude, qui constituent le véritable focus de nos analyses, sont les communes littorales de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer. Plus particulièrement, la ville de Nice, avec ses 74 Km² et ses 343 000 habitants, est le principal centre urbain de l'agglomération. L'aire d'étude correspond également à l'essentiel de l'intercommunalité métropolitaine de Nice. La Métropole Nice-Côte d'Azur inclut dans la réalité également les communes de la haute vallée du Var et des vallées de la Tinée et de la Vésubie dans le haut pays, tandis que les communes de Drap, Cantaron, Saint-Paul-de-Vence, La-Colle-sur-Loup et Villeneuve-Loubet sont intégrées à notre aire d'étude, sans faire partie de la Métropole, pour éviter des effets de bord dans l'analyse des trois communes centrales. La minimisation des effets de bord des analyses est un principe directeur dans l'organisation de nos traitements. Toutes les données de départ seront ainsi analysées et modélisées pour l'ensemble des 24 communes de l'aire d'étude. Conscient des effets de bords qui entachent les valeurs sur les espaces périphériques, le *data mining* de la relation entre morphologie des réseaux et activités commerciales sera conduit uniquement sur une aire plus restreinte, centrée sur les trois communes littorales de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer auxquelles s'ajoute un tampon d'un kilomètre d'épaisseur (Figure 12). Cette aire d'étude restreinte a une surface de 136 km², correspondant à 41% de l'aire d'étude élargie, mais incluant plus de 80 % de sa population, les trois quarts de son bâti et presque 60% de son réseau viaire.

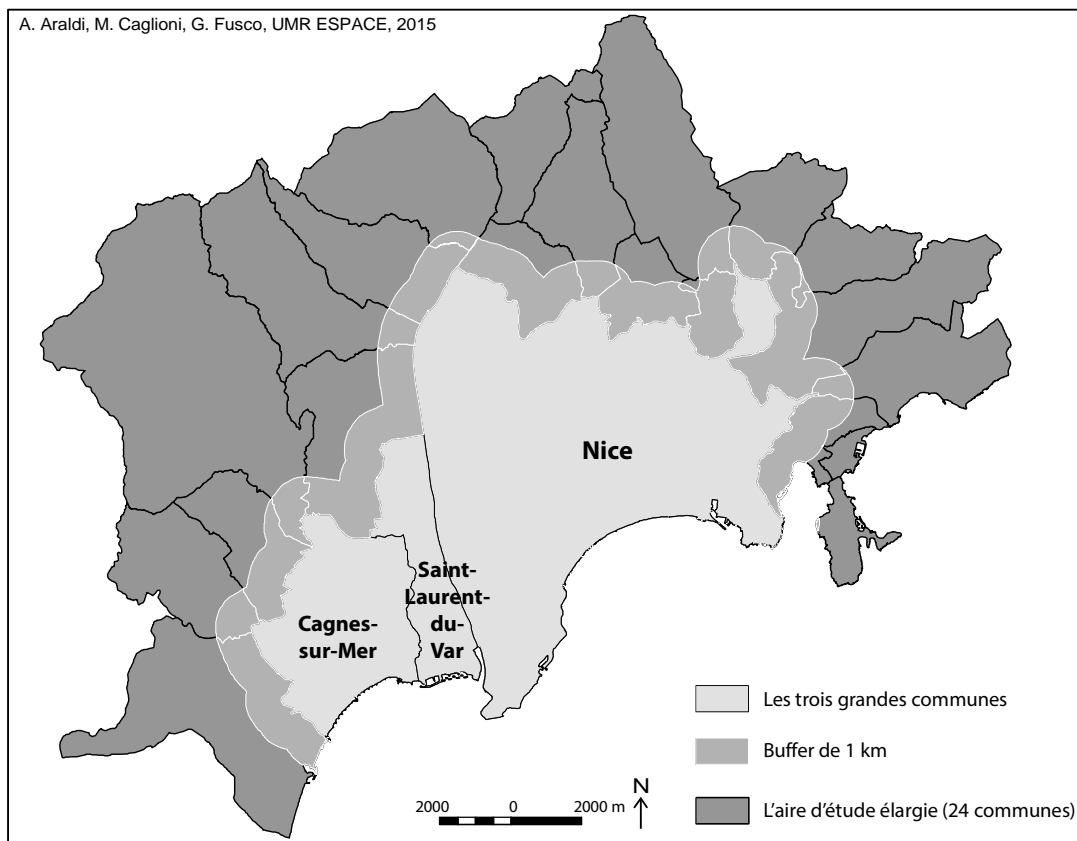


Figure 12 L'aire d'étude

Les données sur le système morphologique de l'aire d'étude sont issues de la BD TOPO® de l'IGN, dont nous disposons la version de 2012. Selon cette base de données, la longueur totale du réseau viaire dans l'aire d'étude est de 3628 km, auxquels s'ajoutent 142 km de routes qui sont interdites au mouvement piéton (autoroutes, voies rapides urbaines, rampes

d'accès, etc.). De ces 3628 km, 2111 km appartiennent à l'aire d'étude restreinte, dont 1583 km à l'intérieur des trois grandes communes littorales (Figure 13).

Outre aux informations dimensionnelles de longueur et de largeur de chaque segment viaire et routier, la BD TOPO contient d'autres informations sémantiques, telles que l'odonyme, le sens de circulation, le nombre de voies, la classification par catégorie administrative, la vitesse maximale autorisée, etc.

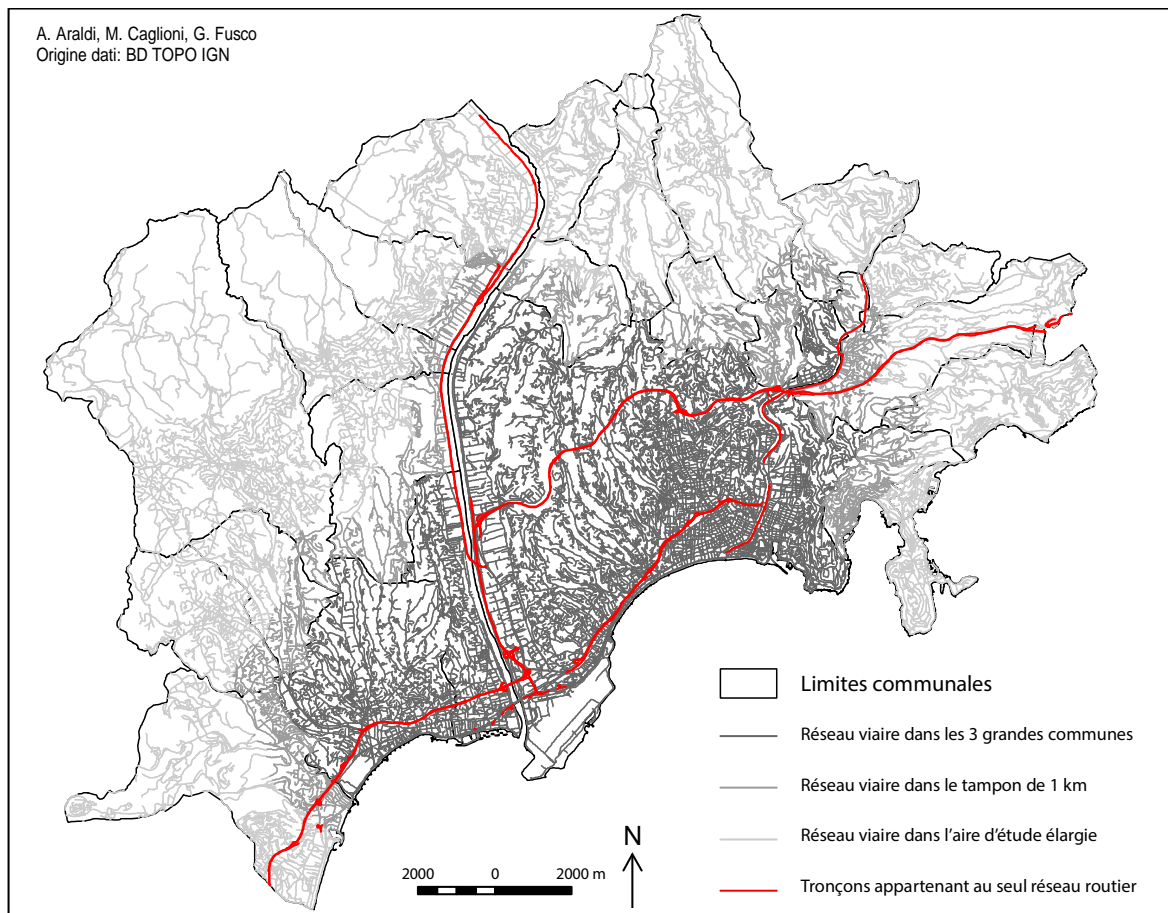


Figure 13 Réseau viaire et réseau exclusivement routier dans l'aire d'étude.

La BD TOPO contient également des couches vectorielles relatives au bâti. Notre aire d'étude élargie contient ainsi 68 500 éléments bâtis² pour une emprise au sol totale de 20 160 000 m², correspondant à environ 6% de la surface administrative. Par la différente densité de bâti nous pouvons déjà saisir quelques différences structurelles dans l'aire d'étude, reflétant la superposition des deux gradients centre/périphérie et littoral/arrière-pays dans l'organisation de cette agglomération littorale. Le bâti de l'aire d'étude restreinte a une emprise au sol de 14 780 000 m², soit 73,3 % de l'ensemble de l'aire d'étude. Le bâti est donc relativement plus concentré que le réseau viaire qui, tout en se concentrant sur l'aire centrale (58,2% du total) dessert également les vastes espaces collinaires plus périphériques.

Les données sur les activités commerciales dans l'aire d'étude ont été fournies par la Chambre de Commerce et Industrie de Nice Côte d'Azur (CCINCA). La base de données géocodée de tous les ressortissants de la chambre consulaires dans le périmètre de l'aire d'étude comprend

² Ces éléments bâtis ne correspondent pas forcément à des bâtiments car, dans le cas de bâtiments accolés, la BD TOPO modélise par un seul polygone les bâtiments ayant la même hauteur.

125 000 entrées dans sa version de 2013. On remarquera que la base de données comprend à la fois les ressortissants actifs et ceux qui l'ont été au cours des 15 dernières années. De nombreux attributs sémantiques sont contenus dans la base de données et seront exploités dans le cadre de nos analyses, notamment :

- La localisation de chaque ressortissant (adresse comprenant le numéro civique, l'odonyme, le code postal et la commune)
- Une classification en 10 grandes familles d'activité : commerce automobile-moto, commerce alimentaire, commerce de gros, culture et loisirs, équipement de la maison, équipement de la personne, hôtellerie et restauration, services, autres commerces spécialisés et autres activités (activités productives, notamment, mais également un certain nombre d'activités commerciales non incluses dans les 9 familles précédentes).
- Une classification plus détaillée pour chaque famille de la typologie précédente.
- Les dates de début et de fin de l'activité commerciale, qui couvrent un arc temporel qui va du XIX siècle à 2013 mais qui seulement à partir des années 80 est mis à jour rigoureusement, et à partir des années 90 l'est avec une périodicité annuelle.
- La surface de vente de chaque activité commerciale. En réalité pour les petits commerces de moins de 200 m², la surface n'est pas connue et une valeur de 40 m² est attribuée par défaut. De même, la valeur de 40 m² est attribuée par défaut à toutes les activités de la famille hôtellerie-restauration, ce qui est clairement incohérent.
- Le nombre d'effectifs (salariés ou non) travaillant dans chaque commerce.

L'objectif de notre recherche étant la compréhension du lien entre morphologie des réseaux urbains et localisations des commerces en pied d'immeuble, nous avons donc filtré de la base de données des ressortissants CCINCA toutes les activités qui ne sont pas du commerce de détail reliés à l'espace public de la voirie, notamment les commerces de gros et les activités productives. Une seconde sélection a permis de filtrer tous les ressortissants qui n'étaient plus en activité en 2013. Nous avons ainsi réduit la base de données à 22 272 commerces de pied d'immeubles actifs dans l'aire d'étude en 2013, qui se répartissent en 9 familles comme indiqué dans la Figure 14.

Nous avons finalement identifié parmi ces commerces 37 grandes surfaces (avec une surface de vente supérieure ou égale à 2000 m²). Leurs logiques de localisation ne seront pas étudiées dans le cadre de cette recherche. Si une position hypercentrale ou, a contrario, une position périphérique assortie d'une très bonne accessibilité automobile caractérisent la plupart de ces grandes surfaces, il faut considérer que la disponibilité de foncier et la capacité à négocier la modification des réseaux viaire et routier caractérise également l'implantation "exceptionnelle" de ces grands acteurs du commerce. Une fois installées, ces grandes surfaces deviennent également des locomotives d'activité commerciale, catalysant des galeries marchandes et/ou des clusters d'activités commerciales à leur proximité. Pour l'analyse des logiques de localisation des petites et moyennes surfaces dans un réseau urbain donné, la présence de grandes surfaces et la desserte des grandes surfaces par les réseaux urbains deviennent alors des facteurs explicatifs potentiels à intégrer à nos analyses.

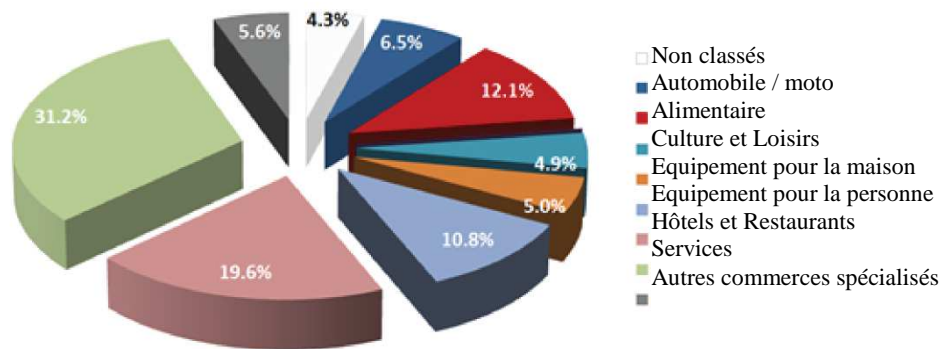


Figure 14 Répartition des commerces de pied d'immeuble dans l'aire d'étude.

3.2.3. Les indicateurs configurationnels de l'analyse de centralité multiple

La *Multiple Centrality Assessment* (MCA), ou Analyse de Centralité Multiple est une approche d'analyse de la morphologie des réseaux urbains. Elle participe à la grande famille des approches configurationnelles : la forme des réseaux peut être appréhendée seulement si l'on considère l'ensemble des relations que chaque élément du réseau entretient avec tous les autres éléments. Par le recours au calcul des chemins minimaux entre tous les points du système morphologique, et par le calcul d'indicateurs de centralité à partir de ces parcours, la MCA fait converger deux grandes traditions de modélisation : celle du calcul des flux (ici flux potentiels) des modèles de l'ingénierie des transports dans les réseaux urbains, avec leur inscription topographique dans l'espace urbain, et celle de la modélisation des réseaux complexes, appréhendés par leur topologie, mis au point par la sociologie structurelle (Freeman 2004). Le recours aux chemins minimaux entre tous les points de l'espace urbain permet également de relier la MCA à la théorie du mouvement naturel (Hillier et al. 1993) : sans aucune connaissance sur la localisation des fonctions dans l'espace urbain, sa morphologie, et plus particulièrement celle de ses réseaux viaire et routier, canalise et structure le mouvement possible dans la ville et crée par là un potentiel de centralité qui sera ensuite saisi et renforcé par la localisation des fonctions.

L'analyse topologique des réseaux reconnaît plusieurs notions principales de centralité dans un réseau : être proches à beaucoup d'éléments (centralité de proximité), pouvoir atteindre beaucoup d'éléments (centralité d'accessibilité), se situer dans les éléments de passage entre beaucoup d'éléments (centralité d'intermédiation), pouvoir atteindre beaucoup d'éléments de manière directe (centralité d'accessibilité avec une métrique de rectilinéarité ou avec toute autre métrique permettant d'appréhender la connexion directe, y compris en termes visuels et cognitifs), être un élément critique pour beaucoup d'éléments (centralité de criticalité).

Par les plateformes SIG (nous avons employé dans nos analyses la plateforme ARCGIS) il est aujourd'hui possible d'effectuer ces analyses dans l'espace urbain en prenant en compte pas seulement les relations topologiques entre les éléments d'un réseau, mais également les caractéristiques géométriques, topographiques et de performance des réseaux (longueur, circuité, pente, vitesse en ce qui concerne le mouvement automobile, etc.).

Nous allons présenter, dans ce qui suit, l'ensemble des indicateurs de MCA retenus dans le cadre de notre étude. Notre approche est relativement inductive. Une fois l'hypothèse faite que les caractéristiques configurationnelles de la MCA peuvent avoir une influence sur les localisations commerciales, nous avons appréhendé la position de chaque élément du réseau par une multitude d'indicateurs, pour vérifier *a posteriori* quels indicateurs jouent un rôle plus

important dans l'explication des localisations commerciales. Chaque indicateur peut par ailleurs être calculé de façon globale (sur l'ensemble du réseau urbain) ou de façon locale. Nous avons toujours préféré l'approche globale en identifiant trois échelles emboîtées de mouvement naturel : la micro-échelle de la proximité immédiate, la méso-échelle du mouvement dans un ensemble de quartiers environnants et la macro-échelle qui, à défaut de couvrir toute l'agglomération (rarement les mobilités se structurent à cette échelle, surtout en ce qui concerne la fréquentation des petits et moyens commerces), prend en compte le mouvement dans un macro-secteur de la ville. Comme nous le verrons dans la suite, ces échelles sont de fenêtres mobiles de calcul, différemment définies pour le mouvement piéton et automobile, permettant le calcul des indicateurs configurationnels de la MCA autour de chaque élément du réseau.

La Reach $R_{r/t}[i]$, (1) d'un point i sur le réseau G correspond au nombre de destinations j que l'on peut atteindre par un chemin minimum dont la longueur maximale est donnée par le rayon de recherche r [mètres] ou t [minutes], dans le cas où l'on considère une impédance spatiale ou temporelle, qui correspond à une logique piétonne ou automobile, respectivement.

$$Reach_r[t] = \sum_{j \in G - \{i\}; d[i,j] \leq r} 1 \quad (1)$$

Où $d[i,j]$ est la longueur du chemin minimal entre le point de référence i et tout point de destination j . C'est l'indicateur de plus simple compréhension et mesure la centralité d'accessibilité selon une métrique simplifiée en «nombre de destinations accessibles à moins de r mètres ou t minutes (Figure 15).

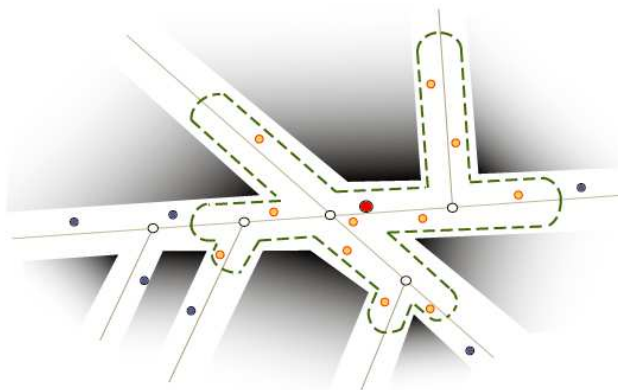


Figure 15 Représentation graphique de l'indice de centralité de Reach.

La Closeness $C_{r/t}[i]$, (2) ou proximité est l'inverse de la *Farness*, c'est-à-dire la somme des distances $d_{p/v}(i,j)$ déterminées par les chemins minimaux entre le point d'origine i et les points de destination j à l'intérieur du sous-ensemble du réseau qui a une distance maximale r (ou t) de i . L'indicateur $C_{r/t}(i)$, pour chaud point est alors donné par l'expression :

$$Closeness_r[t] = \frac{1}{F^r(i,r)} = \frac{1}{\sum_{j \in G - \{i\}; d[i,j] \leq r} d[i,j]} \quad (2)$$

Dans le cas piéton, l'unité de mesure est [mètres⁻¹], dans le cas automobile [minutes⁻¹], et peut être lue comme une fréquence. Elle interprète la notion de centralité de proximité entre points dans un réseau, mais dépend crucialement du nombre de points que l'on peut atteindre dans un rayon maximal : si celui-ci n'est pas homogène sur le réseau, un point proche de beaucoup d'autres peut avoir une valeur de proximité équivalente à celui d'un point à partir duquel l'on peut atteindre un nombre bien inférieur de destinations, même si celles-ci sont relativement plus éloignées.

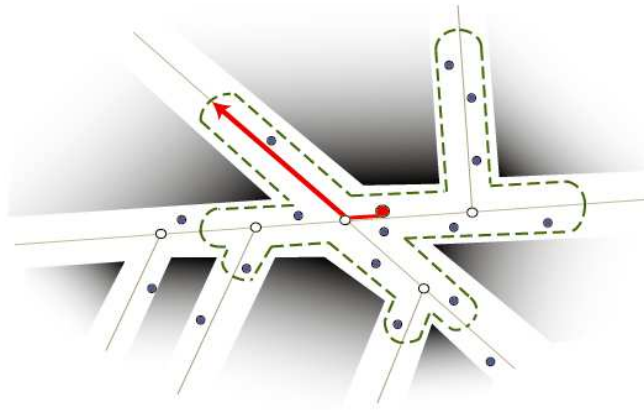


Figure 16 Représentation graphique de l'indice de centralité de proximité (*Closeness*).

Pour rendre la centralité de proximité indépendante du nombre de destinations atteignables, on peut normaliser la *Closeness* en la multipliant par la *Reach* (1): on calcule ainsi des valeurs susceptibles d'identifier des niveaux hiérarchisés de centralité de proximité (*Hierarchical Closeness*, Opsahl 2010) et permet d'effectuer une lecture comparée entre différents sous-espaces dans une aire d'étude.

$$Closeness_r^N[i] = C_r[i] \times R_r[i] \quad (3)$$

La *Straightness* $S_{r/d}[i]$, d'un point i , centralité de rectilinéarité, ou d'accessibilité rectilinéaire, est obtenue en pondérant, dans la somme des destinations atteignables dans un rayon r , chaque point de destination j par le ratio montrant dans quelle mesure la distance réseau entre i et j s'écarte de leur distance à vol d'oiseau δ . Dans le cas où une destination peut être atteinte par une ligne droite, elle comptera pour une valeur unitaire dans le calcul, comme dans la formule (1). La centralité de rectilinéarité est ainsi une *Reach* pesée par la circuité des chemins minimaux que l'on utilise pour atteindre chaque point de destination.

$$Straightness_r[i] = \sum_{j \in C(i) | d[i,j] \leq r} \frac{\delta[i,j]}{a[i,j]} \quad (4)$$

La centralité de rectilinéarité appréhende une composante importante dans la psychologie environnementale et dans les sciences cognitives ; son interprétation est liée aux phénomènes de perception et d'orientation de l'homme dans l'espace urbain, qui sont à la base des indicateurs produits par les techniques de la *Space Syntax* (Hillier 1996). Par analogie aux paramètres correspondants de la *Space Syntax*, on pourrait s'attendre à ce que les éléments avec une *Straightness* plus élevée sont davantage présents et reconnaissables dans les cartes mentales en tant qu'éléments de base de l'espace urbain perçu (Dalton et Bafna 2003).

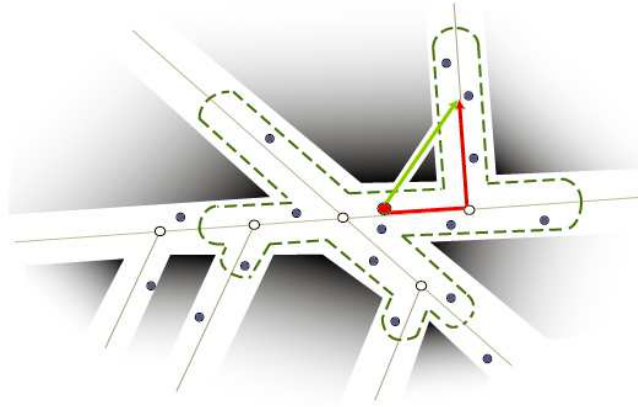


Figure 17 Représentation graphique de l'indice d'accessibilité rectilinéaire (*Straightness*).

En normalisant $S[i]$ par le nombre de points que l'on peut atteindre dans un rayon r (Reach), on obtient, pour un réseau viaire, un indicateur purement géométrique des caractéristiques du réseau autour du point i : l'indicateur de circuité autour de i , ou *Straightness Normalisée*, $S_r^N[i]$ (5)

$$Straightness_r^N[i] = \frac{S_r[i]}{R_r[i]} \quad (5)$$

Les valeurs de $S_r^N[i]$ varient dans l'intervalle (0;1], la valeur 1 correspondant à la position du point central d'un réseau parfaitement étoilé, où chaque point de destination peut être atteint par une ligne droite.

L'indicateur de *Straightness Normalisée* prend toute autre signification dans le cadre d'un réseau routier, où l'impédance est donnée par le temps de parcours des chemins minimaux. Dans le réseau routier, la *Straightness* est la somme de rapports entre les distances euclidiennes à vol d'oiseau et les temps de parcours sur le réseau. Elle n'a pas d'interprétation facile (ensemble de distances qui peuvent être parcourues dans une unité de temps autour du point i), mais, une fois normalisée elle devient le ratio moyen entre la distance euclidienne entre le point i et toutes les destinations j et le temps de parcours réseau pour les atteindre. Elle devient ainsi la performance moyenne du réseau routier autour de i , c'est-à-dire la vitesse moyenne de l'environnement réticulaire de i . Plusieurs facteurs concourent à la production d'une performance moyenne : la présence de tronçons à haute vitesse (autoroutes urbaines, voies rapides) bénéficiant à un grand nombre de parcours minimaux, les fortes contraintes topographiques, allongent par des lacets les distances réseaux par rapport aux distances euclidiennes tout en baissant la vitesse sur les tronçons routiers, ou encore la présence d'importantes surfaces non urbanisées et à faible densité de segments routiers (espaces boisés, surfaces d'eau, etc.) obligeant les chemins minimaux à des longs détours. Dans nos analyses, ces derniers facteurs semblent même plus importants que la présence de voirie rapide, faisant de l'indice de performance du réseau un indicateur de l'homogénéité/dishomogénéité du tissu urbain.

La *Betweenness* $B_r[i]$, ou centralité d'intermédiarité (Freeman 1977), prend en compte le nombre de parcours minimaux qui passent par un point donnée lorsque l'on considère les parcours minimaux entre tous les points distant moins de r mètres (ou t minutes). Elle se calcule par l'expression suivante :

$$Betweenness_r[i] = \sum_{j \in C - \{i\}; d(j,i) \leq r} n_{jk}[i] \quad (6)$$

où $n_{jk}[i]$ est le nombre de chemins minimaux entre les noeuds j et k sur le réseau G passant par le point i , avec j et k à une distance inférieure ou égale à r (ou t) sur le réseau.

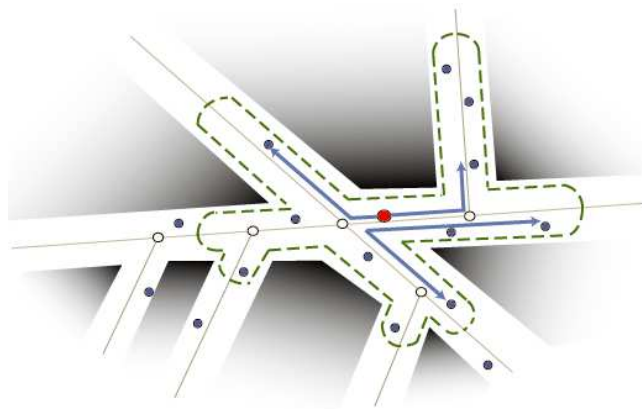


Figure 18 Représentation graphique de l'indice de centralité d'intermédiarité (*Betweenness*).

En première approximation, la *Betweenness* peut être normalisée par le carré de la *Reach*, exprimant ainsi non pas le nombre, mais le pourcentage des chemins minimaux autour du point i passant par i ; en réalité, cette approximation tend à sous-estimer l'intermédiarité relative, car plusieurs chemins minimaux entre tous les points à moins de r mètres de i ont une longueur supérieure à r et ne font donc pas partie des chemins qui avaient été considérés dans l'expression (6). Selon cette approche, l'indice d'intermédiarité relative sera ainsi calculé comme :

$$Betweenness_r^N [i] = \frac{B_r [i]}{[R_r [i]]^2} \quad (7)$$

Tout en étant majeurs, les indicateurs ici présentés ne sont pas exhaustifs de l'ensemble de paramètres de la MCA. Les mêmes paramètres pourraient par exemple être calculés non pas par rapport aux chemins minimaux, mais par rapport à l'ensemble de cheminements possibles (éventuellement filtrés par une valeur maximale) entre deux points. On aurait ainsi les indicateurs de *Katz Centrality* (Katz 1953). Les indicateurs de *Random Walk Centrality* (Noh e Rieger 2004) sélectionnent les chemins de façon aléatoire. La vaste discussion sur la centralité multiple dans les réseaux sociaux (Freeman 1979) permet également d'envisager d'autres indicateurs plus ou moins transposables au cas des réseaux urbains, s'adaptant à différentes appréhensions de l'espace et du mouvement (Opsahl 2010).

La littérature sur les indicateurs de la MCA et sur leur capacité à expliquer les fonctionnements urbains est vaste. En ce qui concerne l'intermédiarité, par exemple, différentes approches aux chemins minimaux et leurs corrélations avec la mobilité urbaine ont été étudiées. En ce qui concerne les flux de trafic, plusieurs études montrent une forte capacité prédictive des indices de *betweenness* (Penn 2003, Jiang et Liu 2011). D'autres auteurs opposent en revanche les théories de cognition individuelle et sociale du mouvement (Stevens et Coupe 1978, Hirtle et Jonides 1985; Tomko et al 2008), remettant en discussion les calculs effectués sur des chemins minimaux calculés de façon « objective » (c'est-à-dire sans prendre en compte les aspects cognitifs des individus et des groupes).

3.2.4. Le calcul des indicateurs configurationnels

Urban Network Analysis (UNA) est un *toolbox* de la plateforme ARCGIS développé par une collaboration entre centres de recherche de la Singapore University of Technology & Design et du Massachusetts Institut of Technology (Sevtsuk et Mekonnen 2012). Il permet le calcul des plus importants indicateurs de MCA à partir d'un *network dataset* (modélisant le réseau viaire ou le réseau routier) et d'un ensemble de points, en passant par un calcul de matrice d'adjacence et de chemins minimaux entre points. UNA permet de calculer cinq types différents d'indicateurs : *Gravity*, *Reach*, *Closeness*, *Betweenness* et *Straightness*. Seul l'indice de gravité *Gravity* (indice d'accessibilité de Hansen, nécessitant la calibration de paramètres de comportement des personnes qui se déplacent) ne sera pas utilisé dans le cadre de notre recherche. On remarquera que les chemins minimaux peuvent être calculés à partir de toute variable d'impédance intégrée au *network dataset* : distance métrique sur réseau, distance-temps, distance angulaire, distance topologique, etc.

Le fichier de points (ou éventuellement de polygones) utilisé pour calculer les origines et destinations des chemins minimaux sur le réseau peut être celui du bâti de l'aire d'étude (pour mieux appréhender le système morphologique urbain, dans son association entre une trame viaire et une trame bâtie) ou bien un ensemble de points du réseau (les points d'intersection des segments), comme a été déjà fait dans des études précédentes sur les villes de Barcelone (Porta et al. 2007), Bologne (Porta et al. 2009) ou Côme (Paolillo et al. 2011). Les points peuvent être éventuellement pondérés (par une population, un volume bâti, ou toute autre fonction urbaine). Ainsi faisant, les indicateurs conçus pour l'analyse configurationnelle et le mouvement naturel (de tout point à tout point) commencent à devenir des modélisations de flux réels de personnes, d'information, de marchandise, etc.

Plusieurs réseaux urbains ont servi de données d'entrée à UNA dans le cadre de notre étude. Le premier est le réseau viaire, comprenant l'ensemble des rues publiques, des places et des sentiers où le mouvement des piétons est possible à l'intérieur de l'agglomération niçoise. Sa fonction d'impédance est la longueur du segment viaire. Dans un second temps, nous avons pris en considération le réseau routier, qui intègre également les autoroutes, les voies rapides et leurs rampes d'accès. Sa fonction d'impédance est le temps de parcours du segment routier, compte tenu de sa longueur et de sa vitesse maximale. Finalement, le même réseau routier de l'agglomération niçoise a été utilisé avec une impédance qui tient compte du temps perdu à chaque croisement : qu'il soit régulé par un feu, un stop ou un simple signal de priorité, une pénalisation de 6 secondes est donnée à la traversée de chaque nœud du réseau routier.

Comme déjà indiqué, nous avons toujours calculé des indicateurs locaux, et cela à différentes échelles, en approfondissant l'indication déjà fournie par Porta et al. (2009) d'une analyse multiscalaire du rapport entre indicateurs de MCA et localisation des activités. Dans le cas du mouvement piéton, nous avons ainsi utilisé :

- une micro-échelle de 300 m calculés sur le réseau viaire autour de chaque point, pour appréhender l'espace de la mobilité de proximité immédiate ;
- une méso-échelle de 1200 m, pour appréhender l'ensemble des quartiers qui constituent l'environnement du point ;

- une macro-échelle de 5000 m, pour appréhender l'espace maximal qui est exploré par le piéton (éventuellement à l'aide d'accélérateur de son mouvement, comme le vélo ou les réseaux de transports publics urbains).

Dans le cas du mouvement automobile, l'échelle de la proximité immédiate n'a pas semblé pertinente. Nous avons ainsi utilisé :

- une méso-échelle de 5 minutes calculées sur le réseau viaire, pour appréhender l'ensemble des quartiers qui constituent l'environnement du point ;
- une macro-échelle de 20 minutes, pour appréhender le secteur de l'agglomération qui constitue l'environnement éloigné du point, lorsque l'on se déplace en voiture.

Nice, Saint-Laurent-du-Var, Cagnes-sur-mer

mode	déplacements	% déplacements	durée moyenne [min]	distance moyenne [m]
marche/vélo	75298	63,1	10,5	702
multimotorisé	653	0,5	57,5	15485
voiture / 2RM	35474	29,7	17,4	5000
transports en commun	7941	6,7	31,9	4422
total	119367	100,0	14,2	2308

Aire d'étude élargie

mode	déplacements	% déplacements	durée moyenne [min]	distance moyenne [m]
marche/vélo	89739	60,9	9,6	648
multimotorisé	729	0,5	55,7	14530
voiture / 2RM	48521	33,0	17,1	5028
transports en commun	8251	5,6	31,5	4466
total	147240	100,0	13,5	2374

Figure 19 Les déplacements vers les petits et moyens commerces dans l'aire d'étude (source: EMD 2008)

Le choix de ces seuils se justifie également par rapport aux données empiriques sur les mobilités commerciales dans l'aire d'étude, connues par le biais de l'Enquête Ménages Déplacements des Alpes-Maritimes de 2008 (figure 19). On peut constater que, dans la journée ouvrée moyenne, se produisent 147000 déplacements vers des petits et moyens commerces (y compris les marchés) dans notre aire d'étude élargie, dont presque 120000 dans les trois grandes communes littorales. Ces déplacements sont effectués dans la presque totalité à pieds ou en voiture (60,9% et 33,0% dans l'aire d'étude élargie, 63,1% et 29,7% dans les trois communes littorales). Tout logiquement, la presque totalité (94%) des déplacements commerciaux à pied se font sur des distances inférieures à 2 000 m, avec 80% des déplacements inférieurs à 1 000 m et une distance parcourue moyenne de 650-700 m environ. 84% des déplacements en voiture se font en revanche sur des distances-temps inférieures à 30 minutes (le temps de recherche de stationnement et le parcours à pied du stationnement à la destination sont néanmoins intégrée à la valeur mesurée par l'EMD 2008), avec une durée moyenne d'environ 17 minutes.

En ce qui concerne les origines et les destinations des chemins minimaux du mouvement libre, deux différentes approches ont été retenues :

- **Le système morphologique réduit aux réseaux :** dans cette première approche, les segments viaires et routiers (définis dans la BD TOPO comme des éléments linéaires reliant deux nœuds de type carrefour, bifurcation, etc.) ont été subdivisés en segments plus petits de 50 mètres de longueur maximale. Les extrémités de ces segments (parmi lesquelles les points notables qui sont les carrefours et les bifurcations) ont alors été pris comme points d'origine et de destination des chemins minimaux. La seule prise en compte des réseaux viaire et routier peut sembler un peu réductrice dans l'appréhension du tissu urbain. On notera, cependant, que la densité de points réseau est plus élevée dans les zones plus densément bâties et plus faible dans les espaces périphériques moins urbanisés. La trame viaire devient alors un bon indicateur pour l'ensemble du système morphologique. Cette modélisation s'est successivement montrée de moins bonne qualité que la successive, dans sa capacité à expliquer les localisations commerciales.
- **Le système morphologique comme ensemble de bâtis et de réseaux :** dans cette approche, les emprises au sol des éléments bâtis compris dans la BD TOPO sont utilisés pour déterminer les origines et destinations des chemins minimaux. Plus précisément, tout élément bâti dont l'emprise au sol est inférieure à 200 m² est réduit à un point, dans les éléments bâtis plus grands, autant de points aléatoires sont créés que de tranches de 200 m² d'emprise au sol. Par la génération de points aléatoires (qui seront reliés au segment viaire le plus proche) est contourné le problème de ne pas connaître précisément le point d'accès au réseau des différents bâtiments composant l'élément bâti de la BD TOPO. Cette seconde approche appréhende la densité bâtie du tissu urbain comme élément essentiel du système morphologique qui, en interaction avec la configuration des réseaux, structure le potentiel de mouvement naturel.

		Réseau viaire (piéton) r [mètres]			Réseau routier (automobile) t [minutes]		Réseau routier avec pénalisation des croisements t [minutes]	
		300	1200	5000	5	20	5*	20*
Centralité d'accessibilité simplifiée	Reach_r	R_{300}	R_{1200}	R_{5000}	R_5	R_{20}	R_{5^*}	R_{20^*}
Centralité de proximité	Closeness_r	C_{300}	C_{1200}	C_{5000}	C_5	C_{20}	C_{5^*}	C_{20^*}
Centralité de proximité relative	Closeness_r^N	C_{300}^N	C_{1200}^N	C_{5000}^N	C_5^N	C_{20}^N	$C_{5^*}^N$	$C_{20^*}^N$
Centralité d'accessibilité rectilinéaire	Straightness_r	S_{300}	S_{1200}	S_{5000}	S_5	S_{20}	S_{5^*}	S_{20^*}
Indice de circuité	Straightness_r^N	S_{300}^N	S_{1200}^N	S_{5000}^N				
Indice de performance du réseau					S_5^N	S_{20}^N	$S_{5^*}^N$	$S_{20^*}^N$
Centralité d'intermédierité	Betweenness_r	B_{300}	B_{1200}	B_{5000}	B_5	B_{20}	B_{5^*}	B_{20^*}
Centralité d'intermédierité relative	Betweenness_r^N	B_{300}^N	B_{1200}^N	B_{5000}^N	B_5^N	B_{20}^N	$B_{5^*}^N$	$B_{20^*}^N$

Figure 20 Récapitulatif des indicateurs de MCA et de leurs rayons de calcul.

La première opération effectuée par le tool UNA est précisément la projection des points origines et destinations sur le réseau viaire (même lorsque les autoroutes, voies rapides et tunnels ont été introduites pour analyser le réseau routier, les points-bâtiment ont été uniquement projetés sur les segments appartenant au réseau viaire). Par la suite, le calcul des chemins minimaux entre tous les points projetés sur le réseau permet de calculer les indicateurs configurationnels recherchés. Les indicateurs retenus dans notre étude sont illustrés dans la figure 20.

3.2.5. Les indicateurs intrinsèques

Les indicateurs configurationnels constituent des descripteurs spatiaux « extrinsèques » des segments des réseaux urbains. Leurs valeurs dépendent de l'ensemble des relations spatiales que ces segments entretiennent avec les autres éléments du système morphologique (autres segments et éléments bâtis) dans un rayon donné. Chaque segment possède néanmoins même un certain nombre de descripteurs spatiaux « intrinsèques ». Il s'agit de caractéristiques qui lui sont propres, et dont la mesure n'est pas (en première approximation) une fonction des relations établies avec les autres éléments morphologiques dans un rayon donné. Plusieurs

descripteurs intrinsèques sont déjà inclus dans la BD TOPO et seront utilisés dans le cours de notre étude :

- la nature du tronçon : rue à une voie, à deux voies, etc., rue non goudronnée, sentier, escalier, etc. ;
- la classification par type de flux admis : seulement piéton, seulement automobile, mixte ;
- les sens permis aux flux de véhicules : sens unique, sens double ou “NC” dans le cas de tronçon non utilisable par les véhicules ;
- la largeur du tronçon ;
- le nombre de chaussées ;
- l’importance administrative de la rue / route ;
- la vitesse maximale du tronçon.

D’autres importants descripteurs sont malheureusement absents dans la BD TOPO, tels que la largeur des trottoirs ou la qualité du mobilier urbain..

A une analyse plus attentive, certains paramètres intrinsèques comme la largeur de la rue, la vitesse ou l’importance administrative du tronçon dépendent de l’organisation d’ensemble du réseau et sont donc eux aussi une fonction de relations spatiales entre éléments du système morphologique. Plus précisément, ils relèvent de structures spatiales hiérarchisées qui ont été imposées parfois dès la planification de l’expansion urbaine (comme souvent à Nice dans les tissus du XIX et du début du XX siècle) et d’autres fois par les interventions *a posteriori* de l’aménagement des infrastructures routières.

Nous avons ainsi gardé ces descripteurs pour vérifier quel rôle ils peuvent jouer, en se combinant aux indicateurs configurationnels, dans l’explication des localisations commerciales.

3.2.6. Les grandes surfaces commerciales

Comme expliqué dans la présentation de la démarche générale, l’objectif de notre étude est de comprendre le pouvoir explicatif des configurations réticulaires pour la localisation des petites et moyennes surfaces commerciales. Les grandes surfaces commerciales sortent de ce raisonnement. Elles subissent autant l’influence des configurations viaires et routières qu’elles ne contribuent à les modifier. Souvent, la disponibilité de foncier, surtout dans les espaces périphériques de la ville, détermine l’implantation de la grande surface ce qui entraîne, dans l’autorisation même d’urbanisme une modification des voies d’accès et de la desserte routière en générale. Une fois installée (et souvent même dans le cadre de sa programmation), la grande surface devient même une « locomotive », facteur d’attraction pour l’implantation d’autres activités commerciales à proximité immédiate (comme dans les galeries marchandes) ou sur les principales voies d’accès, selon le principe d’attractivité cumulative (Hotelling 1929).

Pour cette raison, après avoir sélectionné les 37 grandes surfaces commerciales (avec une surface de vente supérieure ou égale à 2000 m²) dans l’aire d’étude, nous avons conçu de nouveaux indicateurs pour évaluer l’importance de cet effet « locomotive ». En dérogeant à la seule logique du mouvement naturel sous-jacent au système morphologique urbain, nous avons alors délimité des bassins d’attraction potentielle des grandes surfaces commerciales au

sein de l'espace urbain et nous avons ensuite calculé des paramètres de centralité d'intermédiarité des segments viaires et routier pour atteindre ces locomotives à partir des points bâtis. Nous avons ainsi rajouté les trois indicateurs suivants :

- la distance de chaque segment à la locomotive commerciale la plus proche ;
- l'intermédiarité de chaque segment au mouvement produit par les locomotives dans leurs bassins d'attraction (nombre de chemins minimaux allant des points bâtis vers les locomotives) ;
- l'intermédiarité relative de chaque segment, exprimé comme pourcentage des chemins minimaux capté par le segment dans l'ensemble des chemins minimaux du bassin de la locomotive.

La détermination des bassins d'attraction est clairement une approximation fonctionnelle au calcul des valeurs d'intermédiarité relative. Les bassins d'attraction ne correspondent ainsi pas aux véritables aires de chalandises de ces grandes surfaces, d'autant plus que les 37 grandes surfaces ne constituent pas une famille homogène (15 grandes surfaces alimentaires généralistes, 12 commerces d'équipement de la maison, 6 commerces de culture et loisirs, 4 commerces d'équipement de la personne).

Les Indicateurs ont en tout cas été calculés grâce à l'extension Network Analyst d'ARCGIS, permettant le calcul des chemins minimaux entre un ensemble de points origines (les points bâtis) et un ensemble de points destinations (les grandes surfaces commerciales).

3.2.7. L'interpolation des valeurs sur le réseau

UNA calcul les valeurs des indicateurs configurationnels pour chaque point bâti origine/destination des chemins minimaux. Pour attribuer une valeur moyenne à des segments de réseau viaire / routier, nous devons effectuer une interpolation avec une logique rigoureusement réticulaire. Pour y parvenir, nous avons utilisé l'extension SANET (Spatial Analysis along NETWORKS) de la plateforme ARCGIS, mise au point par A. Okabe du Center for Spatial Information Science de l'Université de Tokyo (Okabe et al. 2006).

Plus particulièrement, nous avons opté pour une interpolation *Inverse Distance Weight* (poids inversement proportionnel à la distance) sur un réseau, selon l'expression (8), où \hat{z}_0 indique la valeur de l'attribut, interpolée sur le réseau, z_i la valeur du point appartenant à l'ensemble d'origine et w_i , spécifié par la formule (9), est le poids, inversement proportionnel à la distance réseau, où α est un paramètre positif prédéterminé (Okabe et al. 2009).

$$\hat{z}_0 = \sum_{p_i \in P_N} w_i z_i \quad (8)$$

$$w_i = \frac{d_s(p_0, p_i)^{-\alpha}}{\sum_{p_i \in P_N} d_s(p_0, p_i)^{-\alpha}} \quad (9)$$

L'outil IDW de SANET utilise comme entrée, outre que les points d'origine et le réseau, trois paramètres ultérieurs :

- "Cell width", qui détermine la distance entre les points dans le nouvel ensemble sur le réseau et donc la dimension des segments pour lesquels une valeur pourra être calculée sur le réseau ;
- "Lambda", qui correspond au paramètre α de la formule (9)
- "Number of sample points", qui est le nombre maximal de points qui seront utilisés pour l'interpolation.

On remarquera que les valeurs ponctuelles des indicateurs ont été calculées à la fois pour le réseau viaire et le réseau routier. En revanche, les interpolations sont calculées seulement pour les segments du réseau viaire. Nous sommes en fait intéressés aux caractéristiques des segments du réseau viaire (y compris en ce qui concerne leur appartenance au réseau routier) pour expliquer leur capacité à catalyser l'activité commerciale en pied d'immeuble. Les segments appartenant au seul réseau routier (autoroutes, voies rapides, tunnels) n'accueillent pas d'activités commerciales sur leurs abords.

Quelques détails techniques de la procédure d'interpolation sont nécessaires pour comprendre la qualité des résultats obtenus. Deux aspects sont particulièrement cruciaux.

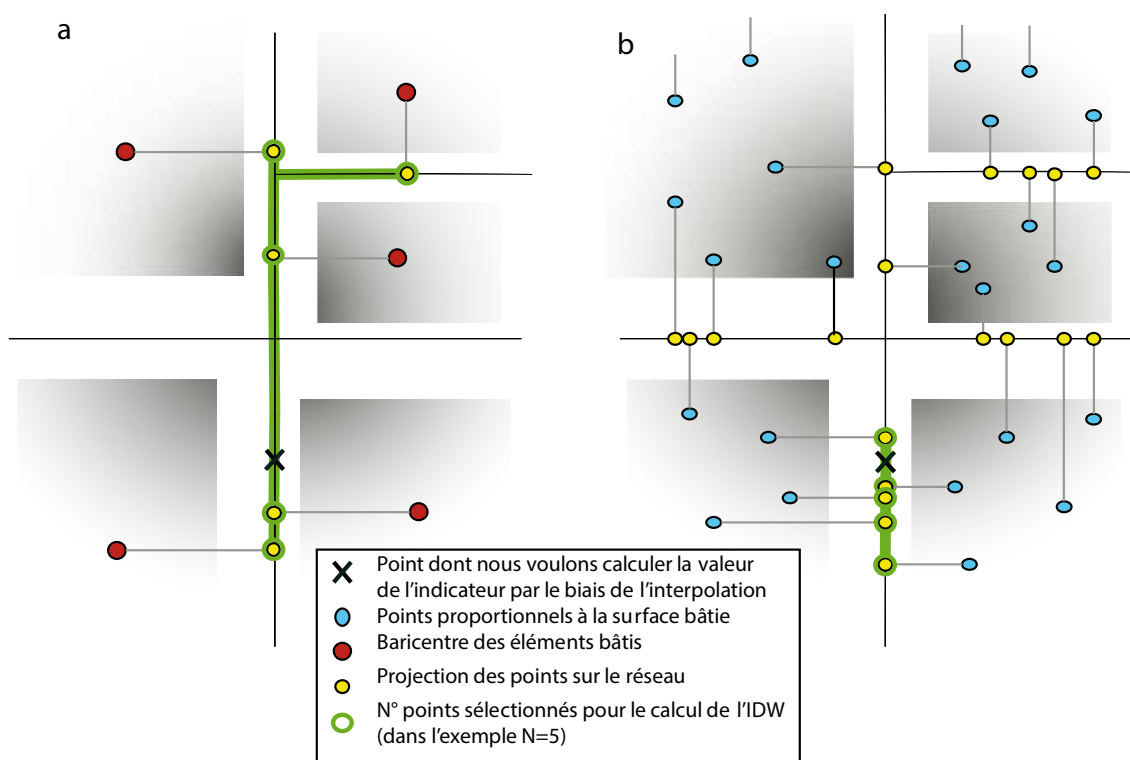


Figure 21 Impact de la définition des points bâtis sur le calcul des interpolations IDW.

Le premier, déjà effleuré dans la section 1.3 est la détermination des points bâtis (figure 11) . Si l'on avait opté simplement pour le barycentre des éléments bâtis de la BD TOPO, qui ressemblent à leur tour plusieurs bâtiments, on aurait arbitrairement assigné à un segment viaire l'ensemble de la masse bâtie du polygone (Figure 11, a). En utilisant une distribution de points aléatoire à l'intérieur du polygone, nous répartissons les projections sur l'ensemble des tronçons viaires qui bordent l'élément bâti. En méconnaissant les points d'entrée des différents bâtiments, nous nous rapprochons davantage de la répartition réelle que dans le cas précédent (Figure 11, b).

Le second aspect est le manque d'un paramètre de distance limite dans SANET pour la sélection des n points les plus proches (en mètres ou en minutes, selon le type de calcul effectué sur UNA) pour l'interpolation des valeurs d'un segment (Figure 22). Il est vrai que dans l'interpolation IDW, les points très distants jouent un rôle très réduit, si l'on dispose de quelques points très proche au segment. Si, en revanche tous les n points les plus proches sont relativement distants du segment, ce dernier risque de prendre des valeurs qui ne sont pas

pertinentes pour sa position dans le réseau. On remarquera aussi que la procédure IDW sélectionne toujours les n points les plus proches selon des distances métriques. Or, dans les interpolations des valeurs calculées sur le réseau routier, il aurait été plus correct de sélectionner les n points les plus proches selon des distances-temps et d'introduire ces distances pour les pondérations de l'interpolation. En réalité, les éventuelles distorsions dues à la faible densité de points autour du segment viaire, ou aux différences entre distances métriques et distances-temps sont importantes seulement pour un nombre réduit de points dans les zones collinaires périphériques de notre aire d'étude.

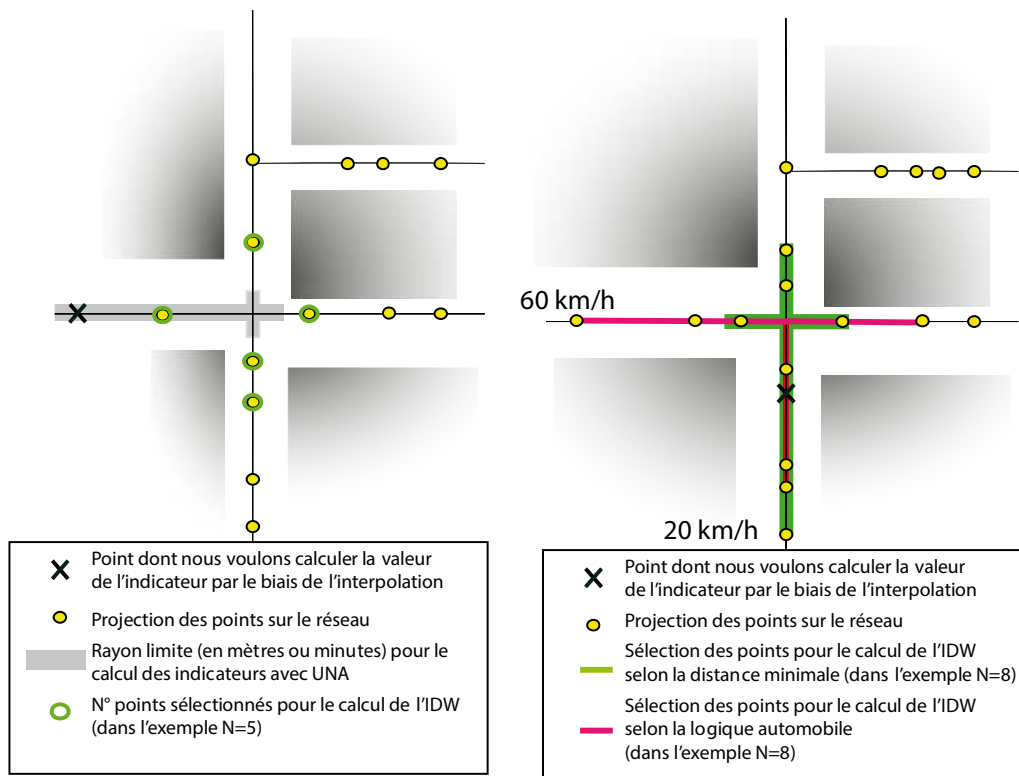


Figure 22 Les problèmes du couplage UNA/SANET : à gauche, le manque de rayon maximal dans la recherche de valeurs à interpoler ; à droite, la non-prise en compte des distances-temps.

3.2.8. La distribution des activités commerciales sur le réseau

La *Kernell Density Estimation* (KDE) est la méthode choisie pour obtenir une distribution de probabilité de localisation des activités commerciales sur le réseau viaire. L'objectif étant d'avoir à la fois une fonction « potentiel commerciale » additive (ce qui est le cas pour la densité de kernel) et de pouvoir considérer le point-commerce issu du géocodage de la BD CCINCA comme un estimateur ponctuel d'une distribution presque gaussienne limité à une petite section du réseau viaire.

Comme déjà pour les interpolations, le calcul des valeurs de densités de kernel sur le réseau viaire sera effectué à l'aide de l'extension SANET, qui prend en charge à la fois la linéarité de l'espace réticulaire et le traitement rigoureux des points de diramation du réseau dans le calcul de la densité de kernel (Okabe et al. 2006).

Pour le calcul de la densité de kernel, les entrées de SANET sont le réseau $N=(V, L)$, constitué de V noeuds (*vertices*) et *le segment* (*links*), ainsi que l'ensemble de points dont on veut

calculer la densité de kernel sur le réseau. Chaque point a une valeur unitaire, d'où la nécessité de calculer l'«équivalent petit commerce» des moyennes surfaces (voir ci-dessous), et de produire un nombre correspondant de points. SANET demande également la longueur de la bande sur laquelle la densité de kernel aura une valeur non nulle (*bandwidth h*): en appliquant cette valeur en toutes les directions à partir du point-commerce, on détermine l'ensemble de points réseau L_y qui ont une distance réseau inférieur à h du point commerce (Figure 23).



Figure 23 Recherche de L_y avec *bandwidth h* sur le réseau $N=(V,L)$ (source : Okabe et al. 2006)

Sur L_y est ainsi définie une fonction inconnue $f(x)$, densité de probabilité de l'événement « localisation commerciale ». A chaque point y sera associée une valeur $f_y(x)$. Sous l'hypothèse que les n points y_1, \dots, y_n soient indépendants et distribués selon la même fonction de densité de probabilité, on peut calculer :

$$K(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{y_i}(x) \quad (10)$$

où $K(x)$ est l'estimateur de kernel pour $f(x)$ dans le point x . Il s'agit d'une estimation non paramétrique dépendante des seuls points assignés, d'une fonction non spécifiée. Si l'espace est homogène (tant comme espace surfacique bidimensionnel, que comme espace réticulaire linéaire), la $K(x)$ peut en effet être calculée selon l'expression (10). Or, dans un réseau, de nombreuses bifurcations rendent l'espace non homogène et cela a un impact sur la distribution de probabilité.

Il existe en littérature de nombreuses théories qui traitent cette particularité en essayant de répondre aux différentes nécessités de modélisation probabiliste selon la problématique traitée. En général, deux caractéristiques doivent être prises en considération : la symétrie de la fonction par rapport au point événement et la continuité/discontinuité dans les points de bifurcation. On obtient ainsi trois cas possibles, représentés dans la Figure 24.

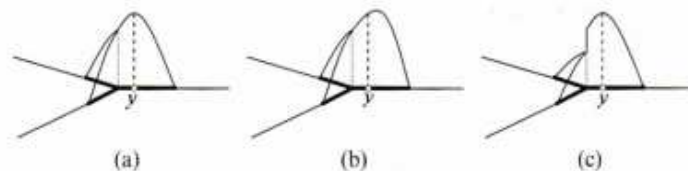


Figure 24 Typologie de fonctions de kernel : (a) centre de la fonction coïncidant avec le point modal ; (b) centre non coïncidant ; (c) fonction discontinue aux nœuds (source : Okabe et al. 2006)

Le cas (a) respecte la contrainte de faire coïncider le point empirique avec le point modal de la fonction, mais la distribution de probabilité de la fonction de kernel n'est plus symétrique autour du point empirique, ce qui implique que la valeur attendue de la fonction de kernel ne coïncide plus avec le point empirique. Pour éviter cela, soit on relâche la coïncidence entre point modal et point empirique, tout en utilisant une fonction continue sur les diramations (b),

soit on continue à imposer la coïncidence entre point modal et point empirique, mais on utilise une fonction discontinue sur les diramations (c). Ces deux options, implémentées sur SANET, sont nommées « *continuous* » et « *discontinuous* » *equal split at point*, respectivement.

$$K_y(x) = \begin{cases} \frac{k(d(x,y))}{(n_1 - 1)(n_2 - 1) \dots (n_s - 1)}, & 0 \leq d(y) \\ 0, & d(y, x) > h \end{cases} \quad K_y(x) = \begin{cases} k(x), & -h \leq x \leq 2d - h \\ k(x) - \frac{n-2}{n}k(2d-x), & 2d-h \\ \frac{2}{n}k(x), & d \leq x \leq h \end{cases}$$

Continuous equal split at point (11)

Discontinuous equal split at point (12)

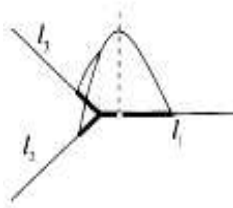


Figure 25 Représentation graphique de la fonction de kernel selon le critère continuous equal split at point (source : Okabe et al. 2006)

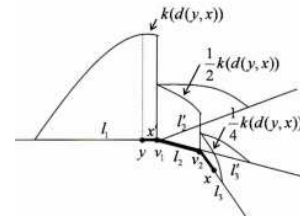
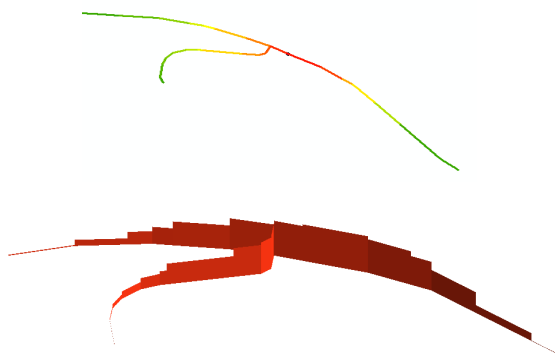


Figure 26 Représentation graphique de la fonction de kernel selon le critère discontinuous equal split at point (source : Okabe et al. 2006)



continuous equal split at point



discontinuous equal split at point

Figure 27 Représentation en 2D (haut) et en 3D (bas) des résultats de l'application de la KDE de SANET sur un point isolé avec les deux différents critères de traitement des valeurs aux noeuds.

Les expressions (11) et (12) permettent de calculer la fonction densité de kernel pour les deux différentes options. Les Figures 25, 26 et 27 visualisent le calcul et les résultats pour un petit exemple d'un point commerce isolé proche d'une bifurcation.

Dans la littérature scientifique, on trouve d'intéressantes discussions sur la méthodologie pour sélectionner la bonne fonction de Kernel par rapport aux processus étudiés (Fotheringham et al. 2000, Adolphson 2010). Néanmoins, selon Epanechnikov (1969) ces choix n'impactent les résultats de façon significative. Dans l'absence d'une théorie spécifique sur l'estimation du potentiel commercial, nous avons testé les deux modélisations de la fonction de kernel, pour retenir finalement celle qui donnait a posteriori les meilleurs résultats pour la modélisation de la relation avec les paramètres configurationnels du réseau.

Au-delà de la fonction de densité, il est également important de développer quelques considérations sur les points-événements et sur les paramètres d'entrée de la fonction.

En ce qui concerne les activités commerciales, il n'est pas réaliste d'assigner le même poids à chaque commerce. Nous avons ainsi calculé un « équivalent petit commerce » pour les moyennes surfaces, en créant un nombre de points-événements proportionnel à la surface de vente (un point tous les 40 m²). La famille « Hotellerie-Restauration » a été traitée de façon différente, car la surface de vente renseignée (40 m² pour tout hôtel et tout restaurant) n'était pas pertinente. Ici, la proportionnalité a été calculée sur les effectifs de l'activité commerciale, en considérant chaque effectif équivalent à 40 m² de surface de vente.

En ce qui concerne le paramètre *bandwith*, les travaux d'Okabe et al. (2006, 2009) suggèrent de ne pas dépasser la valeur de 300 m dans les réseaux viaires urbains. En réalité, même ce paramètre dépend de la problématique traitée. Différents travaux essaient d'identifier une valeur optimale pour ce paramètre (Cao et al. 1994, Williamson 1998) en fonction de l'ensemble de la base de données utilisée pour le calcul de la densité de kernel. Des travaux relativement plus récents suggèrent d'adopter des valeurs à géométrie variable (*adaptive bandwith*) ou même d'avoir une approche exploratoire à la recherche de la bandwidth (Brunsdon 1995; Brunsdon et al. 2002). Suivant cette suggestion, nous avons exploré différentes valeurs de la bandwidth, toujours inférieures aux 300 m indiqués par Okabe. Nous avons finalement opté pour la plus petite des valeurs testées, correspondant à 80 mètres, qui est une valeur très proche à celui choisi par Porta et al. pour Bologne et Barcelone (2007, 2009), en dépit de la différente approche dans la recherche de la densité de kernel (aréale à Bologne et Barcelone, réticulaire dans notre étude sur l'agglomération de Nice).

En conclusion, les valeurs des densités de kernel, valeurs additives pour les équivalents petits commerces de toutes les petites et moyennes surfaces commerciales de l'aire d'étude, ont été calculées par une approche réticulaire sur le réseau viaire, en testant différentes formes fonctionnelles et différentes largeurs de bande. Dans tous les cas, les valeurs de la densité de kernel suivent une loi de puissance, comme déjà observé par Porta et al. (2009).

3.2.9. L'unité de base : le segment viaire

Les calculs des indicateurs configurationnels par interpolation IDW et celui des densités de kernel des activités commerciales ont abouti, pour des nécessités de calcul, à deux différentes subdivisions des tronçons de la BD TOPO en segments viaires plus petits. L'opération de la KDE a ainsi produit 368 237 segments pour les 3628 km de réseau viaire de l'aire d'étude élargie. Sur le même périmètre, l'interpolation IDW produit 415 881 segments, qui ont des dispositions différentes.

En réalité, les segmentations produites pour les calculs KDE et IDW ont été choisies de façon à avoir des discrétisations plus fines de celles nécessaires à notre étude. Cela nous a permis de rapporter les issues de ces calculs à une segmentation plus grossière, sans polluer les valeurs ainsi déterminées. En considération de notre problématique (influence des paramètres réticulaires pour la localisation des commerces, compte tenu du mouvement libre du piéton et de l'automobile dans l'espace urbain) et des limites de nos données (méconnaissance des points d'entrée des bâtiments et connaissance approximative des points-commerces, géolocalisés sur la base d'adresses attribuées de façon approximative sur le réseau) nous

avons ainsi produit des segments viaires toujours inférieurs à 50 mètres avec le protocole suivant :

- Si un élément du réseau viaire de la BD TOPO (défini comme tronçon connectant deux croisements) est inférieur à 50 m, il est gardé en l'état ;
- Si un élément du réseau viaire de la BD TOPO est supérieur à 50 m, il est divisé dans le nombre minimal de parties égales, permettant d'avoir des segments de longueur inférieurs à 50 m.

Le réseau original ayant 30 391 arcs et 27 112 nœuds a ainsi été transformé dans un second réseau de 88 760 arcs (dont la longueur est comprise entre 27 et 50 mètres, avec une longueur moyenne de 41 mètres) et 82 365 nœuds. Ce nouveau réseau, avec sa segmentation, sert de référence commune pour un nouveau calcul de valeurs des indicateurs configurationnels et des valeurs de densité de kernel d'activité commerciale. Un petit script a été conçu pour automatiser cette double conversion, à l'aide du *Model Builder* d'ArcGIS.

Il ne s'agit pas d'un simple expédient calculatoire pour mettre de l'ordre dans nos données. Le nouveau segment viaire, d'environ 40 mètres de long, constitue la clé de lecture, à l'échelle pertinente, pour mettre en relation les « causes » (les différents indicateurs configurationnels) avec les « effets » (les densités commerciales). L'identification d'un élément réticulaire, le petit tronçon viaire, comme élément de base de l'analyse est également une importante innovation méthodologique de notre recherche. Dans leurs travaux sur Bologne et Barcelone, Porta et al. (2006, 2009) effectuent à la fois des interpolations et des estimations de densités de kernel, mais avec une approche aréale, pour reporter des phénomènes ponctuels (la localisation des commerces) et d'autres réticulaires (les caractéristiques configurationnelles) au dénominateur commun de l'élément surfacique (le pixel).

Nous pensons que l'approche entièrement réticulaire n'est pas seulement un perfectionnement du calcul, mais une modélisation correspondant mieux aux phénomènes étudiés : la localisation des petits et moyens commerces se fait sur un segment de l'espace public, le tronçon viaire, où les devantures permettent un contact visuel avec les chalands, et non sur un simple élément de surface.

3.2.10. La recherche de relations statistiques entre paramètres du réseau et distributions commerciales : les réseaux bayésiens

Une fois obtenues toutes les valeurs des variables (indicateurs configurationnels, paramètres intrinsèques, densités commerciales) pour chaque segment viaire, nous sommes passés à la recherche de relations par une approche de *data mining* (fouille de données). Dans la littérature scientifique, il existe une grande variété de techniques et d'approches à la recherche inductive de relations entre variables spatialisées. En ce qui concerne les modèles de régression, par exemple, il existe la grande famille des techniques de régression spatiale (Fotheringham et al. 2000, Anselin et Bera 1998). Nous faisons néanmoins l'hypothèse que la structure spatiale des phénomènes est déjà appréhendée par les indicateurs configurationnels, et cela à différentes échelles, ce qui nous permet d'appliquer des techniques de fouille de données de type a-spatial. Par l'analyse des résidus au modèle on pourra éventuellement détecter des structures spatiales résiduelles, susceptibles de suggérer l'intégration de nouvelles variables explicatives dans la base de données.

Leur grande souplesse dans l'apprentissage des relations (linéaires ou non-linéaires ou même non fonctionnelles), leur capacité à intégrer l'incertitude probabiliste et les acquis particuliers du laboratoire ESPACE dans leur application à la modélisation des données urbaines (Fusco 2004, 2005, 2008, 2010, 2012), nous ont fait opter pour les réseaux bayésiens comme technique de fouille de données.

Un réseau bayésien est un modèle graphique (au sens de la théorie des graphes) de connaissance en probabilité (Jensen 2001, Korb et Nicholson 2004). Graphiquement, il est constitué d'un ensemble d'évènements (ou variables) reliés par des flèches (Figure 28). L'existence d'une flèche orientée allant d'un évènement A à un évènement B symbolise un lien de cause-à-effet entre eux : il peut s'agir d'une causalité stricte 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, A est la seule variable indépendante du réseau.

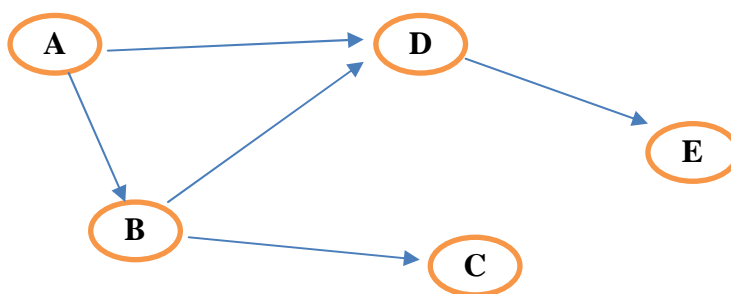


Figure 28 La structure d'un réseau bayésien simple constitué de 5 variables.

Le formalisme graphique du réseau bayésien s'accompagne d'un formalisme probabiliste associé de type quantitatif. Selon ce formalisme, un réseau bayésien est défini par (Becker et Naïm, 1999) :

un graphe acyclique (c'est-à-dire sans boucles) et orienté G , constitué de nœuds (les variables V_i) et d'arcs orientés (A_{ij});

un espace probabilisé fini (Ω, Z, p) , où Ω est l'univers des possibles, Z est une tribu des évènements de Ω , et p une application $Z \rightarrow \mathbb{R}$ avec domaine image $[0,1]$ et pour laquelle $p(\Omega)=1$;

un ensemble de variables aléatoires correspondant aux nœuds du graphe et définies sur (Ω, Z, p) , tel que la probabilité globale du réseau soit le produit des probabilités de chaque nœud V_i conditionnellement à l'ensemble de ses nœuds parents $C(V_i)$:

$$p(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n p(V_i | C(V_i))$$

Cette dernière expression nous dit que la distribution des probabilités conjointes des variables du réseau a une factorisation très particulière, directement liée à la structure du graphe. 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). On appelle « structure » du réseau bayésien, l'ensemble des relations causales qui relient ses variables (les arcs orientés A_{ij}). 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 marginales (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 marginales pour les nœuds indépendants et à des tables de probabilités 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 le tableau 29, nous montrons les 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 28. La table doit être lue en ligne : si, par exemple, la variable A est comprise entre 2 et 30, alors la variable B assumera une valeur comprise entre 10 et 100 avec probabilité 0,90, comprise entre 100 et 200 avec probabilité 0,05 et comprise entre 200 et 450 avec probabilité 0,05.

p(B A)	Variable B		
Variable A	[10 100)	[100 200)	[200 450]
[2 30)	0,90	0,05	0,05
[30 60)	0,05	0,80	0,15
[60 90]	0,05	0,25	0,70

Figure 29 Table des probabilités conditionnelles de la variable B connaissant A.

Les derniers développements théoriques (Druzdzel et Simon 1993, Pearl 2000) caractérisent la causalité comme une propriété systémique : elle devient une notion rigoureuse dès que nous mettons chaque élément dans le contexte du système que nous voulons étudier, d'autant plus que la direction d'une relation de cause-à-effet dans un système peut être aisément renversée dans un autre système. Selon Pearl (2000), il n'est pas étonnant que la réflexion sur la notion de causalité ait été remise à l'ordre du jour après l'introduction de la notion de système (système) et en conséquence des problèmes opérationnels constitués par la création de systèmes artificiels (cybernétique). Dans le contexte des analyses de système, la notion de causalité s'est débarrassée du caractère encore métaphysique qu'elle présentait dans l'approche de certains positivistes. Il existe des causes et il existe des effets en référence à une définition précise du système étudié, ce qui introduit une asymétrie fondamentale dans l'observation des phénomènes. La façon la plus pertinente de modéliser les relations causales opérant dans un système est de rendre explicite cette asymétrie et d'avoir recours à un double formalisme couplant un graphe causal avec des relations mathématiques, ce qui est rendu possible par la technique des réseaux bayésiens.

La structure des réseaux bayésiens introduit cependant des contraintes pour la modélisation. En particulier, la structure du réseau ne peut pas contenir des boucles. Cela a d'importantes conséquences sur le type de modèle qui peut être développé pour le système étudié : l'existence de boucles d'interaction entre éléments ne peut être mise en évidence par le biais d'un seul réseau bayésien.

L'une des utilisations les plus intéressantes des réseaux bayésiens est celle de la causal knowledge discovery, c'est-à-dire de la recherche automatique des liens causaux entre les variables d'une base de données. À partir d'un ensemble de variables observées, même de façon lacunaire et incertaine, sur un certain nombre d'individus, de puissants algorithmes de génération de réseaux bayésiens permettent de déduire en probabilité des liens de cause à effet

entre les variables. Les algorithmes les plus complets peuvent apprendre, et ainsi reproduire, tant la structure que les paramètres du réseau. Dans notre application de fouille de données, la structure du réseau recherchée est relativement simple et constitue une forte contrainte à l'apprentissage du réseau : nous cherchons des structures explicatives d'une seule variable (la densité commerciale des tronçons viaires), avec tous les autres paramètres (indicateurs configurationnels et caractéristiques intrinsèques) comme possibles variables explicatives, seules ou en combinaison entre eux. Selon la paramétrisation de la recherche, la discrétisation des variables, et l'importance relative donnée à l'apprentissage des différentes plages de la variable objectif, nous avons déterminé, grâce à l'algorithme TabooOrder du logiciel BayesiaLab (Bayesia 2009), le réseau bayésien le plus probable, permettant d'expliquer les densités commerciales en connaissant la base de données de l'aire d'étude restreinte (52 353 tronçons viaires).

La recherche des relations de causalité probabiliste entre les indicateurs configurationnels et la variable objectif passe par une discrétisation de leurs valeurs. La densité commerciale, qui présente une distribution clairement non-linéaire, a été discrétisée manuellement en classes dont l'ampleur augmente d'un facteur 4, selon une progression géométrique. Ces classes ont une signification particulière en termes de densité commerciale :

- Classe 1 (KDE = 0): absence d'activité commerciale et d'influence de potentiel commercial provenant d'un tronçon proche – potentiel commercial nul.
- Classe 2 (KDE= (0;0,4]): absence d'activité commerciale, mais influence de potentiel commercial provenant d'un tronçon proche - potentiel commercial faible.
- Classe 3 (KDE= (0,4;1,6]): présence d'un équivalent petit commerce et/ou influence importante de potentiel commercial de tronçons proches – potentiel commercial moyen.
- Classe 4 (KDE= (1,6;6,4]): présence de plusieurs activités commerciales (toujours en équivalent petits commerces) – potentiel commercial élevé.
- Classe 5 (KD>6,4): présence de nombreuses activités commerciales – potentiel commercial très élevé.

D'autres discrétisations ont été testées, mais avec des résultats moins probants dans le *data mining* et des interprétations moins aisées en termes de potentiel commercial.

Plusieurs discrétisations ont également été appliquées aux autres variables, mais sans passer par des passages manuels. Des discrétisations par k-means ont ici été comparées à des discrétisations par arbre de décision par rapport à la variable objectif, en ciblant dans les deux cas 5 classes par variable. La discrétisation par arbre de décision a ici montré un petit avantage dans la performance du modèle de *data mining*.

3.2.11. L'analyse par stress test : modification des réseaux et conséquences sur le potentiel commercial

Une fois déterminé un modèle satisfaisant pour l'explication des densités commerciales à partir des indicateurs configurationnels, nous sommes passés à la phase de stress test du maillage commercial de petites et moyennes surfaces, par construction de scénarios contrastés d'évolution du système morphologique urbain pour l'aire d'étude. Les six différents scénarios découlent de l'application de règles d'évolution des réseaux urbains, qui portent aux extrêmes

certains phénomènes identifiés dans la littérature scientifique. Les règles d'évolution ont été implémentées par des scripts en langage Python sur la plateforme ArcGIS.

Nous soulignons que l'application de ces règles ne produit pas de scénarios réalistes d'évolution des réseaux viaires de l'aire d'étude. Cela aurait demandé une analyse minutieuse des documents d'urbanisme de chaque municipalité et des éventuels projets débattus dans l'aire d'étude. Notre objectif est une prospection de l'éventail du possible, suivant une extrémisation de logiques qui sont actuellement à l'œuvre, ou ont été traditionnellement à l'œuvre, dans nos espaces urbains.

La littérature scientifique en urbanisme a ainsi observé au cours des dernières décennies une modification des espaces publics dictée par des nouvelles préoccupations esthétiques, socio-économiques et culturelles, portant par exemple à l'appropriation exclusive par les riverains d'espaces qui sont dépouillés de leur rôle de catalyseur de relations pour l'ensemble de l'espace urbain (Navez-Bouchanine 2002). Des aspirations tant économiques que sécuritaires amènent ainsi riverains, promoteurs immobiliers et collectivités locales à réduire la pervasivité et la connectivité de l'espace public, permettant à la fois des économies (pour les promoteurs et les collectivités locales) et la concrétisation du refus de vivre ensemble au sein de l'espace urbain pour les riverains (Charmes 2011). Dans d'autres contextes, une volonté de s'engager d'avantage dans la *res publica* et une promotion de valeurs culturelles et esthétiques différentes, amène riverains et promoteurs au phénomène de « clubbisation », dont les effets sont très semblables à la logique précédente : une partie du domaine public est approprié par des riverains et bloqué dans sa possibilité d'évolution fonctionnelle et de fréquentation grand public. Les deux phénomènes sont par exemple à l'œuvre dans la ville de Marseille, où plusieurs centaines de kilomètres de voie publique ont été de facto privatisés au sein de plus de 1000 ensembles résidentiels fermés au cours des vingt dernières années (Dorier et al. 2012). Dans les deux cas, les opportunités pour le développement de l'activité commerciale se réduisent corrélativement à la fermeture de voirie publique.

D'autres phénomènes caractérisent en revanche le lotissement des extensions urbaines, avec de nouvelles formes urbanistiques (souvent résidentielles) qui se déploient autour d'axes routiers linéaires ou de structures de desserte viaire arborescentes ou cycliques. Ce phénomène est déjà très présent dans l'aire d'étude au cours des dernières décennies (Graff 2014).

A l'opposé de ces tendances, les considérations sur l'importance des interconnexions multiples et redondantes (Salingaros 2005) ainsi que la compréhension des logiques historiques qui ont produit les formes historiques typiques de la ville de Nice (Graff 2000) permettent de concevoir des scénarios volontaristes tout à fait différents. Ici, les réseaux urbains évoluent vers un plus grand niveau de connectivité et éventuellement vers un maillage plus fin et homogène de l'ensemble de l'espace urbain.

Une dernière catégorie de modification des réseaux urbains est exemplifiée par la piétonisation des rues, la création de zones 30 et la création d'autoroutes apaisées (où la vitesse maximale est fixée à 60 ou 70 km/h à la traversée des agglomérations). Les objectifs de ces interventions sont multiples : diminuer l'avantage comparatif du déplacement automobile par rapport aux déplacements doux ou en transport en commun, augmenter l'urbanité des espaces publics et, même sur les infrastructures routières, donner la priorité à la capacité par rapport à la vitesse. On peut positionner dans ce contexte les études de l'Agence

d'Urbanisme de Grenoble sur le chrono-aménagement du territoire (Jourdan 2011) ainsi que les travaux sur les métriques lentes dans la gestion de la voirie (Genre-Grandpierre 2007).

Ces différentes logiques évolutives ont ainsi amené à la définition des six règles suivantes, à la base de différents scénarios pour le réseau viaire de l'aire d'étude ; il s'agit de règles de transformation locale des tronçons, portant à l'émergence de réseaux aux configurations macroscopiquement différentes du réseau de référence :

- Règle 1 : augmentation de la connectivité du réseau par la création de nouveaux arcs permettant de développer de nouvelles connexions à partir des nœuds de degré 1 ou 3 du réseau original (on considère ici le réseau original de la BD TOPO qui ne possède que exceptionnellement des nœuds de degré 2) ; par conséquent, le réseau perd (au moins localement) tout caractère arborescent, en suivant une logique de redondance des connexions.
- Règle 2 : densification du maillage du réseau par création de nouvelles rues d'interconnexion dans les îlots trop grands (2 ha dans notre application), prenant comme exemple les caractéristiques de régularité du damier historique niçois.
- Règle 3 : diminution drastique de la connectivité par suppression (privatisation) de tout tronçon redondant en ramenant le réseau original à son arbre de recouvrement minimal ; cette règle porte à l'extrême la logique de réduction des connexions redondantes et de transformation du réseau urbain dans une structure arborescente.
- Règle 4 : diminution de la connectivité du réseau par fusion des îlots trop petits (2 ha dans notre application), en supprimant (privatisant) un ou plusieurs tronçons qui les bordent, selon le phénomène de clôture sélective assimilable à la clubbisation et à l'appropriation privée d'espaces publics ; à la différence de la règle précédente, de grandes mailles continuent à structurer la connectivité de l'ensemble de l'espace urbain.
- Règle 5 : poursuite de la croissance arborescente du tissu urbain, par création de segments proportionnels aux dimensions des tronçons existants, auxquels ils sont connectés par une simple bifurcation se terminant en cul-de-sac ; cette règle poursuit la logique arborescente des nouveaux lotissements, tout en préservant la connectivité et le maillage du réseau existant.
- Règle 6 : réduction et homogénéisation des vitesses sur le réseau routier (toutes les vitesses supérieures à 30 km/h sont ramenées à cette valeur), permettant de rapprocher les métriques accélérantes de l'espace-temps de l'automobiliste à celle, plus homogène, des distances parcourues par les piétons. Même si cette règle ne modifie pas la configuration du réseau pour le piéton, les indicateurs configurationnels pour le réseau routier sont altérés.

Les réseaux résultant de l'application de chaque règle évolutive sont ensuite analysés par les techniques de la MCA. Des nouveaux indicateurs configurationnels sont calculés. Dans l'hypothèse (très contraignante) de toute chose étant égale par ailleurs (population, éléments bâtis, grandes surfaces commerciales, etc.) nous vérifions ainsi l'impact possible des transformations réticulaires sur la réorganisation du maillage des petits et moyens commerces dans la ville (voir section 2.3). L'objectif, nous le soulignons encore une fois, est de

comprendre le rôle des morphologies des réseaux urbains dans l'organisation de l'offre commerciale et pas de définir des scénarios opérationnels d'intervention sur le tissu urbain.

3.3. Résultats

3.3.1. Les caractéristiques configurationnelles des réseaux viaires de l'agglomération niçoise

Dans cette section nous présenterons les résultats des analyses configurationnelles par l'approche MCA appliquées à l'agglomération niçoise. Nous essayerons également d'interpréter les résultats par rapport aux spécificités de l'aire d'étude. Comme indiqué dans la section 1.2, les calculs ont été effectués sur l'ensemble de l'aire d'étude élargie (24 communes). Les résultats seront néanmoins cartographiés et commentés seulement pour l'aire d'étude restreinte (les trois grandes communes de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer auxquelles s'ajoute une zone tampon d'un kilomètre de large), car dans la partie plus périphérique les résultats sont biaisés par des effets de bord trop importants.

En faisant varier les échelles des fenêtres mobiles de calcul, les points d'origine et de destination pour les chemins minimaux, les pénalisations pour la traversée des intersections routières, etc., nous avons calculé plus d'une centaine d'indicateurs. Nous nous focaliserons ainsi sur une petite sélection d'indicateurs, permettant de montrer les résultats les plus marquants à la fois pour comprendre les choix méthodologiques que pour appréhender les spécificités de notre aire d'étude.

Seront ainsi proposés six groupes de cartes thématiques, qui illustreront différents aspects qui émergent par nos analyses : chaque groupe fournira une comparaison de plusieurs indicateurs ou cadrages, qui auront comme objectif la comparaison des valeurs et les variations qui découlent des différents choix méthodologiques d'une carte à l'autre, et par les différentes positions des éléments au sein des configurations spatiales au sein d'une même carte.

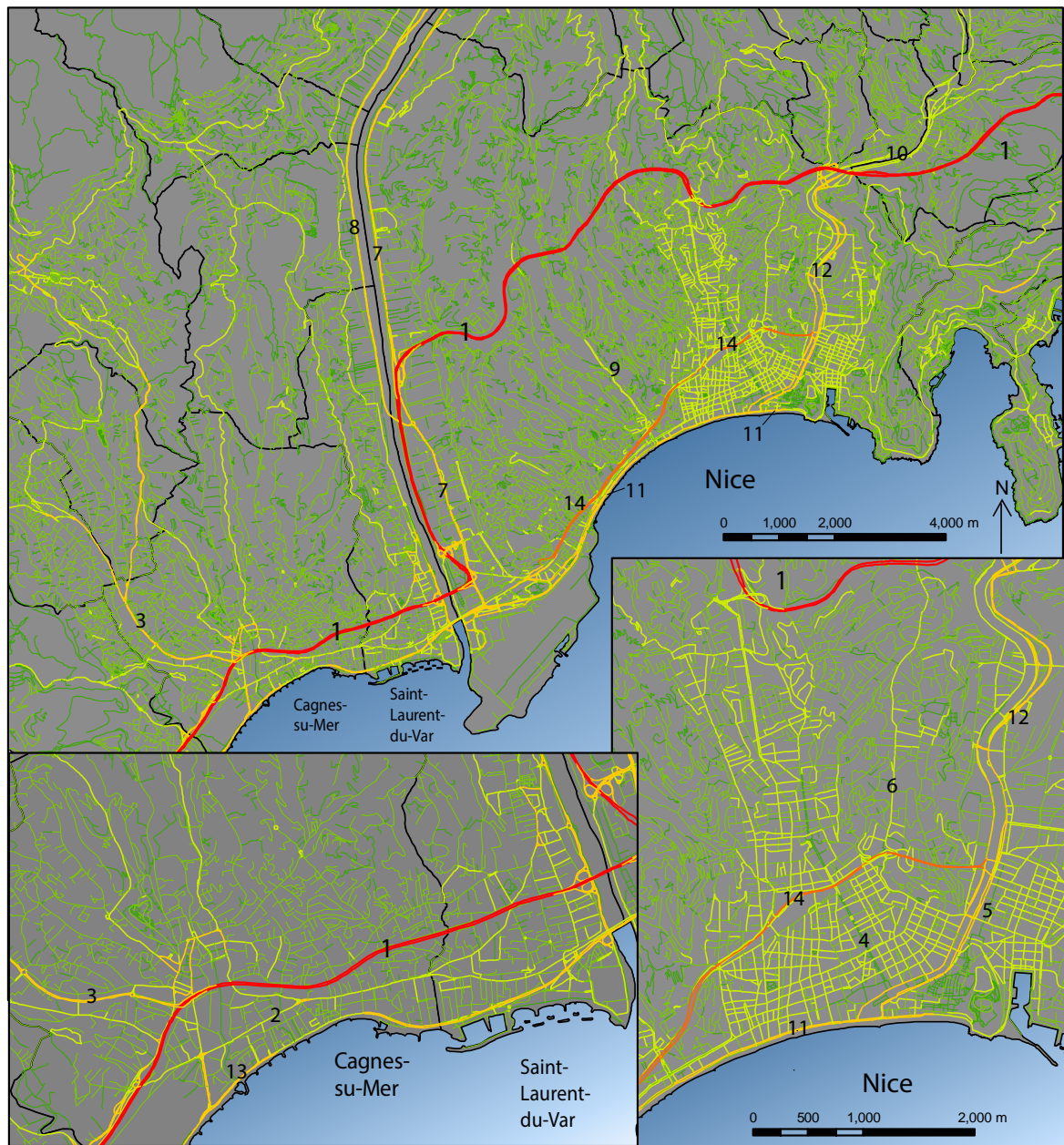
Pour aider la lecture des phénomènes territoriaux, on fera souvent référence dans le texte aux axes viaires et routiers identifiés dans la Figure 30 et au zonage de l'aire d'étude proposée dans la Figure 31, qui se base à la fois sur des caractéristiques historiques et morphologiques des tissus urbains (centres historiques, extensions urbaines XIX et première moitié du XX siècle, extensions plus récentes, grands équipements) et sur la présence d'éléments marquants du relief et de l'hydrographie (zones collinaires, plaines fluviales).

L'importance des méthodologies dans l'appréhension de la forme urbaine

Avant d'aborder la discussion des résultats des analyses de MCA, on souhaite porter l'attention sur les éléments de base de la forme urbaine analysée : les trames viaire et bâtie. Les cartes dans les Figures 32 et 33 montrent comment différents choix méthodologiques dans l'appréhension, individuelle ou combinée, de ces deux composantes de la forme des tissus urbains, peuvent amener à des résultats très différents pour le même indicateur configurationnel : la centralité d'accessibilité simplifiée pour le mouvement libre piéton dans un rayon de 300 mètres.

La Figure 32 montre ainsi les valeurs de cet indicateur calculé d'abord en considérant la seule trame bâtie dans un espace isotrope régi par des distances euclidiennes (à vol d'oiseau) entre points, et, ensuite, en considérant de façon combinée les deux composantes de la forme urbaine et en mesurant les distances réseau entre les points bâtis. Dans la Figure 33, en

revanche, nous comparons l'approche combinée à une appréhension de la forme urbaine par la seule trame viaire : ici les points origine/destination du mouvement libre piéton sont des points distribués de façon homogène le long du réseau.



Principaux axes des réseaux routier / viaire :

■ Communes de l'aire d'étude

Source (réseau) : BD TOPO IGN

- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| 1 Autoroute A8 | 8 Boulevard du Mercantur bis |
| 2 Avenue de Nice | 9 Boulevard la Madeleine |
| 3 Avenue des Alpes | 10 Pénétrante du Paillon |
| 4 Avenue Jean Médecin | 11 Promenade des anglais |
| 5 Avenue de la République | 12 Route de Turin |
| 6 Boulevard de Cimiez | 13 Route du Bord de Mer |
| 7 Boulevard du Mercantur | 14 Voie rapide Pierre Mathis |

Vitesses maximales [Km/h]:

- | | |
|--------|----------|
| — 4-10 | — 50 |
| — 20 | — 60-70 |
| — 30 | — 90-110 |

A. Araldi, G. Fusco 2015

Figure 30 Vitesses routières dans l'aire d'étude et identification des axes principaux

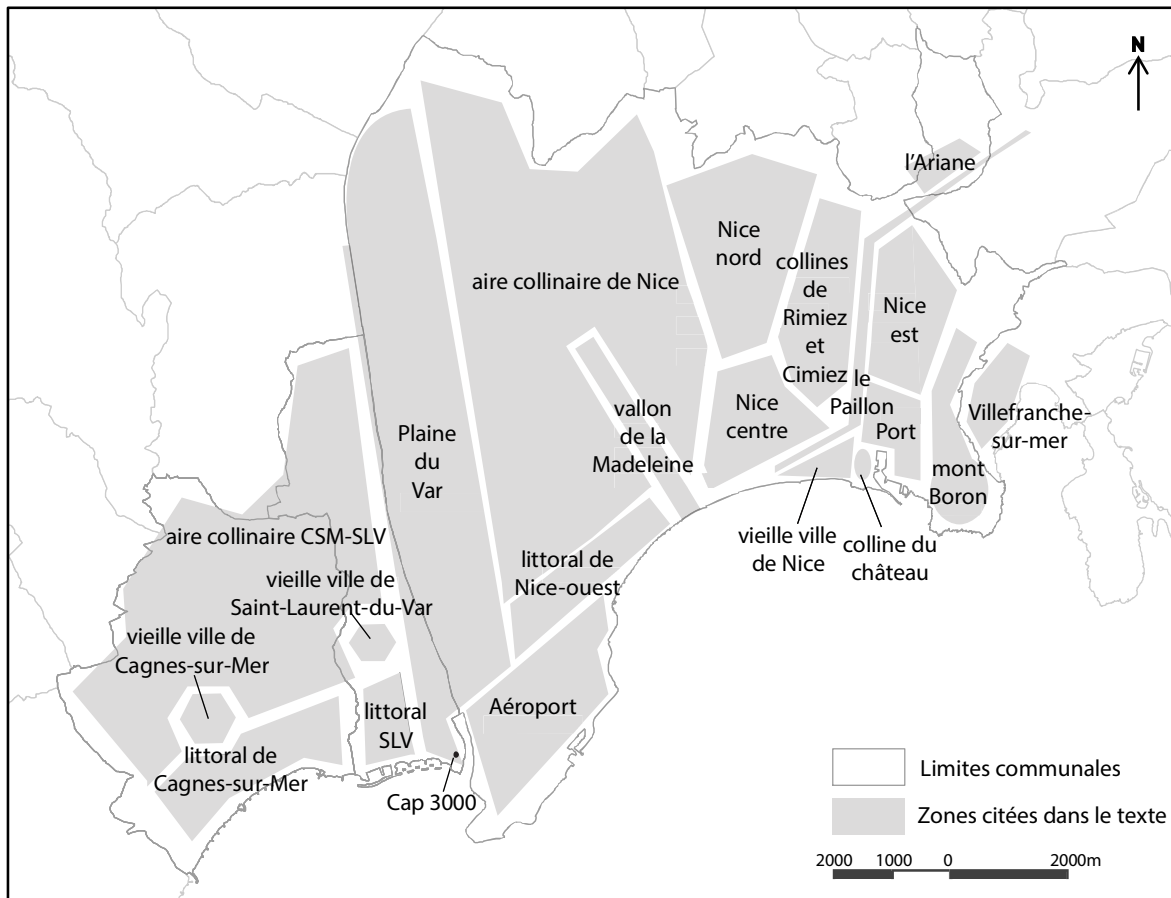


Figure 31 Zonage de référence pour les commentaires dans le texte.

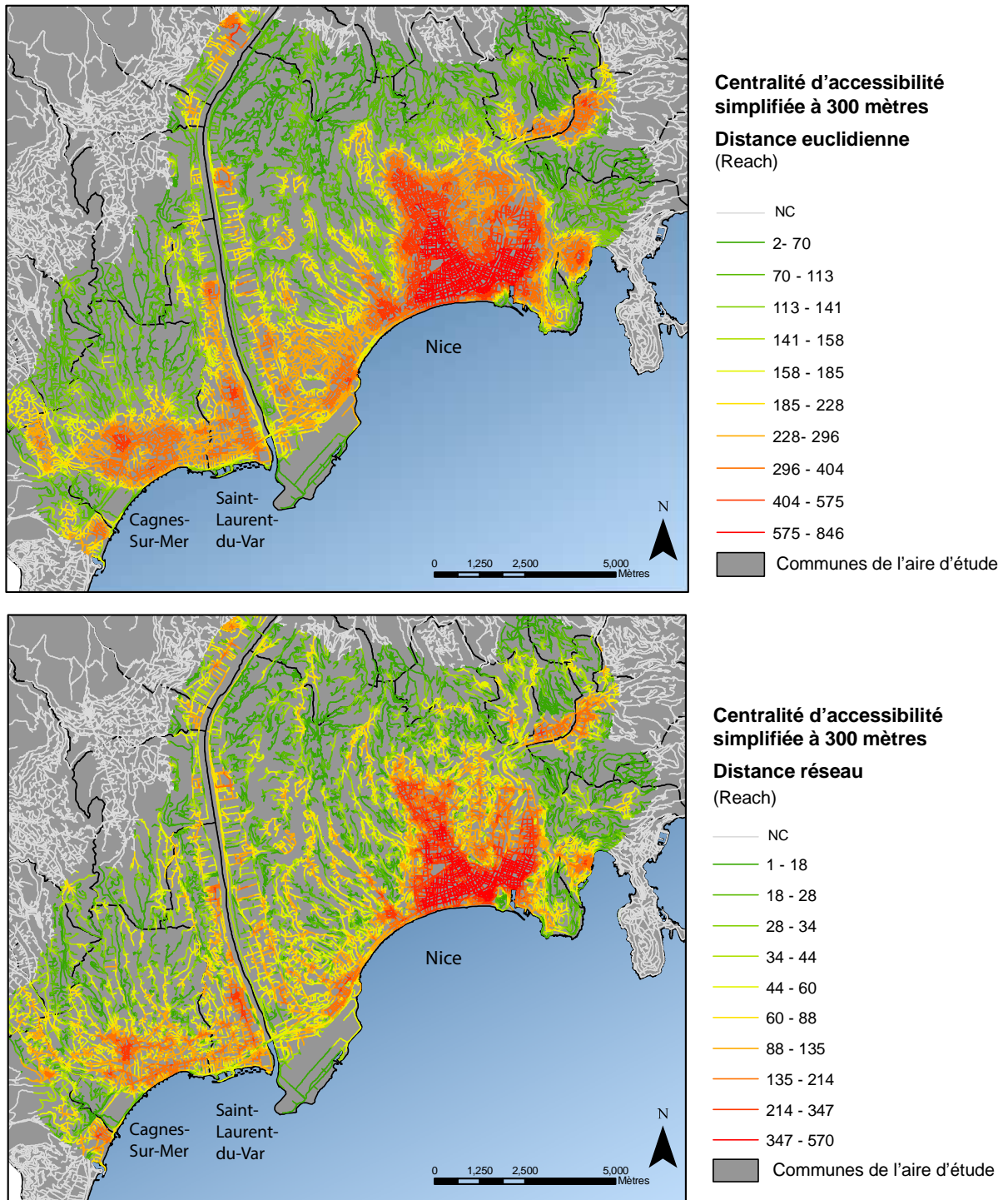
Les valeurs des accessibilités de proximité dans l'espace euclidien (Figure 30, en haut) semblent suggérer l'existence d'un vaste espace continu de centralité correspondant à l'aire centrale de Nice (du port à l'est, à la vieille ville, à Nice-centre et à Nice-nord, en passant par la colline de Cimiez). D'autres espaces continus de centralité se retrouvent à Nice Ouest (du bas vallon de la Madeleine à la basse plaine du Var, en passant par les espaces collinaires adjacents) et entre Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer (en englobant les vieilles villes et les espaces littoraux). Des centralités secondaires émergent plus en périphérie, avec une structure relativement compacte et continue autour de petits espaces de densification du bâti. La connaissance du terrain et la comparaison avec les cartes suivantes nous permettent de dire que cette carte fournit une image faussée de la distribution des valeurs des centralités de proximité dans l'aire d'étude. La composante réticulaire est en effet essentielle pour pouvoir mieux appréhender les relations entre les éléments bâtis de la ville. La carte suivante (Figure 30, en bas) montre ainsi le rôle essentiel des relations configurationnelles dans les proximités locales, qui réduisent considérablement les espaces de centralité précédemment identifiés, en éliminant l'impression de continuum et en soulignant l'émergence de formes axiales. Le premier espace de centralité, celui du centre niçois, tout en ayant une grande épaisseur, est ainsi une structure à V, qui relie la plaine du Paillon à l'est à la plaine centrale, mais qui exclue la colline de Cimiez. Il correspond, en première approximation à l'espace desservi par la première ligne du tramway niçois et, en tout cas à l'espace structuré par les deux grands

axes de croissances qui se départent des places Garibaldi à l'est et Masséna à l'ouest (Graff 2000).

Les autres espaces de centralité dans l'aire d'étude sont des structures axiales de moindre épaisseur : le boulevard de la Madeleine, l'axe côtier de la Promenade des Anglais et du Bd de la Californie à Nice-ouest, un axe longitudinal reliant le vieux village de Saint-Laurent à son bord de mer, ainsi que l'axe péri-littoral entre Saint-Laurent et Cagnes-sur-Mer, et une seconde structure longitudinale entre la vieille ville de Cagnes et son bord de mer. D'autres espaces de centralité secondaire émergent, toujours plus ou moins axiaux (sauf que dans la vieille ville de Villefranche-sur-mer) et très fragmenté.

Seule l'approche configurationnelle et réticulaire peut ainsi cueillir le rôle du réseau viaire dans la fragmentation de l'espace urbain et dans la structuration de centralités axiales. Même à cette petite échelle d'interaction et avec l'indicateur plus simple de la MCA, on identifie quelques particularités de la forme urbaine de l'aire d'étude qui sera mieux appréhendée par l'analyse des autres indicateurs : les contraintes du relief dans la structuration du réseau, mais, en même temps, l'abandon dans les espaces plus récemment urbanisés (les secteurs occidentaux de l'agglomération et les périphéries collinaires) des principes de trame viaire pervasive et interconnectées susceptibles de faire percoler les centralités axiales dans des espaces plus étendus.

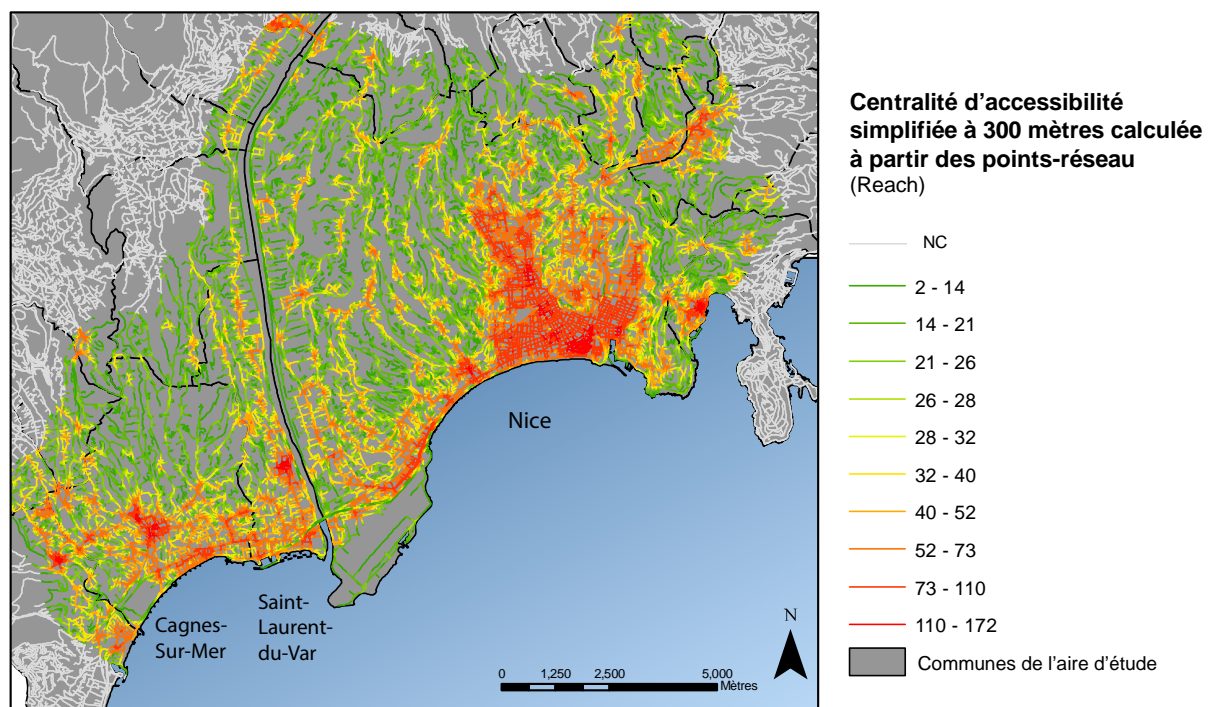
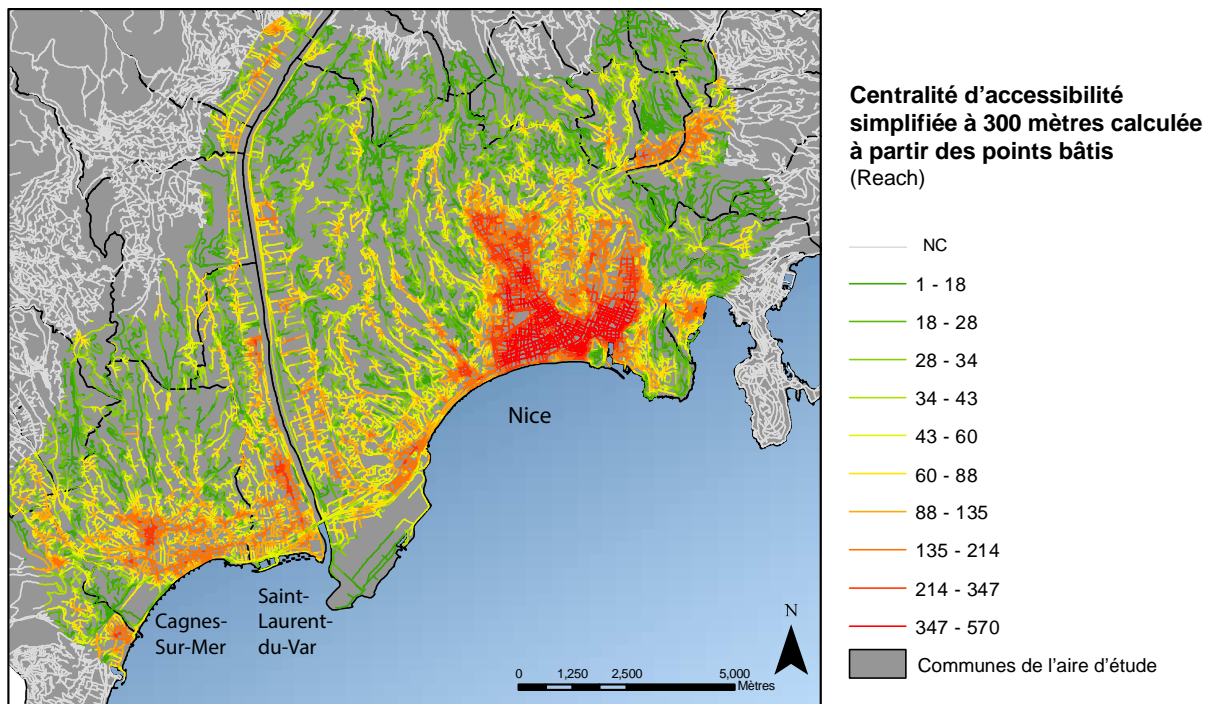
En comparaison, les simplifications et les distorsions introduites par la seule prise en compte de la composante réticulaire de la forme urbaine (Figure 33) ne sont pas aussi importantes. Les structures spatiales des deux cartes dans la Figure 33 sont ainsi relativement semblables. Les calculs effectués à partir de la seule trame viaire font émerger encore mieux les structures axiales périphériques, en sous-estimant, en revanche, le rôle des fortes densités bâties qui insistent sur un nombre limité de segments viaires (comme le haut du vallon de la Madeleine). Ces quelques considérations justifient l'approche retenue dans notre recherche, notamment la combinaison de la trame bâtie (les points bâtis) avec la configuration des réseaux dans les analyses de la MCA. Il reste néanmoins intéressant de vérifier dans quelle mesure, avec quelques simplifications, la prise en compte de la seule trame viaire ne saurait pas parvenir à des résultats semblables.



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 32 *Comparaison de la centralité d'accessibilité simplifiée piétonne à 300 mètres calculée sur le réseau (haut) ou en considérant un espace isotrope et des distances euclidiennes (bas)*



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

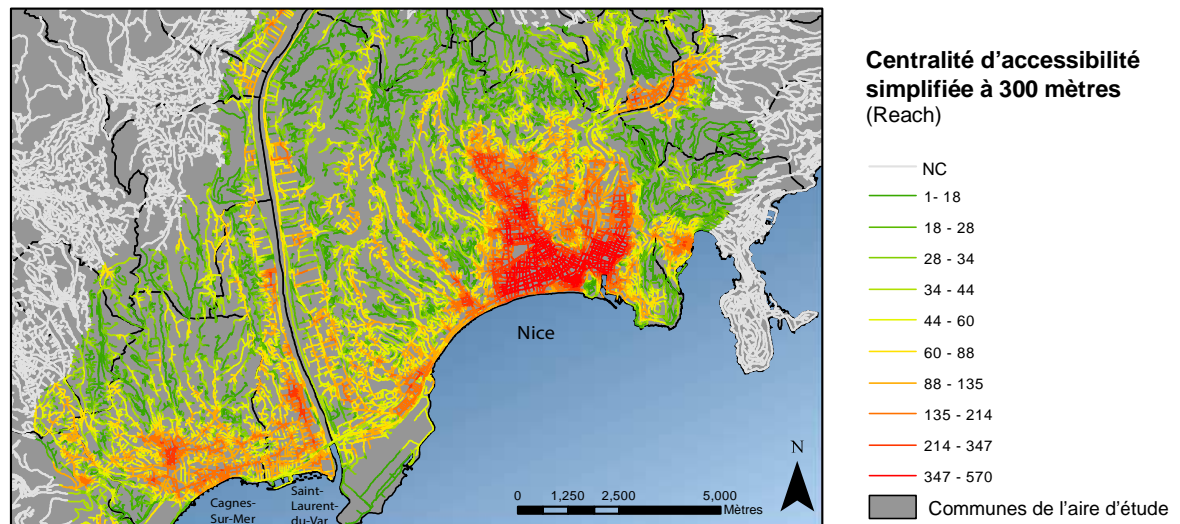
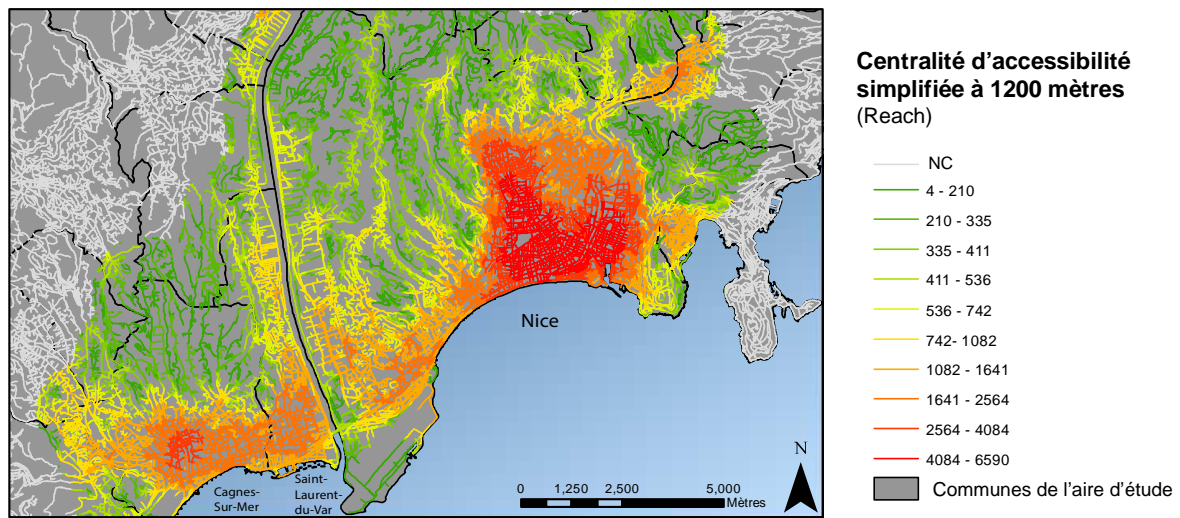
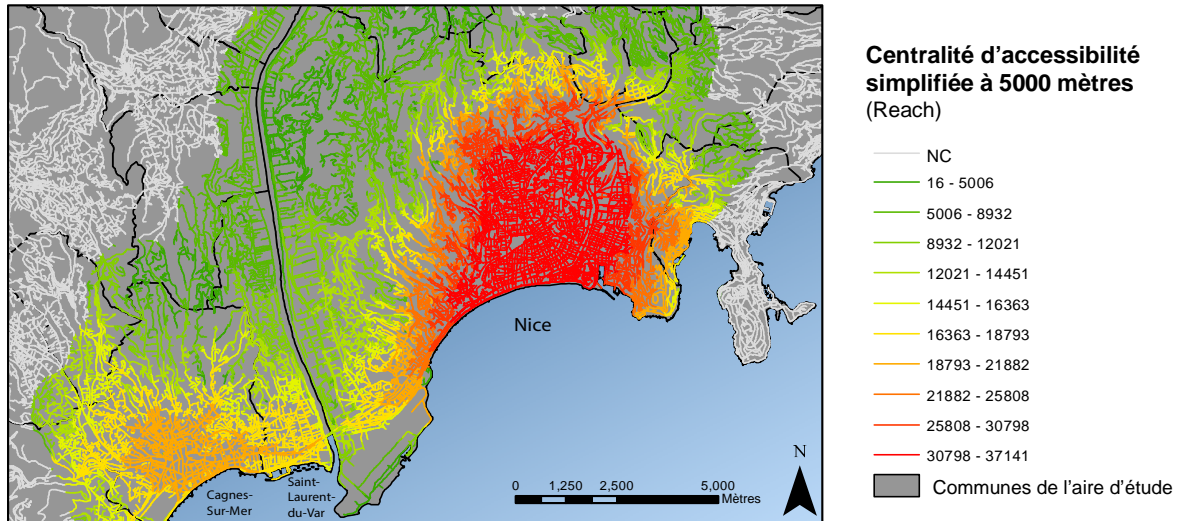
Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 33 *Comparaison de la centralité d'accessibilité simplifiée piétonne à 300 mètres calculée à partir des points bâtis (haut) et des points réseau (bas)*

Les échelles spatio-temporelles

Une fois montrées les conséquences du choix de l'approche réticulaire, nous allons observer celles dérivant différents types de mouvement libre analysé (piéton ou automobile) en tenant compte des relatives échelles spatiales et temporelles.

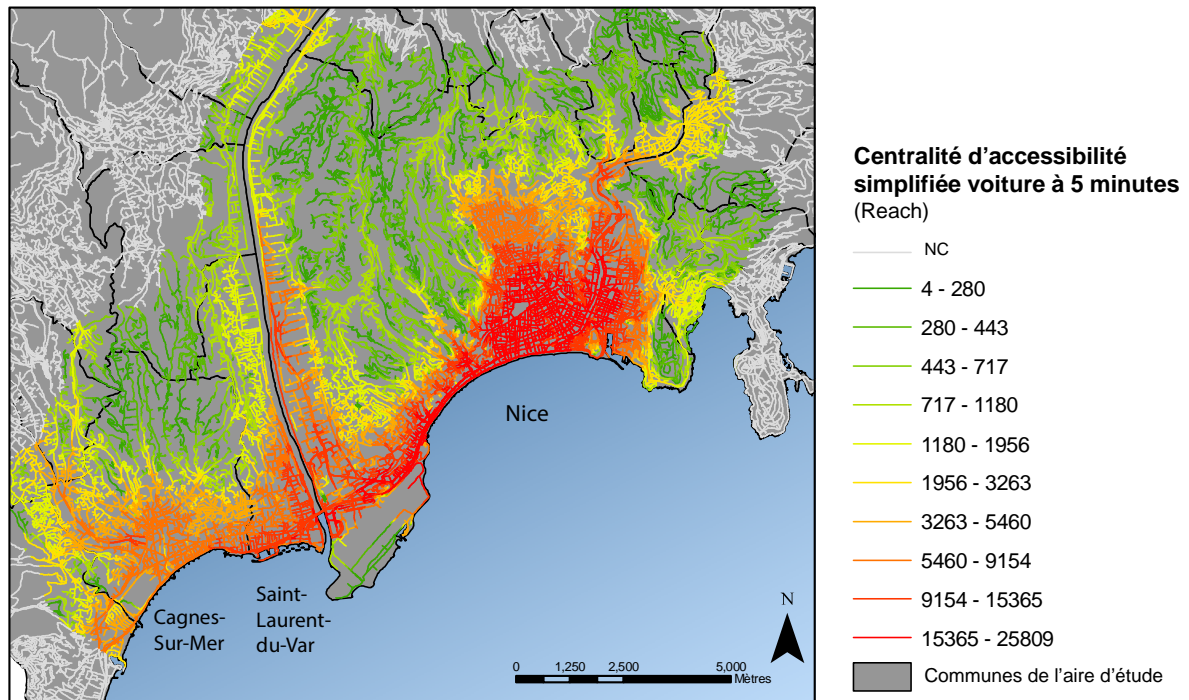
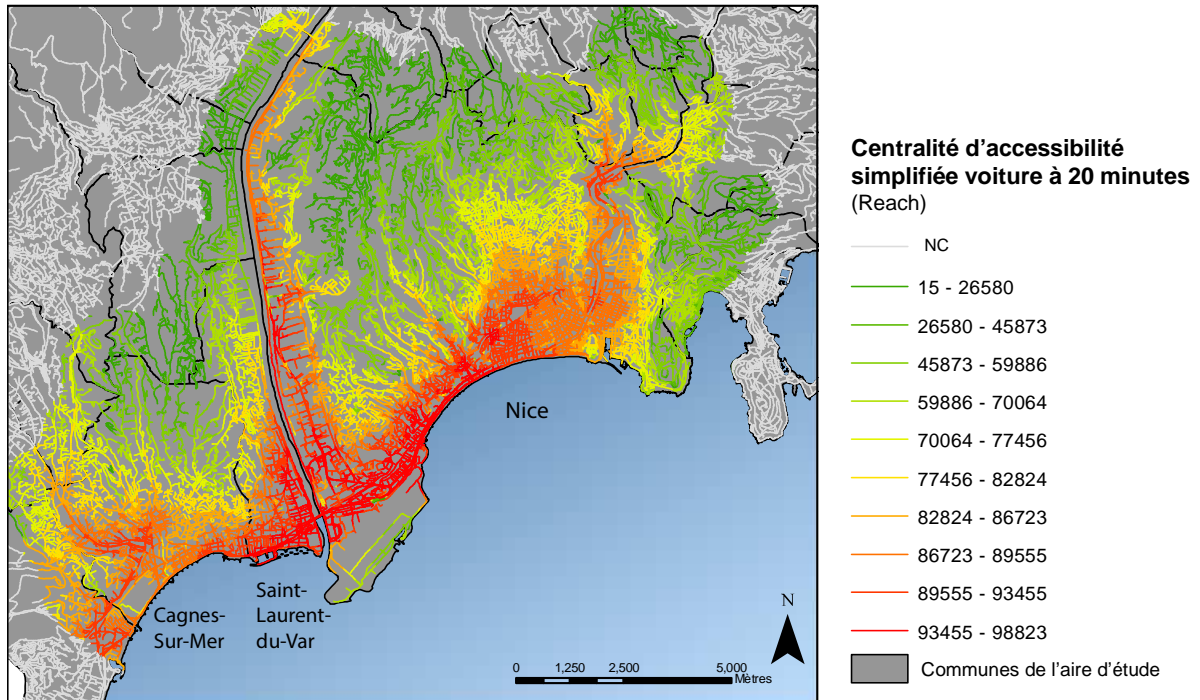
Les cartes dans la Figure 34 montrent les valeurs de la centralité d'accessibilité simplifiées selon la logique du mouvement piéton, à différentes échelles : la micro-échelle de 300 mètres, l'échelle intermédiaire de 1200 mètres et la macro-échelle de 5000 mètres (cf. section 1.4). C'est par la prise en compte d'échelles d'interaction croissantes entre les éléments bâtis que les structures plus ou moins axiales et polycentriques identifiées à 300 m tendent à disparaître en se fondant et en s'élargissant pour assumer une structure plus aréale qu'axiale. C'est à 1200 mètres ainsi qu'un grand espace de centralité émerge au centre de Nice avec un second espace de centralité entre Cagnes-sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var. Cette image correspond davantage à celle calculée à 300 mètres dans l'espace euclidien (Figure 32, haut), avec un filtrage plus prononcé des centralités secondaires périphérique. Mais pour obtenir cette image, nous devons justement considérer un mouvement libre de plus longue portée. A 5000 mètres, c'est un seul grand espace central à Nice qui émerge, avec un bien plus petite centralité secondaire à Cagnes-sur-mer. L'effet de filtre passe bas de la plus grande échelle d'interaction est évident, il se pose néanmoins la question du réalisme d'une interaction piétonne pouvant arriver jusqu'à 5000 mètres. En effet, entre 1000 et 2000 mètres, la mobilité piétonne commence à perdre son avantage sur la mobilité automobile (Genre-Grandpierre 2007). Or, que ce soit à l'échelle intermédiaire des 5 minutes, ou à celles plus vaste des 20 minutes, la logique du mouvement automobile dessine un territoire complètement différent dans l'aire d'étude (Figure 35). Les deux pôles de centralité identifiables dans les logiques piétonnes à 1200 et à 5000 mètres, sont soudés par l'espace qui les dévidait à l'embouchure du Var, en correspondance de l'aéroport et du quartier des affaires. De surcroit, ils se prolongent vers le nord par l'axe du Var. On a ainsi un vaste espace de centralité d'accessibilité à forme de « T » renversé qui suit le parcours des grandes infrastructures routières et autoroutières identifiées dans la Figure 30, surtout où les axes de mouvement rapide sont dédoublés ou multipliés par trois (Promenade des Anglais, Avenue de la Californie et Voie Rapide sur le littoral de Nice-ouest, Bd du Bord de Mer, Avenue de Nice et autoroute A8 sur le littoral de Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer, Bd du Mercantour et autoroute A8 dans la vallée du Var). Cette structure se répète, même si de manière plus réduite, lorsque les vallons longitudinaux rencontrent le bord de mer (comme c'est le cas pour la Madeleine à Nice). Les seuls pôles de grande accessibilité qui échappent à cette structure à T renversé sont les zones à proximité des grands échangeurs routiers, d'autant plus que l'on se place à une échelle d'interaction de 20 minutes : c'est le cas aux abords de la gare ferroviaire de Nice, aux deux entrées de la voie rapide, ou à Nice-est, à l'intersection entre l'autoroute A8 et la pénétrante du Paillon. On peut également observer la pénalisation relative des aires exclusivement piétonnes au centre de Nice comme l'Avenue Jean Médecin, une partie de la vieille ville et la colline du château, d'autant plus que l'on se place à une échelle d'interaction de 5 minutes (le temps perdu dans les tronçons exclusivement piétons fait sortir un bon nombre de points bâtis relativement proches de l'isochrone des 5 minutes).



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 34 Comparaison de la centralité d'accessibilité simplifiée piétonne à différentes échelles.



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

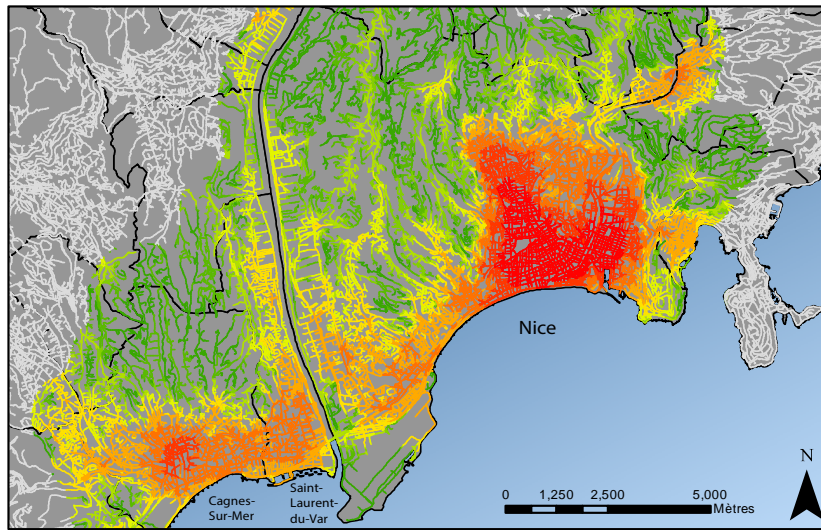
Figure 35 Comparaison de la centralité d'accessibilité simplifiée automobile à différentes échelles

Les différentes métriques de centralité liées à l'accessibilité

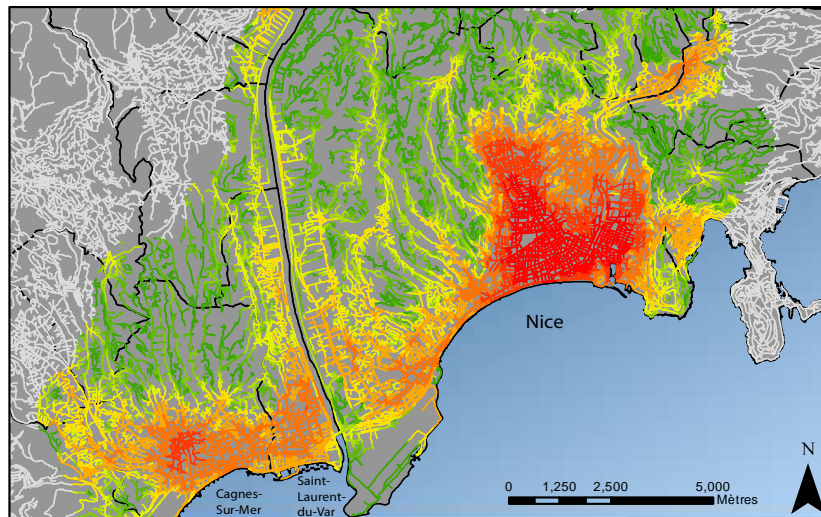
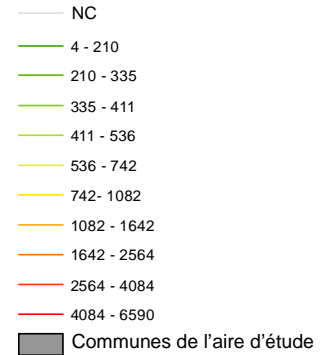
Nous avons pour l'instant porté notre attention sur la centralité d'accessibilité simplifiée (*Reach*). Nous avons néanmoins déjà remarqué dans la section 1.3 que d'autres métriques existent pour appréhender la centralité liée à l'accessibilité d'un point à tous les autres, au sein d'un rayon donné : la centralité de proximité (*Closeness*) et la centralité d'accessibilité rectilinéaire (*Straightness*). Pour mieux évaluer les différences entre ces trois métriques, la Figure 36 compare les valeurs obtenues pour la logique du mouvement piéton dans un rayon de 1200 m. Les valeurs de la *Straightness* sont toujours inférieures à celles de la *Reach* (elles seraient éventuellement les mêmes pour un point connecté uniquement en ligne droite aux autres points, ce qui est très invraisemblable dans un rayon de 1200 mètres). Au-delà des plus faibles valeurs d'accessibilité rectilinéaire, les deux premières cartes de la Figure 36 ne montrent pas de différence substantielle. On remarquera, éventuellement, que l'espace central de Nice, au réseau finement maillé, est moins pénalisé dans le passage à la métrique de la rectilinéarité que la partie ouest, où un maillage moins fin et moins homogène oblige souvent les chemins minimaux à s'écarter davantage de la ligne droite.

Pour rendre la centralité de proximité comparable avec les deux autres métriques, nous devons considérer l'indicateur normalisé (*Normalized Closeness*) qui prend en compte le nombre de destinations que l'on peut atteindre à moins de 1200 mètres (Figure 36, en bas). Cet indicateur donne alors une vision complètement différente des interactions d'accessibilité réciproque entre les points bâtis de l'aire d'étude dans un rayon de 1200 mètres. L'espace central de Nice, avec sa forme typique à V entre la vallée du Paillon et la vallée centrale, garde des valeurs intermédiaires de *Normalized Closeness* et s'oppose aux quartiers collinaires environnants, qui ont les valeurs les plus faibles de l'aire d'étude. Pour ces derniers, en effet, la plupart des destinations à moins de 1200 mètres se situent aux pieds des collines dans l'espace central à V, mais elles sont, pour la plupart, relativement lointaines (800-1200 mètres) réduisant de façon conséquente la valeur de l'indicateur. Des situations semblent s'observer autour des espaces centraux de Cagnes-sur-Mer, de Saint-Laurent-du-Var, de Nice-ouest et de Villefranche-sur-Mer. Or, les valeurs les plus élevées de centralité de proximité relative s'observent dans des tout petits regroupements de points bâtis dans des endroits particulièrement mal connectés de l'espace collinaire (en fond de vallée ou sur des crêtes) : ici, les destinations que l'on peut atteindre sont peu nombreuses et relativement proches (la carte de l'accessibilité simplifiée à moins de 300 mètres montrait bien l'existence de petits regroupements locaux) tandis que jusqu'à 1200 mètres on ne rejoint pas d'autres importants regroupements de destinations. L'indicateur peut alors identifier des petits sous-espaces dans la périphérie collinaire où une clientèle de proximité pourrait être relativement captive de l'offre commerciale localement présente, si elle n'est pas prête à changer d'échelle de mouvement.

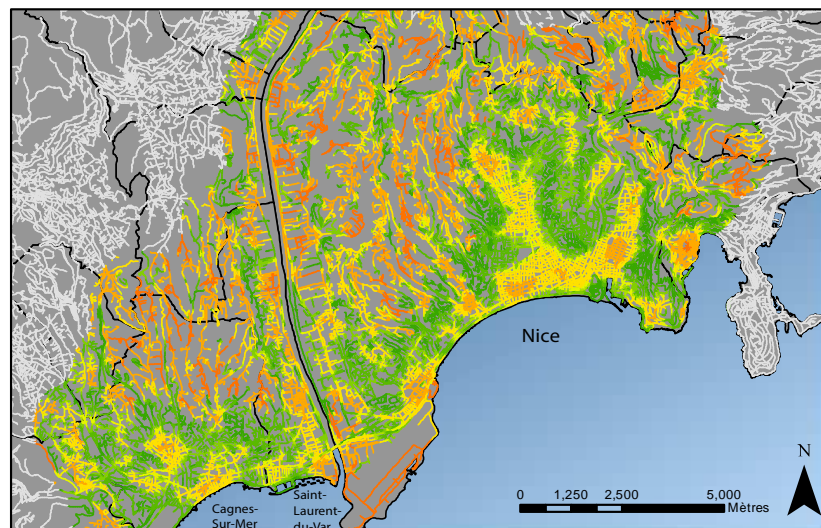
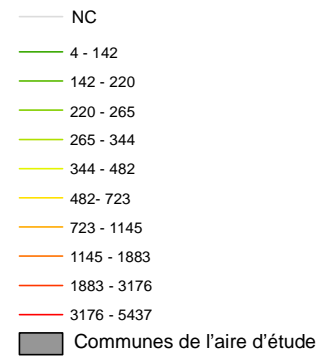
Les trois métriques de la centralité d'accessibilité montrent ainsi des aspects différents des configurations urbaines dans l'aire d'étude et méritent d'être toutes testées dans la phase de fouille de données pour vérifier quels aspects jouent un rôle plus déterminant dans l'organisation de l'offre commerciale.



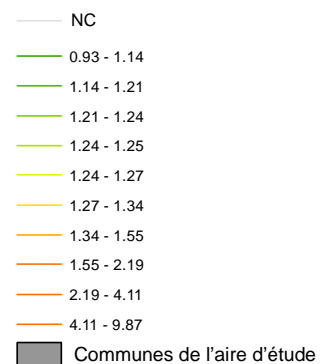
Centralité d'accessibilité simplifiée piétonne à 1200 mètres (Reach)



Centralité d'accessibilité rectilinéaire piétonne à 1200 mètres (Straightness)



Centralité de proximité relative piétonne à 1200 mètres (Normalized Closeness)



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 36 Comparaison des métriques de la centralité d'accessibilité piétonne à 1200 mètres.

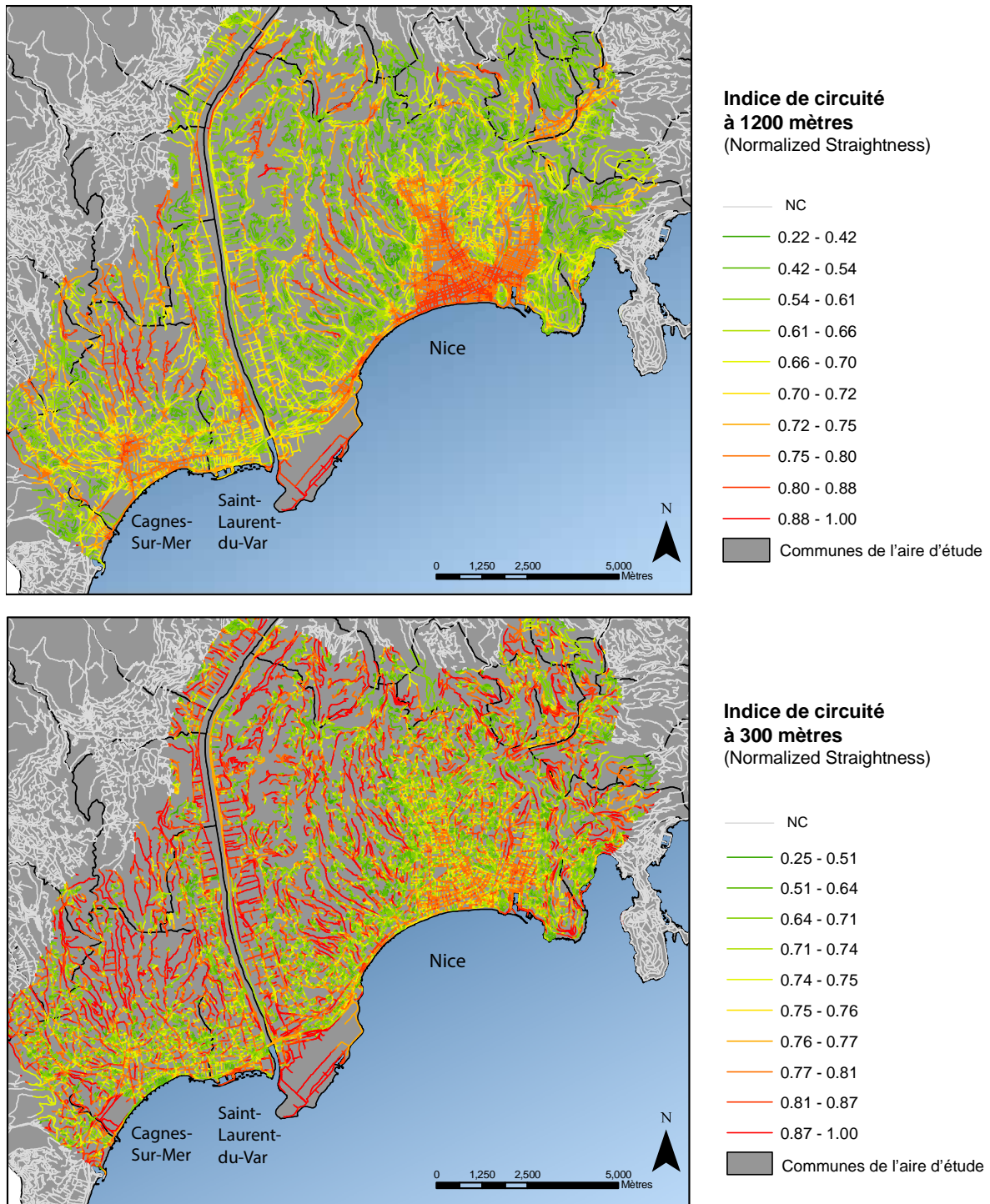
Indicateurs de géométrie et de performance des réseaux : la *Straightness* Normalisée

La normalisation de la *Straightness* par le nombre de destinations accessibles (*Reach*) a une signification différente dans le cas des réseaux viaires et des réseaux routiers (cf. section 1.3). Dans le premier cas, la rectilinéarité normalisée est un indice de circuité des parcours piétons : il indique dans quelle mesure les parcours piétons dans un rayon donné s'écartent en moyenne de la ligne droite et sa valeur est ainsi toujours comprise entre 0 (parcours très tortueux) et 1 (parcours parfaitement droits). Les cartes dans la Figure 37 permettent de comparer cet indice à différentes échelles.

À petite échelle (300 m) sont identifiées de nombreuses petites structures linéaires isolées : sur une rue de fond de vallée, en ligne de crête, ou même en plaine (comme dans la plaine du Var) en l'absence de structures réticulaires plus complexes, les chemins minimaux relient des points bâtis disposés pour l'essentiel le long de cette ligne. Les lacets des côtes collinaires s'éloignent de ces configurations linéaires, tout comme les structures maillées des espaces plus densément urbanisés. À un rayon de 1200 mètres les structures linéaires isolées se font plus rares (il en existe néanmoins quelques dizaines dans l'espace collinaire ici étudié). En revanche, l'espace finement maillé du centre de Nice montre des valeurs de rectilinéarité relativement élevées (toujours supérieures à 0.72 et donc correspondant à une faible circuité) : tout en n'étant pas parfaitement droits, les chemins minimaux dans un damier fin et régulier ne s'en éloignent pas trop pour des distances inférieures à 1200 mètres. Des grandes structures axiales émergent également dans l'espace urbain : la Promenade des Anglais et l'avenue de la Californie à Nice-ouest, le Bd du Marechal Juin (axe longitudinal entre la vieille ville et le bord de mer) et l'Avenue de Nice, à Cagnes. Cette caractéristique ne doit pas être confondue avec l'indicateur d'intermédiarité (Figure 39). Les deux indices tendent à coïncider seulement dans les espaces aux maillages plus lâches ou aux structures plus arborescents, qui suivent une logique plus typiquement automobile dans l'organisation des réseaux. Dans les espaces de la ville traditionnelle, plus finement maillée, les valeurs de haute rectilinéarité sont beaucoup plus généralisées, ce qui n'empêche pas à certains axes de ressortir pour les plus fortes valeurs d'intermédiarité.

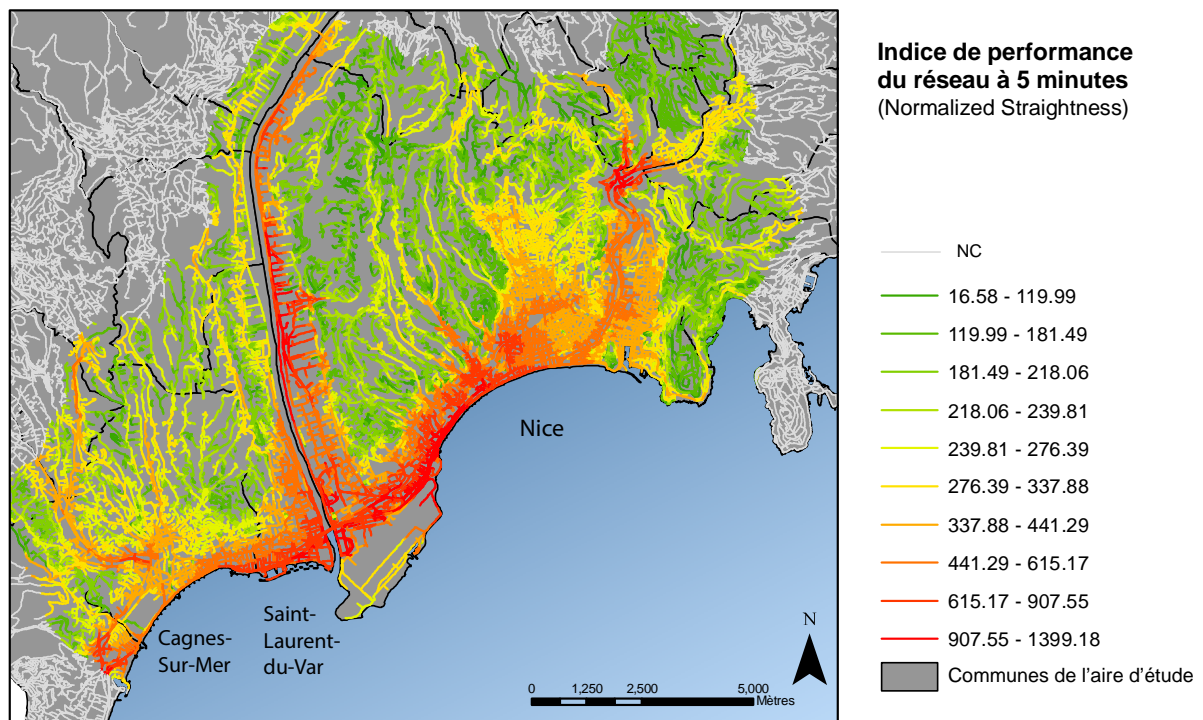
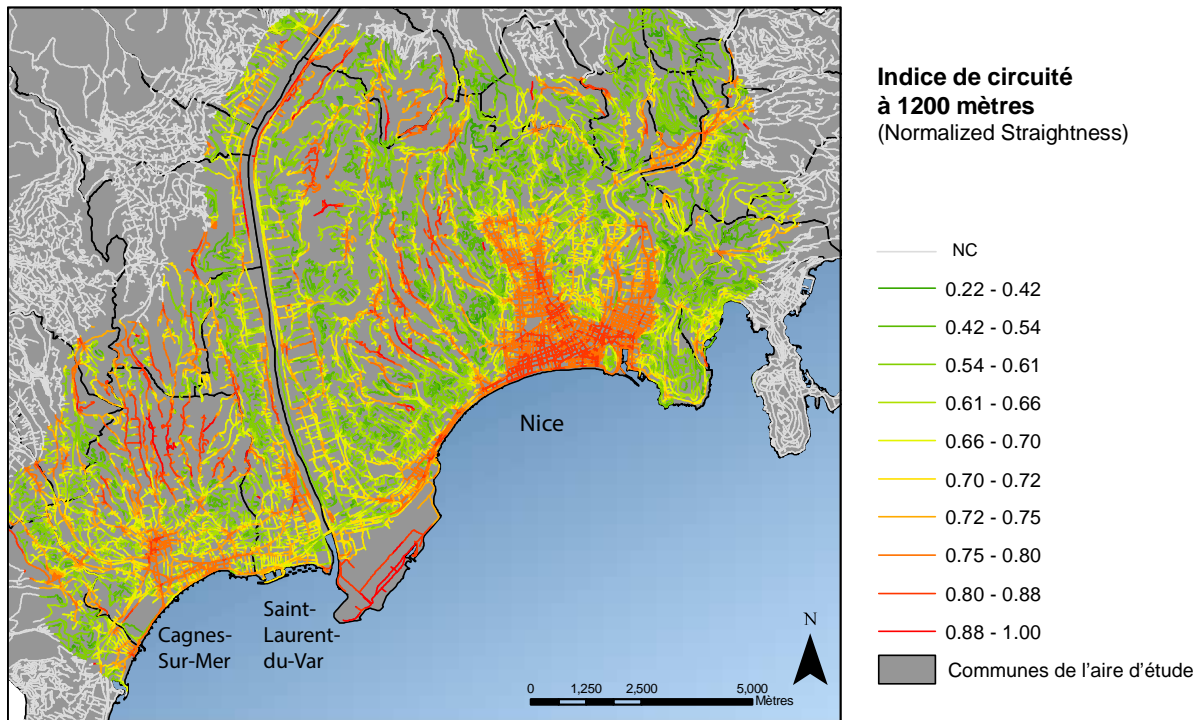
Comme déjà indiqué dans la section 1.3, pour les réseaux routiers, la rectilinéarité normalisée devient un indice de performance du réseau, correspondant au ratio moyen entre les distances à vol d'oiseau entre points bâtis et les temps de parcours sur le réseau. Il s'agit donc d'une vitesse moyenne (vitesse théorique, car calculée par rapport aux lignes droites reliant les points) de l'environnement réticulaire à l'intérieur d'un certain rayon (5 minutes et 20 minutes dans nos applications). La carte en bas dans la Figure 38 montre encore une fois des structures axiales, mais d'une certaine épaisseur, et à forme de T renversé. À la différence de la *Reach* calculée pour le même rayon de distance-temps (5 minutes), le centre de Nice ne fait pas partie de cette structure spatiale, mais se trouve à sa périphérie, avec des valeurs néanmoins supérieures à ceux que l'on peut mesurer dans l'espace collinaire. La zone se situant à l'intersection entre la pénétrante du Paillon et l'autoroute A8, autour de l'échangeur Nice Est, montre en revanche des valeurs beaucoup plus élevées. La comparaison des valeurs de cet indicateur avec les vitesses du réseau routier (Figure 30) montre l'effet des grandes artères routières dans l'augmentation des performances moyennes. Cependant, la présence de ces

grandes infrastructures n'explique pas tous : si elles n'interconnectent pas finement la voirie urbaine par de nombreux échangeurs, la performance moyenne des parcours automobiles reste relativement médiocre, comme dans la traversée des collines niçoise par l'autoroute A8. De même, la présence de vastes espaces verts, de secteurs piétons ou de zones à forte activité avec de rues très tortueuses, diminue à la fois la vitesse des rues et augmente la circuité des chemins minimaux automobiles : la performance du réseau routier s'en trouve d'autant amoindrie. Finalement l'espace urbain à la plus grande performance du réseau routier n'est ni celui à la structure urbaine plus traditionnelle et aux plus fortes valeurs d'accessibilité de proximité piétonne (le centre-ville de Nice et celui de Cagnes), ni celui des espaces collinaires mal desservis par le réseau routier, mais celui développé au cours des dernières décennies autour des infrastructures routières rapides : la plaine du Var et l'espace littoral de Saint-Laurent-du-Var et de Nice-ouest à son embouchure.



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015 Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 37 *Comparaison de l'indice de circuité des parcours piétons à différentes échelles.*



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 38 *La Straightness normalisée : comparaison des logiques piétonnes et automobiles*

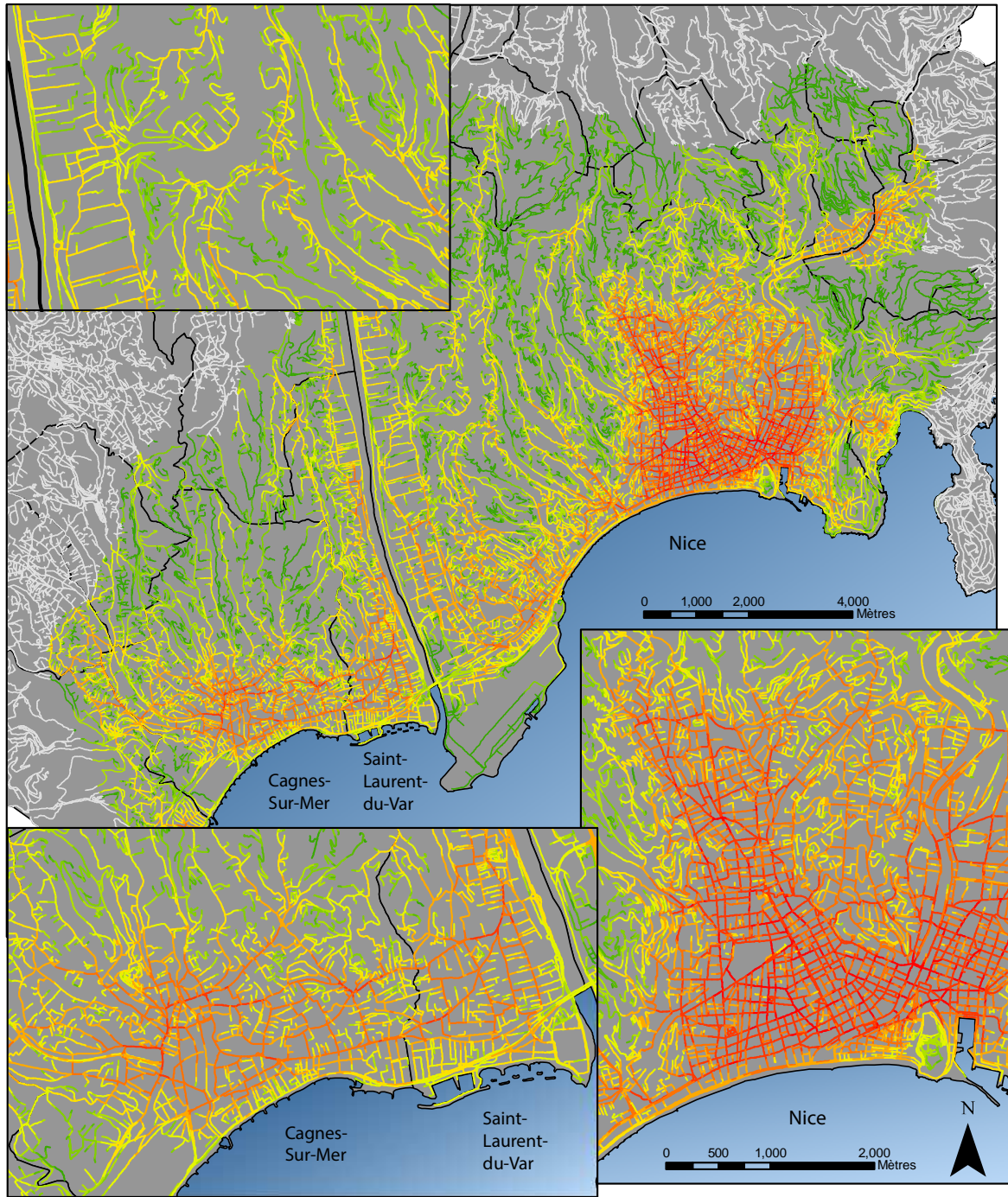
La centralité d'intermédiarité : la *Beetweeness*

La *Beetweeness* est le seul indicateur de centralité d'intermédiarité. Cet indicateur permet de détecter l'émergence, à une échelle donnée du mouvement piéton ou automobile, de niveaux hiérarchiques d'axes dans les structures arborescentes, ou bien d'un maillage plus homogène et pervasif dans les structures à damier. Des sous-espaces bien déterminés correspondent à ces deux logiques dans notre aire d'étude.

La Figure 39 illustre les valeurs prises par l'indicateur d'intermédiarité pour le mouvement piéton à une échelle de 1200 mètres. Des zooms permettent de mieux saisir les différences morphologiques liées aux diverses distributions des valeurs de l'indicateur. Dans l'espace central niçois, les plus fortes valeurs d'intermédiarité permettent d'entrevoir la structure maillée qui délimite plusieurs îlots du damier urbain. On peut ainsi identifier une hiérarchie en deux niveaux au sein du tissu viaire niçois bien identifié dans la littérature urbanistique (Graff 2000), mais qui était occulté par les indicateurs de centralité liés à l'accessibilité. Dans l'ouest niçois, à Saint-Laurent-du-Var et à Cagnes-sur-mer, cette hiérarchie est beaucoup plus articulée. Aux quelques grands axes qui définissent de très grandes mailles, relativement irrégulières, de plusieurs centaines de mètres de côté se superposent tantôt de plus petites mailles, tantôt des petites structures arborescentes, avec de forts gradients d'intermédiarité, dès qu'on quitte les axes des grandes mailles. Ces axes ont une certaine ressemblance, mais ne coïncident pas toujours avec ceux déjà identifiés par la *Straightness* normalisée à la même échelle d'analyse (Figure 37, en haut).

L'unicité des parcours au sein du système collinaire fait ressortir encore une fois les axes des fonds de vallée ou des lignes de crête. Cette fois ci, cependant, un gradient de centralité d'intermédiarité caractérise les axes principaux ainsi que les structures arborescentes que s'y connectent : les valeurs d'intermédiarité varient avec la position hiérarchique du tronçon viaire dans la structure arborescente, même si les chemins analysés sont limités à la longueur maximale de 1200 mètres.

La Figure 40 compare les valeurs absolues et relatives des centralités d'intermédiarité à 1200 mètres. Les très fortes valeurs d'intermédiarité relative caractérisent les structures arborescentes et à faible connectivité : un nombre très limité d'axes concentre une partie très importante des chemins minimaux. À la différence de la *Straightness* normalisée, des chemins collinaires peuvent émerger même s'ils sont relativement tortueux, à condition d'être des passages obligés pour la plupart des parcours dans un rayon donné. D'un point de vue de l'étude des localisations commerciales, il s'agit encore une fois de situations potentiellement favorables à l'installation d'un faible nombre de commerces faiblement spécialisés, susceptibles de drainer une clientèle contrainte. Les structures maillées se différencient fortement de ces configurations, car dans le damier urbain niçois, tout comme dans les structures maillées irrégulières des villes anciennes, aucun axe ne monopolise les parcours minimaux d'un secteur, mais plusieurs axes partagent des valeurs très élevées d'intermédiarité absolue. On retrouve les structures redondantes dont parle Salingaros (2005), dont on souhaite vérifier l'intérêt aux fins de la localisation des activités commerciales.

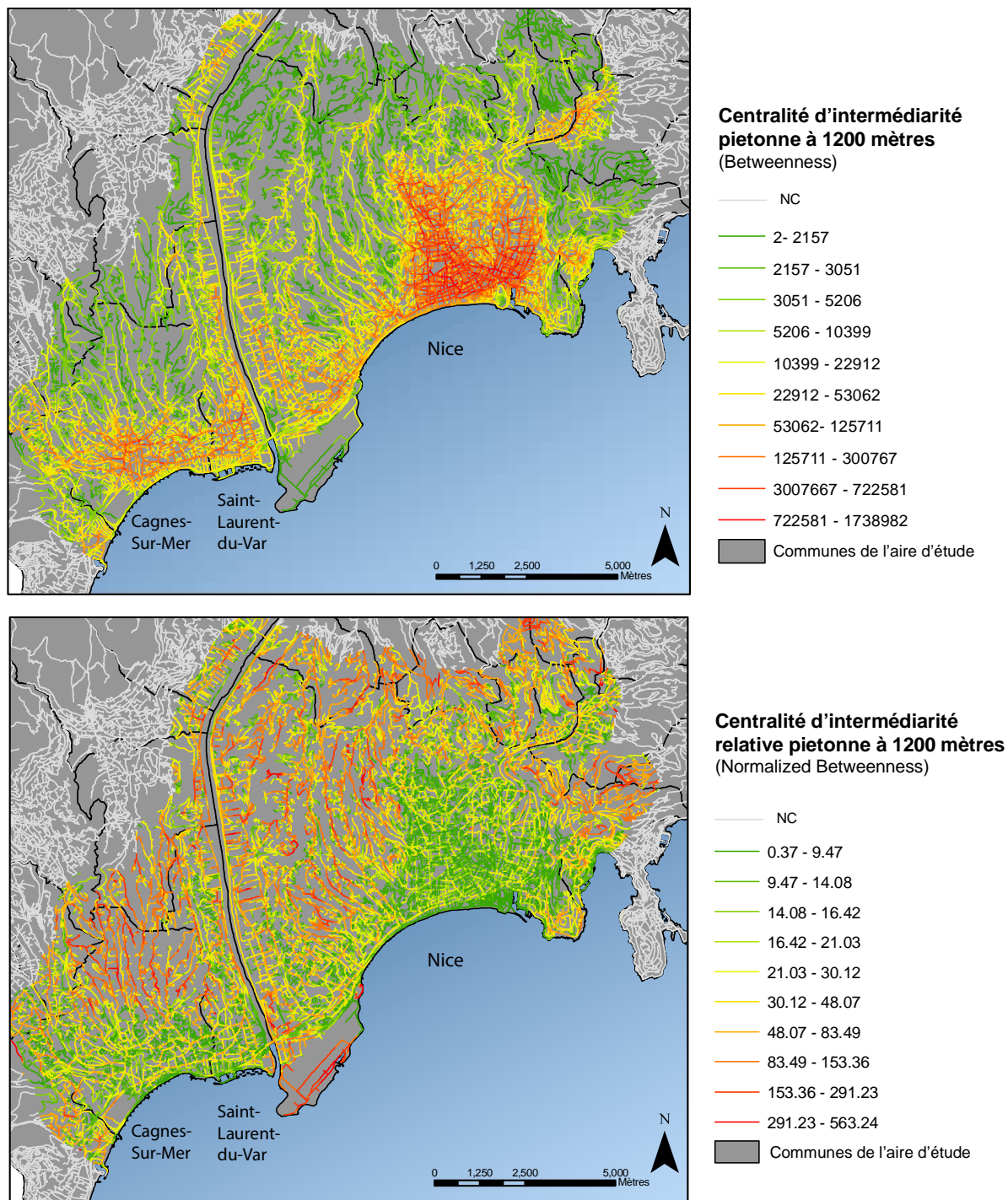


Centralité d'intermédiarité à 1200 mètres (Betweenness)

- | | | |
|--------------|-----------------|------------------------------|
| — 0-2157 | — 10400-22912 | — 300767-722581 |
| — 2157-3051 | — 22912-53062 | — 722581-1738982 |
| — 3051-5206 | — 53062-125711 | — NC |
| — 5206-10400 | — 125711-300767 | ■ Communes de l'aire d'étude |

© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015
 Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 39 La centralité d'intermédiarité piétonne à 1200 mètres.



© A. Araldi, G. Fusco, UMR ESPACE, 2015

Origine des données (Réseau): BD TOPO IGN

Figure 40 Comparaison entre les valeurs absolues et relatives de la centralité d'intermédiarité piétonne à 1200 mètres.

Les locomotives commerciales

Les grandes surfaces commerciales ont été prises en considération pour leur capacité à perturber les flux du mouvement naturel. En focalisant les mobilités commerciales des chalands elles créent des distorsions dans le mouvement libre structuré par les configurations des réseaux viaires et routiers. Par-là, elles sont susceptibles de catalyser l'agglomération de petites et moyennes surfaces commerciales à leur proximité. La configuration des réseaux continue cependant à jouer un rôle. Quels aspects sont les plus cruciaux pour la localisation des petites et moyennes surfaces ? La distance aux grandes surfaces ? La capacité à capter les flux qu'elles génèrent ?

Les cartes dans la Figure 41 localisent ainsi les 37 grandes surfaces commerciales de l'aire d'étude et illustrent les valeurs de trois indicateurs susceptibles de traduire l'impact des locomotives commerciales. En haut est ainsi montré l'intermédiarité (*Betweenness*) des segments viaires par rapport aux chemins minimaux qui lient chaque point bâti à la grande surface commerciale la plus proche. Dans la partie périphérique de l'aire d'étude, on peut observer la mise en évidence de parcours préférentiels, drainant les espaces résidentiels vers les grandes surfaces commerciales. Ces structures sont moins évidentes dans la partie littorale (qui à l'exception de Cap 3000 à l'embouchure du Var et d'une grande surface de bricolage à l'issue du vallon de la Madeleine) est dépourvue de grandes surfaces commerciales, et au centre de Nice, où la multiplicité des grandes surfaces se traduit aussi dans une démultiplication des rues à fortes intermédiarité.

En normalisant ces valeurs d'intermédiarité par le nombre de points bâti dans l'aire d'attraction potentielle de chaque locomotive, nous obtenons la carte au milieu de la Figure 41. Cette carte est beaucoup plus sélective dans la mise en évidence d'axes à forte intermédiarité. De surcroît, la forte proximité des grandes surfaces dans le centre-ville niçois, qui réduisait les valeurs d'intermédiarité dans la carte précédente, est éliminée par la normalisation. À l'opposé, les grandes aires de chalandises potentielles des grandes surfaces périphériques se laissent drainer difficilement par un seul et unique axe. Il est vrai que l'intermédiarité relative aux grandes surfaces périphériques aurait été mieux analysée par le biais des chemins minimaux du réseau routier.

La dernière carte dans la Figure 41 illustre le plus simple des indicateurs de proximité: la distance réseau des segments viaires aux grandes surfaces commerciales. Globalement, l'espace collinaire est le plus éloigné des grandes surfaces commerciales (sauf les coteaux de la moyenne vallée du Var). Le centre niçois, la moyenne vallée du Var ainsi que les parties centrales de Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer sont en général beaucoup plus proches de grandes surfaces commerciales. Il est alors paradoxal que l'espace péri-littoral de l'embouchure du Var, derrière l'aéroport de Nice, déjà identifié comme espace à très forte centralité selon les logiques de l'accessibilité automobile (à 5 et à 20 minutes) et à très grande performance du réseau routier, soit en réalité relativement éloigné des grandes surfaces commerciales de l'aire d'étude.

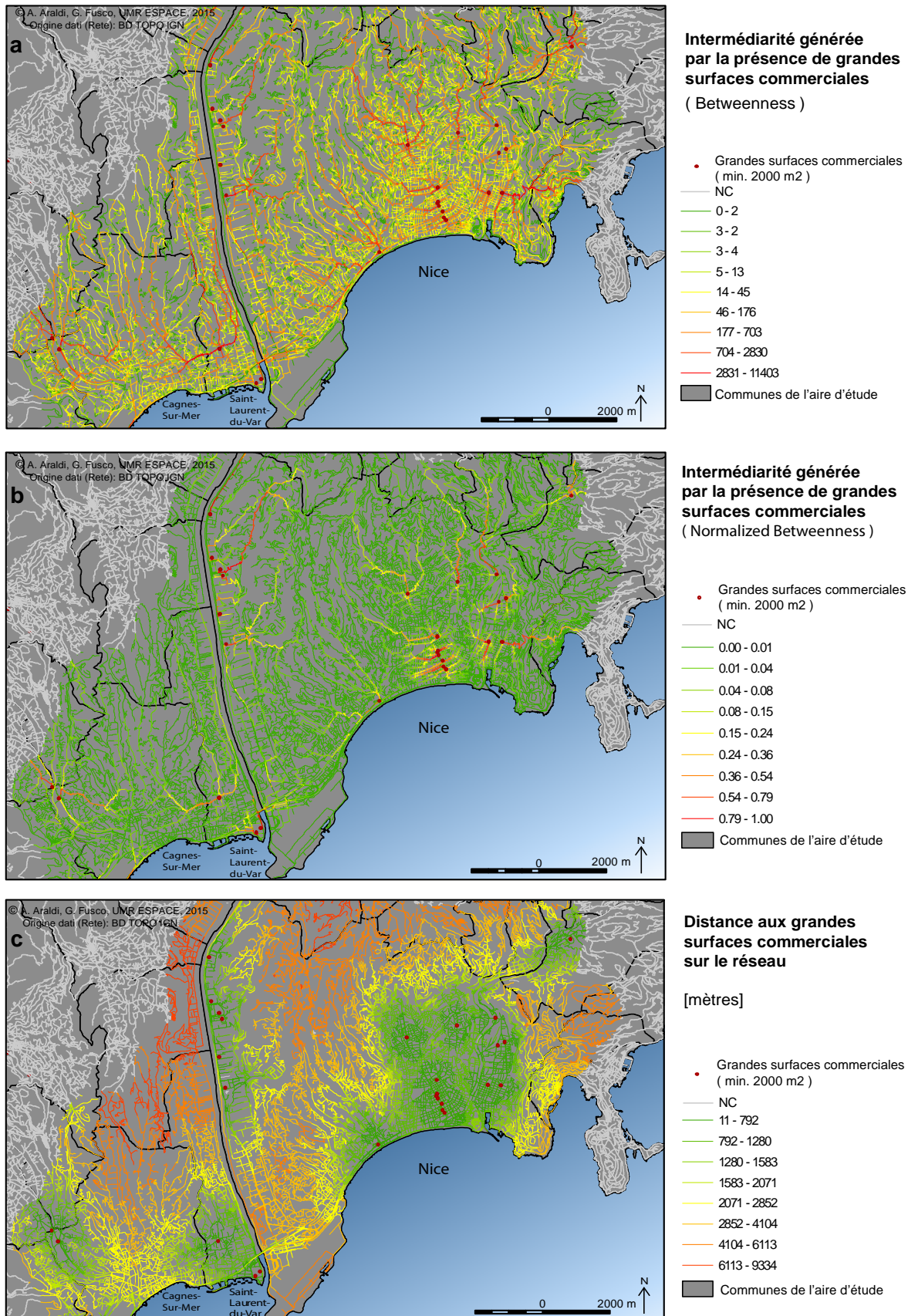


Figure 41 Comparaison entre intermédiarité [a], intermédiarité relative [b] et distance [c], par rapport aux grandes surfaces commerciales.

Les indicateurs de MCA : conclusions

En conclusion une vision d'ensemble aux indicateurs calculés nous permet de parvenir aux enseignements suivants en ce qui concerne l'application de la MCA à l'aire d'étude :

- L'approche analytique à la forme urbaine, associant les trames bâties, viaire et routière dans une approche rigoureusement configurationnelle est pleinement justifié. En s'éloignant de cette approche, des simplifications plus ou moins importantes dans l'appréhension du système morphologique peuvent fausser considérablement les résultats des analyses.
- C'est seulement par l'ensemble des indicateurs, des métriques et des échelles que l'on est capable d'identifier la richesse des structures spatiales dans l'aire d'étude : vastes structures aréales aux gradients plus ou moins évidents, hiérarchies des pôles de centralité, structures axiales menues ou relativement étendues, structures à maille ou arborescentes, etc. L'existence de ces structures est souvent confirmée par la pratique du terrain et par la littérature urbanistique.
- Les indicateurs d'intermédiarité et ceux de rectilinéarité relative (dans leur logique piétonne) sont capables d'identifier les structures axiales mieux que les indicateurs basées sur l'accessibilité.
- Ces derniers sont en revanche capables de mieux cerner les structures aréales ou les structures axiales de plus grande épaisseur, où la centralité percole dans le tissu adjacent aux axes.
- On peut confirmer le seuil de 1000-2000 mètres dans la capacité des logiques piétonnes à structurer les centralités urbaines. Les centralités piétonnes restent souvent liées aux espaces plus anciennement bâtis et mieux maillés.
- Les centralités automobiles et la performance du réseau routier favorisent en revanche l'espace de la plaine du Var et l'espace littoral à son embouchure.
- De manière générale, les tissus à plus forte connectivité, relativement bien maillé, montrent une grande richesse de propriété configurationnelles. Les structures arborescentes ou quasi-linéaires perdent cette richesse et montrent pour plusieurs indicateurs une gamme très limitée de valeurs possibles.
- La présence de grandes surfaces commerciales permet d'identifier des structures axiales et aréales autour d'elles, susceptibles d'avoir un impact sur la localisation des petits et moyens commerces. Ces structures sont à leurs tours dépendantes de la configuration des réseaux urbains.

Reste à évaluer dans quelle mesure ces différentes caractéristiques peuvent influencer la localisation des activités commerciales dans l'aire d'étude.

3.3.2. Les localisations commerciales dans l'agglomération niçoise

La localisation des activités commerciales, et sa mise en relation avec les propriétés configurationnelles des réseaux seront étudiées seulement pour notre aire d'étude restreinte. Ce périmètre correspond au cœur de l'agglomération niçoise (communes de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer ainsi qu'à un buffer d'un kilomètre autour d'elles) ; à son sein, les indicateurs configurationnels ne montrent pas d'importants effets de bord, car leur calcul a intégré l'ensemble des réseaux des 24 communes de l'aire d'étude élargie.

Au-delà des 37 grandes surfaces commerciales, ce périmètre contient 19 604 petits et moyens commerces, qui correspondent à 34 327 équivalents petits commerces, selon la méthodologie présentée dans la section 1.8.

En général, la présence de potentiel commercial est plus l'exception que la règle dans l'aire d'étude. En se référant aux classes de densité de kernel des activités commerciales (sections 1.8 et 1.10) la figure 42 fournit une vision d'ensemble, non spatialisée, de la répartition des tronçons viaires.

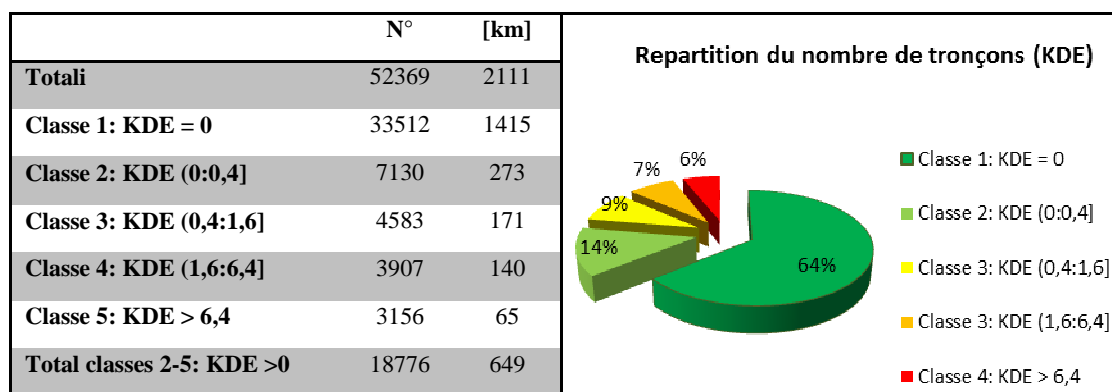
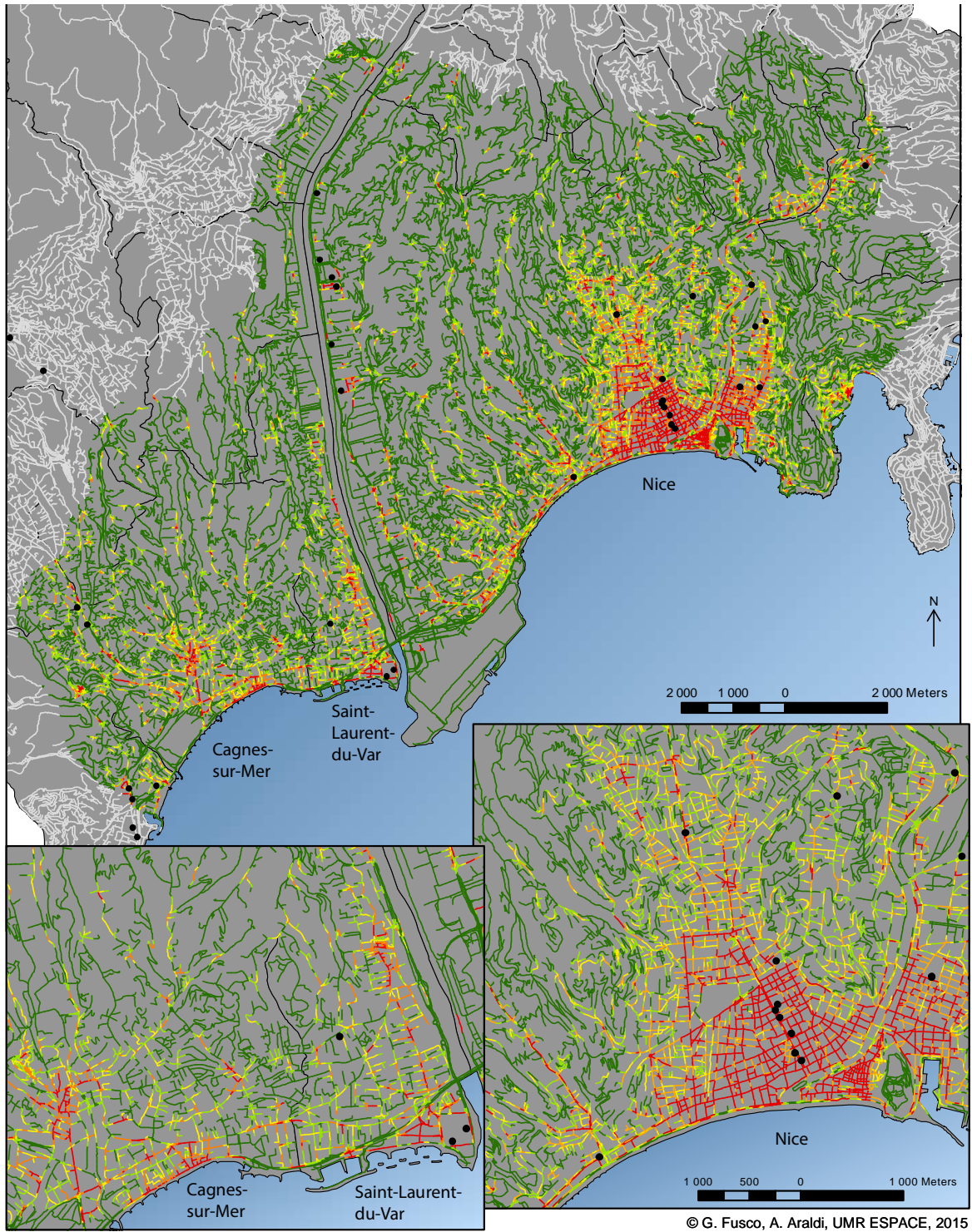


Figure 42 Répartition des tronçons viaires par classe de densité commerciale dans l'aire d'étude restreinte.

En dépit d'une discrétisation dont les intervalles des classes vont croissant de façon géométrique avec un facteur 4, presque les deux tiers des 52 369 tronçons de l'aire d'étude restreinte ont une densité commerciale nulle. Cette spécificité rend plus difficile les applications de fouille de données visant à identifier des règles de localisation commerciale. Pour tout algorithme de *machine learning*, le risque est en effet que l'apprentissage soit guidé essentiellement par la compréhension des règles qui expliquent l'absence de commerces (règles permettant d'expliquer presque les deux tiers de la base d'exemples).

La distribution spatiale des classes de densité de petits et moyens commerces dans l'aire d'étude restreinte est montrée dans la Figure 43. On remarque une importante présence des classes de plus forte densité dans les espaces centraux et littoraux de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer. D'autres petits espaces de concentration commerciale émergent dans les zones périphériques. En revanche, les classes à densité commerciale nulle sont majoritairement localisées dans les espaces collinaires périphériques. La carte dans la Figure 43 constitue la cible de nos modélisations : nous voulons trouver des combinaisons cohérentes de valeurs des indicateurs configurationnels, susceptibles d'expliquer cette carte des densités commerciales, selon la démarche générale annoncée dans la section 1.1.



Classe de densité commerciale des tronçons depuis les données empiriques
(DK = densité de Kernel)

- 1 (DK = 0)
 - 2 (0 < DK ≤ 0,4)
 - 3 (0,4 < DK ≤ 1,6)
- 4 (1,6 < DK ≤ 6,4)
 - 5 (DK > 6,4)
 - N.C.

• Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)

■ Communes de l'aire d'étude

Sources : CCINCA 2013, BD TOPO IGN

Figure 43 Les densités commerciales (KDE) dans l'aire d'étude restreinte.

3.3.3. La recherche de règles liant les configurations aux commerces

L'identification de règles de localisation des commerces dans l'aire d'étude est, dans notre approche, liée directement aux avantages et inconvénients respectifs des éléments des réseaux urbains pour les activités commerciales. Indirectement, l'hétérogénéité du territoire en matière de contraintes topographiques et hydrographiques, en influençant les formes des réseaux, se répercute sur la localisation des commerces.

La technique des réseaux bayésiens (section 1.10) a donc été choisie pour permettre d'identifier les relations probabilistes les plus significatives, susceptibles d'expliquer la classe de densité commerciale (variable cible) à partir de combinaisons opportunes des autres variables du *data mining* (indicateurs configurationnels, descripteurs des caractéristiques intrinsèques des tronçons, indicateurs configurationnels liés à la présence des grandes surfaces commerciales). Une base contenant ces variables pour l'ensemble des 52 369 tronçons viaires de l'aire d'étude restreinte a ainsi servi de base d'apprentissage à l'algorithme TabooOrder sur la plateforme BayesiaLab.

Le problème du surapprentissage des configurations explicatives de densités commerciales nulles a été abordé par la stratification de la base d'apprentissage. En donnant un poids différent à l'apprentissage des règles explicatives des différentes classes de densité commerciale, nous pouvons forcer le modèle à mieux cibler l'explication des classes à densité commerciale non nulle. Le résultat final sera un modèle moins performant sur l'ensemble des 52 369 tronçons, mais plus performant sur les 18 776 tronçons où le KDE n'est pas nul. Comme anticipé dans la section 1.10, différentes techniques de discrétisation ont également été testées pour les variables de la base de données (arbre de décision par rapport à la variable cible ou k-means). En combinant les stratégies de stratifications avec les deux techniques de discrétisation, nous avons produit 8 différents modèles bayésiens, dont les indices de performance et les tableaux de confusion sont indiqués dans les tableaux figure 45. Le tableau ci-dessous donne une vision d'ensemble des modèles et des tableaux afférents.

	Absence de stratification	Stratification avec même poids pour chaque classe de densité	Stratification avec poids croissant linéairement avec la classe de densité	Stratification avec poids croissant plus que linéairement avec la classe de densité
Decision Tree	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
K-means	Modèle 5	Modèle 6	Modèle 7	Modèle 8

Figure 44 Synthèse des modèles bayésiens produits et des tableaux afférents.

Chaque modèle est donc résumé par un tableau qui reporte :

Les variables sélectionnées par l'algorithme d'apprentissage bayésien pour expliquer la densité commerciale ;

- *Total Precision*: la précision totale du modèle (% de tronçons pour lesquels on peut prédire correctement la classe de densité en connaissant les valeurs des variables explicatives retenues) ;
- *Broad precision*: une valeur plus grossière de la précision (% de tronçons pour lesquels les prédictions du modèle ne se trompent pas plus d'une classe de densité par rapport à la donnée réelle) ;

- *Occurences*: matrice de confusion où sont reportées les valeurs prédites par le modèle (en ligne) par rapport aux valeurs empiriques (en colonne) en ce qui concerne les classes de densité commerciales ;
- *Reliability*: matrice de crédibilité, où sont reportés les pourcentages d'appartenance réelle aux classes de densité commerciale, pour les tronçons que le modèle prédit dans une classe donnée ;
- *Precision*: matrice de précision où sont reportés les pourcentages des tronçons qui appartiennent à une classe donnée de densité réelle selon la classe de prédiction du modèle.

En comparant les huit modèles, on peut formuler les observations suivantes :

- Les modèles 6, 7 et 8 coïncident : quelle soit la stratification de l'apprentissage, la discrétisation par la méthode k-means des variables potentiellement explicatives, produit le même modèle bayésien. Ces modèles ont en revanche recours à des paramètres intrinsèques des tronçons viaires, ce qui les rend moins intéressants pour notre recherche. Nous avons cependant souligné comment certains descripteurs intrinsèques (vitesse, largeur, importance administrative) sont à leur tour distribués selon des structures spatiales hiérarchisées qui font écho aux différents indicateurs de centralité d'intermédiarité. Il n'est donc pas étonnant que les autres modèles substituent des indicateurs d'intermédiarité à ces descripteurs intrinsèques.
- La centralité d'accessibilité simplifiée piétonne à la micro-échelle des 300 mètres (*Reach 300m*) est présente dans tous les modèles. Elle est liée positivement à la classe de densité commerciale : les plus fortes valeurs de *Reach 300m* s'associent aux classes de forte et très forte densité commerciale ; vice versa, les plus faibles valeurs de *Reach 300m* s'associent aux tronçons de densité commerciale nulle. D'autres modèles, produits par d'autres approches à la discrétisation des densités commerciales ont produit le même résultat, en remplaçant parfois la centralité simplifiée piétonne à 300 mètres avec son équivalent dans la métrique rectilinéaire (*Straightness 300m*) qui, comme nous avons vu occasion de voir dans la Figure 36, montre des valeurs très proches dans notre aire d'étude. L'accessibilité piétonne à petite échelle aux points bâtis par le réseau viaire reste donc un paramètre fondamental pour la localisation des commerces, que ce soit en centre-ville ou dans les espaces périphériques.
- L'indice de performance du réseau routier à 5 minutes (avec ou sans la pénalisation aux branchements) est présent dans six modèles (*Normalized Straightness*). Cet indicateur est en réalité la résultante de plusieurs ingrédients : la vitesse des tronçons (y compris la proximité de tronçons autoroutiers), la tortuosité des parcours et la présence de vastes espaces non urbanisés. Les valeurs les plus élevées se situent à proximité d'échangeurs autoroutiers en milieu fortement urbanisé. Cette classe des valeurs, tout étant propice à la localisation commerciale, n'est pas celle associée aux plus fortes probabilités pour les classes 4 et 5 : celles-ci préfèrent des valeurs légèrement inférieures, associées aux tissus maillés des espaces urbains ouverts à la circulation automobile.
- Les centralités d'intermédiarité sont présentes dans tous les modèles où les variables explicatives ont été discrétisées par arbre de décision. Il s'agit de l'intermédiarité

piétonne à 1200 mètres (un modèle), de celle automobile à 5 minutes (un modèle) et de celle pour l'accès aux locomotives commerciales (deux modèles). Ces intermédiarités sont toujours associés de façon positive aux densités commerciales. On souligne ainsi le rôle des centralités d'intermédiarité à catalyser des opportunités commerciales par la captation de flux. La méso-échelle (piétonne ou automobile) semble privilégiée, tout comme la capacité des grandes surfaces commerciales à modifier le mouvement naturel au sein des configurations viaires.

Target: Densité activités commerciales					
Reach 300m			Betweenness 1200m		
Total Precision: 68.45%			Broad precision: 86.64%		
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (40092)	31471	4410	2357	1266	588
=0.4 (7963)	2043	2321	1580	1339	680
=1.6 (0)	0	0	0	0	0
=6.4 (1496)	55	259	345	497	340
>6.4 (2802)	8	140	301	805	1548
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (40092)	78.50%	11%	5.88%	3.16%	1.47%
<=0.4 (7963)	25.66%	29.15%	19.84%	16.82%	8.54%
<=1.6 (0)	0%	0%	0%	0%	0%
<=6.4 (1496)	3.68%	17.31%	23.06%	33.22%	22.73%
>6.4 (2802)	0.29%	5%	10.74%	28.73%	55.25%
Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (40092)	93.73%	61.85%	51.43%	32.40%	18.63%
<=0.4 (7963)	6.08%	32.55%	34.48%	34.27%	21.55%
<=1.6 (0)	0%	0%	0%	0%	0%
<=6.4 (1496)	0.16%	3.63%	7.53%	12.72%	10.77%
>6.4 (2802)	0.02%	1.96%	6.57%	20.60%	49.05%

Variables et performance du Modèle 1

Target: Densité activités commerciales					
Reach 300m		N.Straightness 5min*		Betweenness 5min.*	
Total Precision: 68.84%		Broad Precision: 86.54%			
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (41675)	32156	4966	2636	1396	521
=0.4 (6385)	1350	1782	1294	1209	750
=1.6 (166)	17	29	63	39	18
=6.4 (2483)	50	307	498	901	727
>6.4 (1644)	4	46	92	362	1140
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (41675)	77.16%	11.92%	6.33%	3.35%	1.25%
<=0.4 (6385)	21.14%	27.91%	20.27%	18.94%	11.75%
<=1.6 (166)	10.24%	17.47%	37.95%	23.49%	10.84%
<=6.4 (2483)	2.01%	12.36%	20.06%	36.29%	29.28%
>6.4 (1644)	0.24%	2.80%	5.60%	22.02%	69.34%
Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (41675)	95.77%	69.65%	57.52%	35.73%	16.51%
<=0.4 (6385)	4.02%	24.99%	28.23%	30.94%	23.76%
<=1.6 (166)	0.05%	0.41%	1.37%	1%	0.57%
<=6.4 (2483)	0.15%	4.31%	10.87%	23.06%	23.04%
>6.4 (1644)	0.01%	0.65%	2.01%	9.27%	36.12%

Variables et performance du Modèle 2.

Target: Densité activités commerciales					
Reach300m		N.Straightness 5min		Betw. Locomotive	
Total Precision: 68.87%		Broad Precision: 86.70%			
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (40814)	31871	4689	2466	1283	505
=0.4 (6349)	1493	1862	1311	1107	576
=1.6 (209)	26	48	61	49	25
=6.4 (2354)	132	366	487	791	578
>6.4 (2627)	55	165	258	677	1472
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (40814)	78.09%	11.49%	6.04%	3.14%	1.24%
<=0.4 (6349)	23.52%	29.33%	20.65%	17.44%	9.07%
<=1.6 (209)	12.44%	22.97%	29.19%	23.44%	11.96%
<=6.4 (2354)	5.61%	15.55%	20.69%	33.60%	24.55%
>6.4 (2627)	2.09%	6.28%	9.82%	25.77%	56.03%

Target: Densité activités commerciales					
Reach300m		Straightness 5min*		Betw. Locomotive	
Total Precision: 69.19%		Broad Precision: 86.68%			
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (40854)	31909	4654	2467	1295	529
=0.4 (7167)	1587	2100	1483	1295	702
=1.6 (199)	4	41	61	48	45
=6.4 (1456)	30	218	346	567	295
>6.4 (2677)	47	117	226	702	1585
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (40854)	78.10%	11.39%	6.04%	3.17%	1.29%
<=0.4 (7167)	22.14%	29.30%	20.69%	18.07%	9.79%
<=1.6 (199)	2.01%	20.60%	30.65%	24.12%	22.61%
<=6.4 (1456)	2.06%	14.97%	23.76%	38.94%	20.26%
>6.4 (2677)	1.76%	4.37%	8.44%	26.22%	59.21%

Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (40814)	94.92%	65.76%	53.81%	32.84%	16%
<=0.4 (6349)	4.45%	26.12%	28.61%	28.33%	18.25%
<=1.6 (209)	0.08%	0.67%	1.33%	1.25%	0.79%
<=6.4 (2354)	0.39%	5.13%	10.63%	20.25%	18.31%
>6.4 (2627)	0.16%	2.31%	5.63%	17.33%	46.64%

Variables et performance du Modèle 3.

Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (40854)	95.03%	65.27%	53.83%	33.15%	16.76%
<=0.4 (7167)	4.73%	29.45%	32.36%	33.15%	22.24%
<=1.6 (199)	0.01%	0.58%	1.33%	1.23%	1.43%
<=6.4 (1456)	0.09%	3.06%	7.55%	14.51%	9.35%
>6.4 (2677)	0.14%	1.64%	4.93%	17.97%	50.22%

Variables et performance du Modèle 4.

Target: Densité activités commerciales					
Reach300m	Straightness 5min*		Vitesse		
Total Precision: 68.97%			Broad Precision: 85.16%		
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (44997)	33113	5942	3282	1858	802
=0.4 (1986)	276	563	459	455	233
=1.6 (35)	6	3	10	9	7
=6.4 (2300)	154	448	511	748	439
>6.4 (3035)	28	174	321	837	1675
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (44997)	73.59%	13.21%	7.29%	4.13%	1.78%
<=0.4 (1986)	13.90%	28.35%	23.11%	22.91%	11.73%
<=1.6 (35)	17.14%	8.57%	28.57%	25.71%	20%
<=6.4 (2300)	6.70%	19.48%	22.22%	32.52%	19.09%
>6.4 (3035)	0.92%	5.73%	10.58%	27.58%	55.19%
Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (44997)	98.62%	83.34%	71.61%	47.56%	25.41%
<=0.4 (1986)	0.82%	7.90%	10.02%	11.65%	7.38%
<=1.6 (35)	0.02%	0.04%	0.22%	0.23%	0.22%
<=6.4 (2300)	0.46%	6.28%	11.15%	19.15%	13.91%
>6.4 (3035)	0.08%	2.44%	7%	21.42%	53.07%

Variables et performance du Modèle 5.

Target: Densité activités commerciales					
Reach300m	N Straightness 5min		Largeur		
Total Precision: 69.24%			Broad Precision: 85.80%		
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (43545)	32780	5501	3021	1604	639
=0.4 (2877)	565	872	596	555	289
=1.6 (81)	1	16	30	23	11
=6.4 (2702)	177	553	596	863	513
>6.4 (3148)	54	188	340	862	1704
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (43545)	75.28%	12.63%	6.94%	3.68%	1.47%
<=0.4 (2877)	19.64%	30.31%	20.72%	19.29%	10.05%
<=1.6 (81)	1.23%	19.75%	37.04%	28.40%	13.58%
<=6.4 (2702)	6.55%	20.47%	22.06%	31.94%	18.99%
>6.4 (3148)	1.72%	5.97%	10.80%	27.38%	54.13%
Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (43545)	97.63%	77.15%	65.92%	41.05%	20.25%
<=0.4 (2877)	1.68%	12.23%	13%	14.21%	9.16%
<=1.6 (81)	0%	0.22%	0.65%	0.59%	0.35%
<=6.4 (2702)	0.53%	7.76%	13%	22.09%	16.25%
>6.4 (3148)	0.16%	2.64%	7.42%	22.06%	53.99%

Variables et performance du Modèle 6.

Target: Densité activités commerciales					
Reach300m	N.Straightness 5min		Largeur		
Total Precision: 69.24%			Broad Precision: 85.80%		
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (43545)	32780	5501	3021	1604	639
=0.4 (2877)	565	872	596	555	289
=1.6 (81)	1	16	30	23	11
=6.4 (2702)	177	553	596	863	513
>6.4 (3148)	54	188	340	862	1704
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (43545)	75.28%	12.63%	6.94%	3.68%	1.47%
<=0.4 (2877)	19.64%	30.31%	20.72%	19.29%	10.05%
<=1.6 (81)	1.23%	19.75%	37.04%	28.40%	13.58%
<=6.4 (2702)	6.55%	20.47%	22.06%	31.94%	18.99%

Target: Densité activités commerciales					
Reach300m	N.Straightness 5min		Largeur		
Total Precision: 69.24%			Broad Precision: 85.80%		
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (43545)	32780	5501	3021	1604	639
=0.4 (2877)	565	872	596	555	289
=1.6 (81)	1	16	30	23	11
=6.4 (2702)	177	553	596	863	513
>6.4 (3148)	54	188	340	862	1704
Reliability					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (43545)	75.28%	12.63%	6.94%	3.68%	1.47%
<=0.4 (2877)	19.64%	30.31%	20.72%	19.29%	10.05%
<=1.6 (81)	1.23%	19.75%	37.04%	28.40%	13.58%
<=6.4 (2702)	6.55%	20.47%	22.06%	31.94%	18.99%

>6.4 (3148)	1.72%	5.97%	10.80%	27.38%	54.13%
Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (43545)	97.63%	77.15%	65.92%	41.05%	20.25%
<=0.4 (2877)	1.68%	12.23%	13%	14.21%	9.16%
<=1.6 (81)	0%	0.22%	0.65%	0.59%	0.35%
<=6.4 (2702)	0.53%	7.76%	13%	22.09%	16.25%
>6.4 (3148)	0.16%	2.64%	7.42%	22.06%	53.99%

Variables et performance du Modèle 7.

>6.4 (3148)	1.72%	5.97%	10.80%	27.38%	54.13%
Precision					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
<=0 (43545)	97.63%	77.15%	65.92%	41.05%	20.25%
<=0.4 (2877)	1.68%	12.23%	13%	14.21%	9.16%
<=1.6 (81)	0%	0.22%	0.65%	0.59%	0.35%
<=6.4 (2702)	0.53%	7.76%	13%	22.09%	16.25%
>6.4 (3148)	0.16%	2.64%	7.42%	22.06%	53.99%

Variables et performance du Modèle 8.

Figure 45 Variables et performance des Modèles 1 à 8

- Deux modèles intègrent la centralité d'accessibilité automobile à méso-échelle, selon la métrique rectilinéaire. Il s'agit d'un paramètre plus difficile à interpréter, car la pondération de la métrique rectilinéaire automobile est un ratio entre la distance métrique à vol d'oiseau et la distance-temps sur le réseau. Cet indicateur combine ainsi les logiques de la *Reach* à 5 minutes et celles de la performance moyenne du réseau routier.

Chaque modèle est le fruit d'un certain nombre de choix procéduraux. Dans leur ensemble, ils soulignent que l'explication des densités commerciales est une combinaison d'accessibilité piétonne à la micro-échelle, de performance routière à la méso-échelle et d'intermédiarité (différemment mesurée) à la méso-échelle. Quel modèle est plus apte, en revanche, à être utilisé à des fins prédictives du potentiel commercial des tronçons viaires dans l'aire d'étude ? En se basant sur la seule précision totale (qui est le paramètre que l'algorithme d'apprentissage maximise), ce sont les trois modèles identiques issus de la discrétisation par k-means des variables qu'il faudrait choisir. Ce modèle présente en revanche plusieurs faiblesses. D'abord il utilise des descripteurs intrinsèques des tronçons viaires, comme proxy de caractéristiques configurationnelles. Ensuite, sa meilleure performance prédictive est liée à une meilleure capacité à prédire les configurations viaires liées à des densités commerciales nulles (97,6% des tronçons de cette classe sont correctement prédit par le modèle). Le modèle est en revanche beaucoup moins performant avec les autres quatre classes de densités commerciales (précision entre 54% pour la classe 5 et à peine 0,6% pour la classe 3). En effet, les différentes stratégies de stratification de la base de données, échouent à produire des modèles plus spécifiques à la prédiction des hautes densités commerciales.

Le modèle n° 3, tout en ayant une précision totale de 68,9%, nous semble ainsi plus équilibré dans la prédiction des différentes classes de densité commerciale. Si la précision pour la classe 1 se réduit marginalement (94,9%), celle des autres classes converge vers des valeurs intermédiaires (26,1%, 20,3% et 46,6% pour les classes 2, 4 et 5). Seule la classe 3 continue à avoir une précision extrêmement faible (1,3%). De surcroit, si l'on considère la précision élargie (*Broad Precision*), qui prend en compte également les petites erreurs dans la prédiction des classes, le modèle 3 est celui à la meilleure performance (86,7%).

Le modèle que nous utiliserons pour la prédiction du potentiel de densité commerciale des tronçons viaires dans l'agglomération niçoise est ainsi le modèle 3, qui prend en compte les indicateurs *Reach* à 300 mètres, de *Straightness* normalisée à 5 minutes et de *Beetweeness*

par rapport aux grandes surfaces commerciales (Figure 46). Les diagrammes dans la Figure 47 montrent l'impact probabiliste de chacune de ces variables sur la classe de densité commerciale du tronçon viaire, dans un raisonnement *ceteris paribus* (c'est-à-dire toute chose étant égale par ailleurs). Dans la première colonne, on représente les distributions de probabilités du modèle sans aucune connaissance sur les variables. Pour la variable cible des densités commerciales, il s'agit de la distribution de probabilité de référence. Dans les colonnes successives, on force les variables explicatives, une à la fois et toute chose étant égale par ailleurs, à prendre des valeurs données (barre verte dans le diagramme de probabilité, correspondant à une connaissance certaine). Les flèches grises sur le diagramme de probabilité des densités commerciales indiquent alors des variations positives (flèche vers la gauche) ou négatives (flèches vers la droite) par rapport à la distribution de référence. Globalement, on constate que chaque variable est liée positivement à la densité commerciale (même si les conditions les plus favorables aux fortes densités commerciales se vérifient pour l'avant-dernière classe de performance du réseau routier) et que la centralité d'accessibilité piétonne à la micro échelle joue de loin le rôle le plus important.

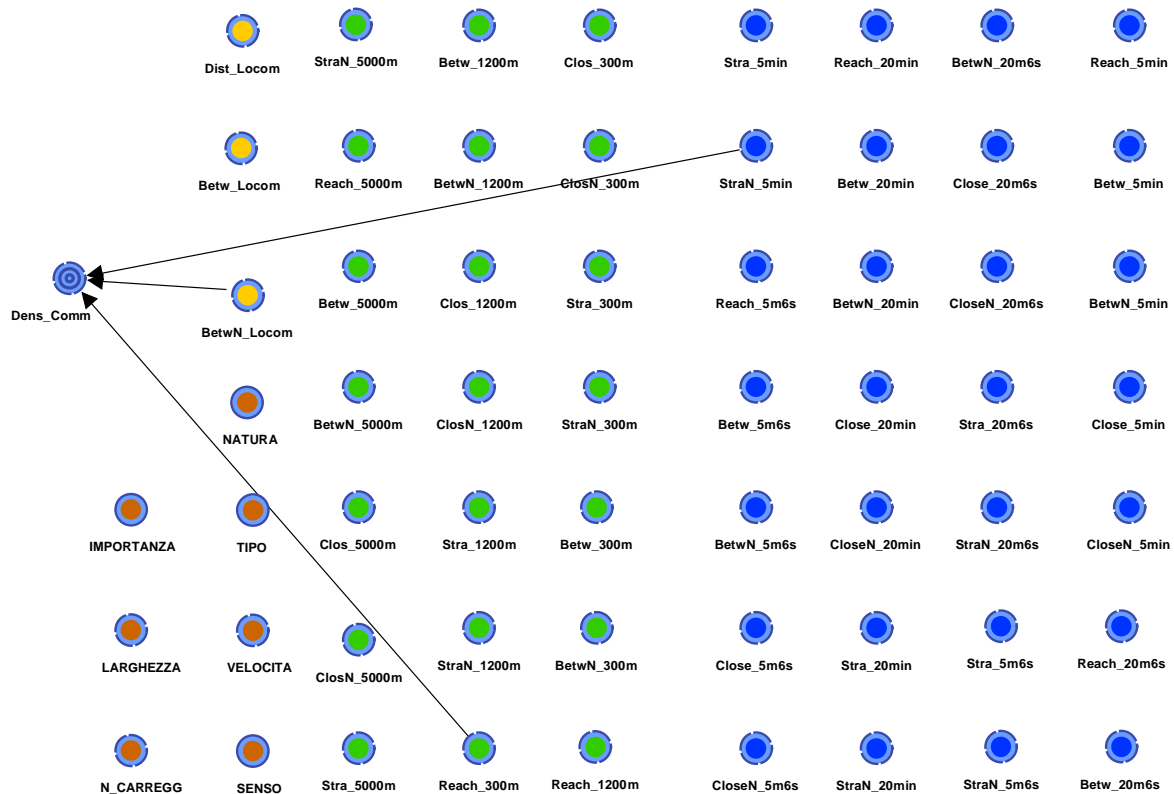
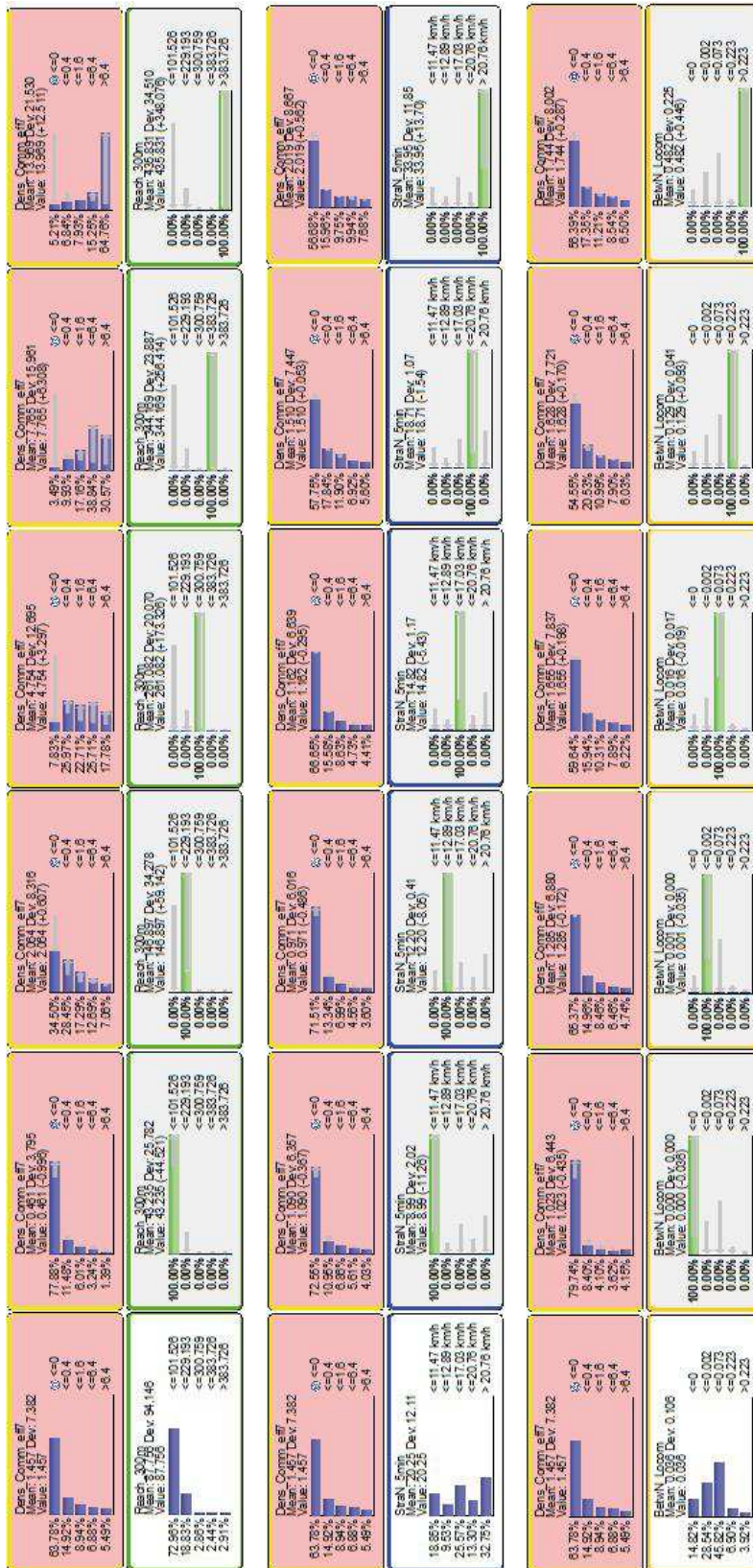


Figure 46 La sélection des variables pour le modèle n° 3 : descripteurs intrinsèques du tronçon (en marron), indicateurs configurationnels piétons (en vert), configurationnels routiers (en bleue) et configurationnels liés aux locomotives commerciales (en orange). La variable cible est la densité commerciale de petites et moyennes surfaces.

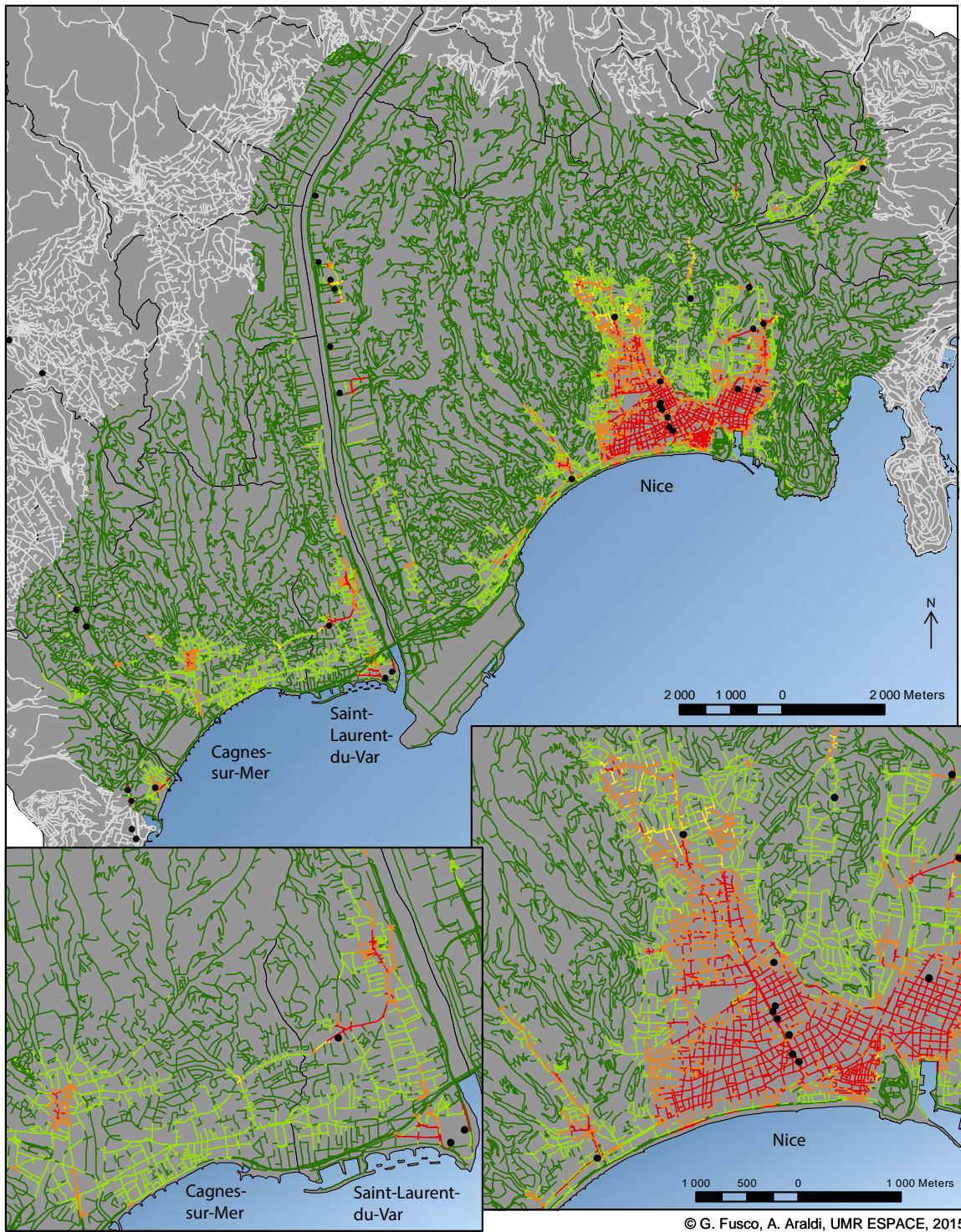
Même si toutes les relations probabilistes sont positives, il ne s'agit pas d'une régression linéaire, et certaines relations peuvent s'inverser pour des combinaisons particulières des variables. Ainsi, quand la *Reach 300 mètres* est très élevée, la maximisation de la densité commerciale s'obtient pour des valeurs de *Normalized Straightness 5 minutes* moyens ou moyens-élevés. Cette combinaison de valeurs correspond aux configurations réticulaires de

centre-ville traditionnel, où le réseau viaire est bien maillé dans un tissu bâti dense et les parcours routiers ne sont pas forcément les plus performants. Le modèle n° 3 peut ainsi être utilisé pour inférer en probabilité la classe de densité commerciale la plus probable pour chaque tronçon viaire, en connaissant les valeurs des indicateurs configurationnels du tronçon. La carte XXX spatialise les inférences du modèle. Ces inférences sont correctes dans 68,9% des cas et ne s'éloignent pas trop de la réalité (avec une classe d'erreur au maximum) dans 86,7% des cas. La Figure 49 donne les résidus. La prédiction du modèle doit être interprétée comme un potentiel de densité commerciale, qui peut être supérieur ou inférieur à la densité commerciale calculée par la KDE à partir des données empiriques. Les tronçons rouges et oranges dans la Figure 49 seraient ainsi les tronçons les plus surestimés par le modèle : le potentiel commercial inféré à partir des paramètres configurationnels est bien supérieur aux densités commerciales constatées, ce qui peut être lié à un manque de foncier commercial sur les bords des tronçons, à des situations défavorisées par d'autres facteurs non pris en compte par le modèle, ou encore à un potentiel résiduel de ces tronçons qui n'a pas encore été exploité par les acteurs du commerce.



Realisation avec le logiciel Bayesialab - C. Guco, A. Analdi 2015

Figure 47 Impact probabiliste des variables du modèle n°3 (ceteris paribus) sur les classes de densité commerciale (distribution de probabilité dans les diagrammes avec fond rose) : [a] impact de la Reach 300 mètres ; [b] impact de la Normalized Straightness 5 minutes ; [c] impact de la Betweenness relative aux locomotives commerciales.



Classe de densité commerciale des tronçons depuis le modèle
(DK = densité de Kernel)

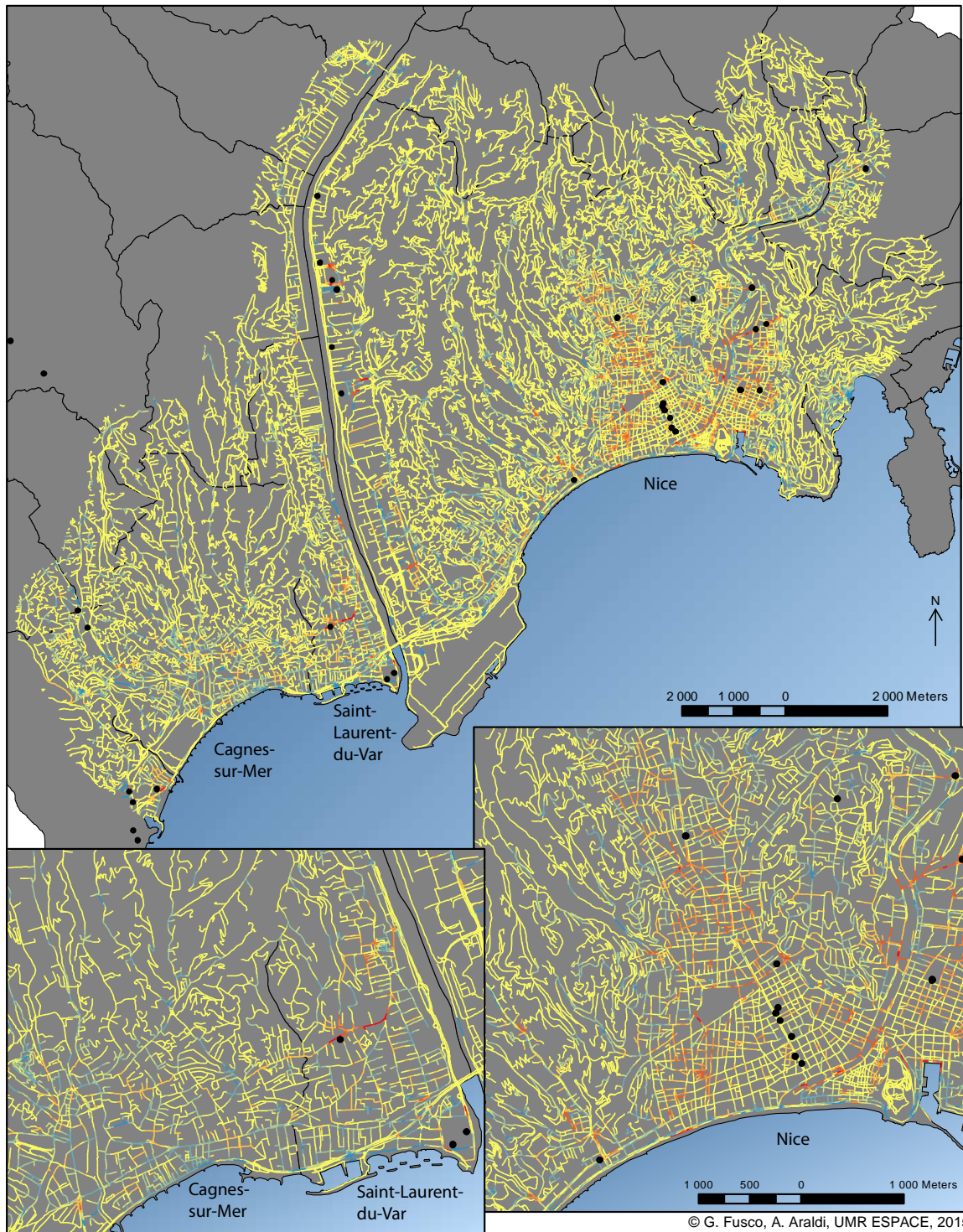
- 1 (DK = 0) 4 (1,6 < DK ≤ 6,4)
- 2 (0 < DK ≤ 0,4) 5 (DK > 6,4)
- 3 (0,4 < DK ≤ 1,6) N.C.

- Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)
- Communes de l'aire d'étude

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable.

Source réseau : BD TOPO IGN

Figure 48 *Densités commerciales inférées par le modèle n° 3, selon l'approche de la valeur la plus probable.*

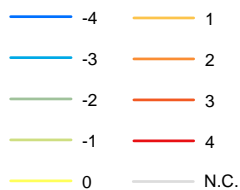


Écarts entre la prévision du modèle et les densités commerciales réelles

(écarts de classes de densité commerciale)

Sorties du modèle utilisées :

- classe de densité la plus probable



• Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)

■ Communes de l'aire d'étude

Source réseau : BD TOPO IGN

Figure 49 *Écarts entre prévisions du modèle n° 3 et réalité, selon l'approche de la valeur la plus probable.*

Les tronçons bleus et azur (très nombreux dans la carte et en tout cas beaucoup plus nombreux que les précédents) sont en revanche des tronçons montrant des densités commerciales supérieures à ce que les seuls paramètres configurationnels permettraient d'inférer : d'autres facteurs attractifs, qui ne sont pas intégrés dans notre modèle, pourraient expliquer ces situations. C'est notamment le cas des tronçons de bord de mer, particulièrement attractifs pour les activités d'hôtellerie-restauration dans cette agglomération touristique. La proximité (ou même l'intermédiarité) des tronçons aux points d'attraction touristique pourrait ainsi rendre le modèle plus spécifique à l'explication des activités commerciales dans notre aire d'étude.

Une lecture plus attentive des prédictions du modèle illustrées dans la Figure 48, montre néanmoins certaines limites dans la procédure d'inférence utilisée. Au-delà de l'espace central niçois, seulement des petites concentrations commerciales émergent plus à l'ouest dans le vallon de la Madeleine, le long du littoral de Nice-Ouest, à l'embouchure du Var autour de centre commercial de Cap 3000, dans les centres historiques de Saint-Laurent et de Cagnes, et dans quelques rares sous-espaces périphériques, à proximité des grandes surfaces commerciales. Comme nous le savions déjà depuis la figure 45, le modèle est particulièrement défaillant pour identifier les tronçons abritant un seul commerce (classe 3 de la densité commerciale) et attribue souvent les classes 1 ou 2 à ces tronçons. Or, l'analyse des probabilités attachées aux valeurs inférées (qui sont, nous le rappelons, seulement les valeurs les plus probables parmi les 5 valeurs possibles), montre que ces inférences erronées sont souvent effectuées avec des probabilités comprises entre 0,25 et 0,50 : les solutions proposées par le modèle sont bien les plus probables, mais elles sont entachées de très forts niveaux d'incertitude probabiliste. En effet, plusieurs autres solutions présentent des valeurs de probabilité comparables à la solution la plus probable et la probabilité est ainsi forte que d'importants écarts à la solution la plus probable sont à constater entre le modèle et la réalité. De surcroît, l'utilisation des valeurs les plus probables produit un biais vers la sous-estimation de la présence commerciale dans l'aire d'étude : la somme des écarts au modèle pour les 16 296 tronçons pour lesquels l'inférence du modèle n'est pas correcte est -16 304. En d'autres termes, lorsque le modèle produit une mauvaise inférence, celle-ci est en moyenne biaisée par une sous-estimation d'une classe de densité. Au lieu d'utiliser les solutions les plus probables, on pourrait alors prendre en compte l'espérance mathématique de la variable classe de densité, où la valeur moyenne de chaque classe est pondérée par sa probabilité d'inférence. Comme illustré dans la figure 50, la précision du modèle serait alors particulièrement mauvaise (13,5% seulement de prédictions correctes), le biais des erreurs deviendrait positif (somme des écarts au modèle égale à 51 006 pour les 45 261 erreurs de prédiction) même si, par la définition même de l'espérance mathématique, on aurait réduit la valeur attendue des erreurs de prédiction, lorsqu'ils sont calculés non pas en différence de classes, mais en différence de valeurs. Le principal problème de cette approche est la presque impossibilité à prédire les tronçons à densité commerciale nulle, qui sont presque toujours prédits en classe 2 ou 3.

Nous souhaitons alors mettre au point une autre démarche d'exploitation des inférences du modèle, qui puisse prendre en compte les niveaux d'incertitude des inférences. Même si cela se fera aux dépens de la précision totale du modèle (l'apprentissage bayésien optimise la

précision totale des valeurs les plus probables), cette démarche est susceptible de réduire l'amplitude des erreurs des inférences et éliminer (ou fortement réduire) le biais dans les erreurs d'inférence. Il s'agit d'une démarche mixte entre les valeurs les plus probables et ceux de l'espérance mathématique. Nous souhaitons ainsi déterminer un seuil de probabilité minimale au-dessous duquel la solution la plus probable sera remplacée par l'espérance mathématique. Une analyse de sensibilité montre que la valeur optimale de ce seuil, permettant un bon compromis entre précision, biais des écarts et réduction des incertitudes est 0.4. Pour cette valeur (figure 50, c), la précision du modèle descend à 67,3 %, mais le biais de sous-estimation est presque éliminé (somme des écarts égal à -1 958 pour les 17 096 erreurs de prédiction) et l'incertitude des solutions les plus probables a été réduite dans la mesure où toute inférence a désormais une probabilité supérieure à 0,4. De surcroit, la matrice de confusion montre que le modèle s'est nettement amélioré dans la prédiction des tronçons de classe de densité 3, même si cela se fait aux dépens des prédictions correctes pour ceux de la classe de densité 2. Nous considérons qu'il s'agit d'un avantage ultérieur de la nouvelle stratégie d'exploitation du modèle, car la prédiction des tronçons avec environs un équivalent petit commerce (classe 3) est pour nous beaucoup plus importante que celle des tronçons qui enregistrent seulement l'influence d'un commerce qui leur est proche.

Espected Value (approche de l'espérance mathématique) a					
Precision	0.13546502				
Sum of Model Deviations	51 006				
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (5)	5	0	0	0	0
=0.4 (6349)	23791	2293	1173	458	82
=1.6 (209)	7839	2667	1553	949	367
=6.4 (2354)	1905	1933	1416	1442	908
>6.4 (2627)	37	237	441	1058	1799

Most Probable (approche de la solution la plus probable) b					
Precision	0.68872844				
Sum of Model Deviations	-16 304				
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (40814)	31871	4689	2466	1283	505
=0.4 (6349)	1493	1862	1311	1107	576
=1.6 (209)	26	48	61	49	25
=6.4 (2354)	132	366	487	791	578
>6.4 (2627)	55	165	258	677	1472

Most Probable (p>0,4); Espected Value (p<0,4) (approche mixte, intégrant l'incertitude) c					
Precision	0,67344756				
Sum of Model Deviations	-1 958				
Occurrences					
Value	<=0 (33577)	<=0.4 (7130)	<=1.6 (4583)	<=6.4 (3907)	>6.4 (3156)
=0 (39427)	31380	4288	2192	1120	447
=0.4 (235)	46	103	46	34	6
=1.6 (3020)	954	913	658	400	95
=6.4 (6276)	1160	1600	1282	1371	863
>6.4 (3395)	37	226	405	982	1745

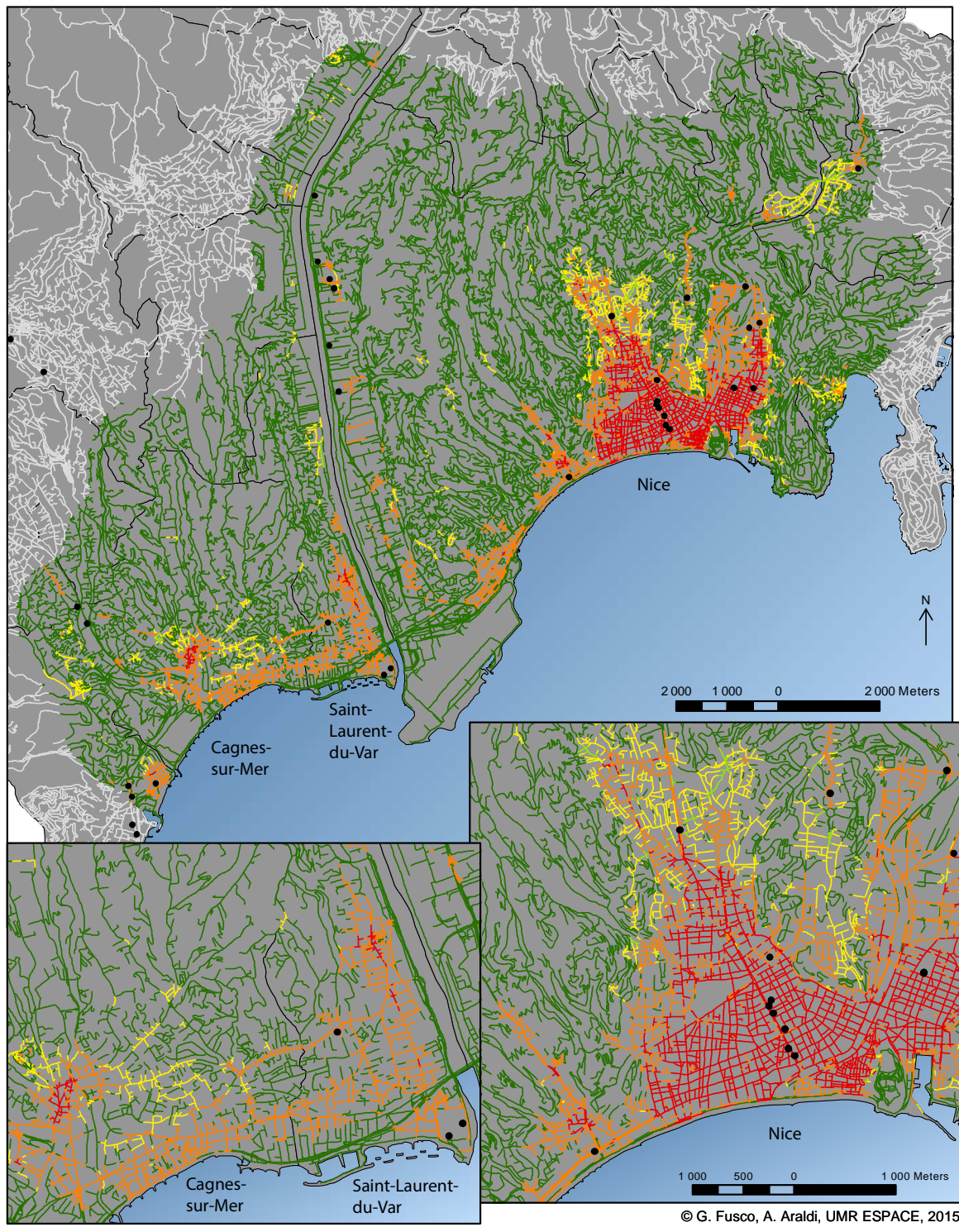
Figure 50 Performance de trois stratégies d'exploitation du modèle n 3 : [a] approche de l'espérance mathématique ; [b] approche de la solution la plus probable ; [c] approche mixte, intégrant l'incertitude.

La Figure 51 montre ainsi les densités commerciales inférées par le modèle n° 3 en implémentant la nouvelle stratégie d'exploitation des inférences, qui intègre les niveaux

d'incertitude. On observe des différences importantes par rapport aux potentiels estimés dans la Figure 48. Les biais de sous-estimation des potentiels sont éliminés. La partie centrale de Nice, le vallon de la Madeleine, le littoral de Nice-ouest et l'essentiel des espaces centraux et littoraux de Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer émergent comme espace à fort ou très fort potentiel commercial (classes 4 et 5). D'autres petits sous-espaces à fort potentiel commercial sont identifiés dans les zones périphériques : à Nice-nord, Nice-est, à Villefranche-sur-mer, dans la Plaine du Var, au nord et à l'ouest du centre de Cagnes-sur-mer, souvent, mais pas toujours, à proximité de grandes surfaces commerciales. D'importants espaces à potentiel commercial moyen sont également identifiés (la classe 3, présente surtout à Nice-nord, Nice-est et Villefranche-sur-mer, mais également dans quelques espaces clés du système collinaire de Nice, Saint-Laurent et Cagnes). Sans être capable de détecter toutes les micro-concentrations commerciales de la donnée empirique (Figure 43), les potentiels inférés par la nouvelle exploitation du modèle sont spatialement beaucoup plus articulés que ceux illustrés dans la Figure 48 : l'exploitation selon les solutions les plus probables est un filtre passe bas capable de détecter seulement les plus grandes concentrations commerciales et très peu sensible aux configurations réticulaires susceptibles d'expliquer des plus petites concentrations.

Nous retiendrons ainsi la nouvelle exploitation du modèle comme la plus pertinente, et la carte de la Figure 51 comme la situation de référence du potentiel commercial produit par les configurations réticulaires dans notre aire d'étude. Les écarts entre le modèle et la réalité sont illustrés dans la Figure 52. Par rapport aux écarts aux classes les plus probables (Figure 49), on observe un meilleur équilibre entre tronçons au potentiel commercial surestimé et sous-estimé. Des tronçons sur le bord de mer de Nice (autour de la colline du château et du port), de Saint-Laurent-du-Var et de Cagnes-sur-Mer montrent encore une sous-estimation du potentiel commercial, même si moins marquée que dans la Figure 49. Les tronçons surestimés deviennent en revanche beaucoup plus nombreux. Des quartiers entiers à Nice-nord et à Nice-est montrent ainsi un vaste potentiel sous-exploité, tous comme les rues couvrant la couverture du Paillon (il s'agit d'un jardin public dépourvu de foncier commercial). De façon encore plus sélective, de nombreux axes viaires qui maillent les espaces centraux de Saint-Laurent-du-Var et de Cagnes-sur-Mer, montrent un potentiel commercial sous-exploité : les configurations réticulaires y sont très favorables au commerce, mais d'autres facteurs limitants rentrent en jeu, qui ne sont pas pris en compte par le modèle (disponibilité de foncier commercial, limitations dans les usages possibles des bâtiments, facteurs répulsifs locaux, etc.).

On notera, finalement, des petites erreurs de modélisation aux abords immédiats de quelques grandes surfaces commerciales : la localisation approximative des commerces des galeries marchandes dans la base de données de la CCINCA et/ou des approximations dans nos calculs de chemins minimaux vers les locomotives, font que des écarts positifs et négatifs s'y concentrent tout particulièrement.

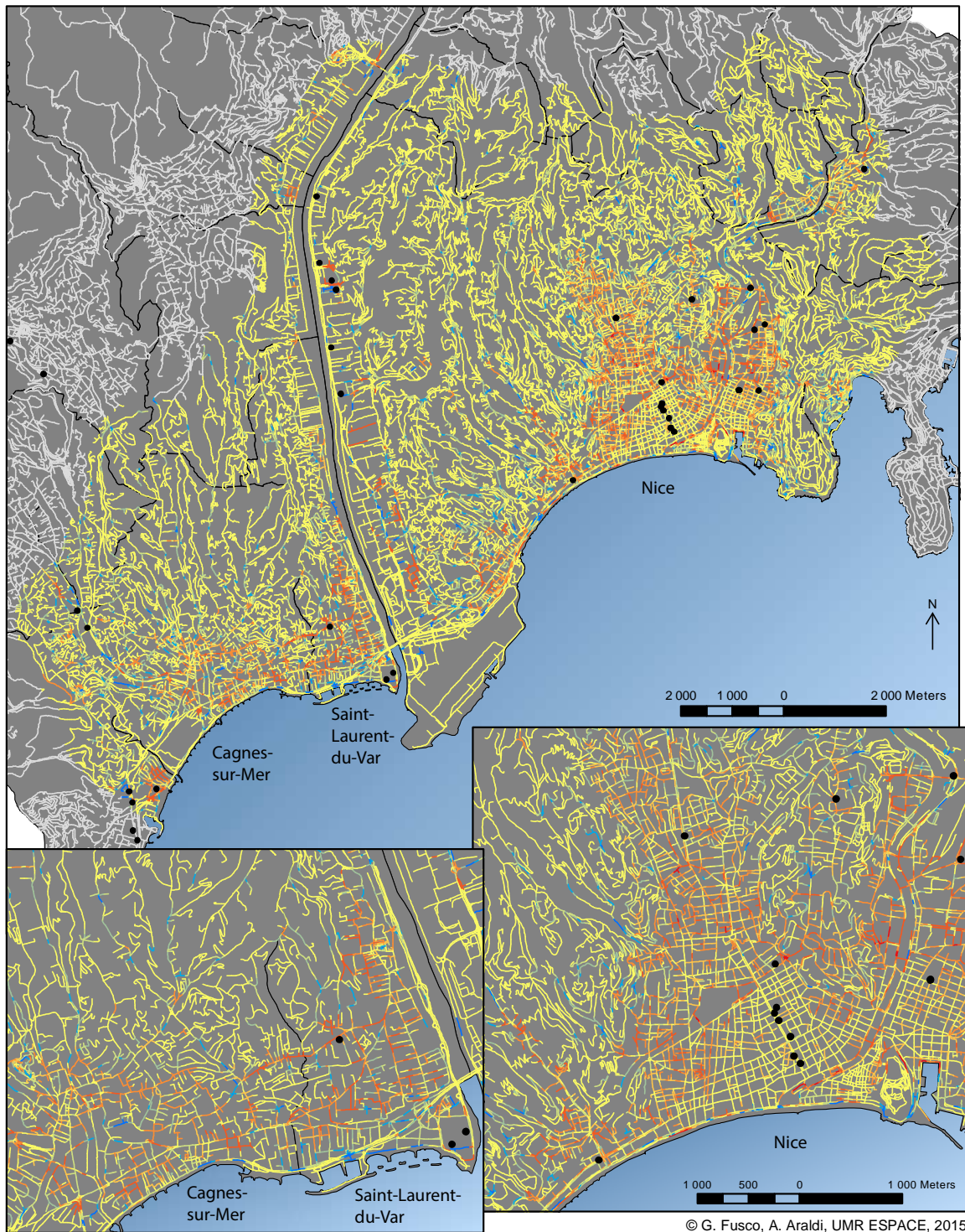


Classe de densité commerciale des tronçons depuis le modèle
 (DK = densité de Kernel)

— 1 (DK = 0)	— 4 (1,6 < DK ≤ 6,4)	• Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m ²)
— 2 (0 < DK ≤ 0,4)	— 5 (DK > 6,4)	■ Communes de l'aire d'étude
— 3 (0,4 < DK ≤ 1,6)	— N.C.	

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 51 Densités commerciales inférées par le modèle n° 3, selon l'approche prenant en compte l'incertitude des prévisions.



© G. Fusco, A. Araldi, UMR ESPACE, 2015

Écarts entre la prévision du modèle et les densités commerciales réelles
 (écarts de classes de densité commerciale)

— -4	— 1	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²) ■ Communes de l'aire d'étude
— -3	— 2	
— -2	— 3	
— -1	— 4	
— 0	— N.C.	

Sorties du modèle utilisées :
 - classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$)
 - espérance mathématique ($p < 0,4$)

Source réseau : BD TOPO IGN

Figure 52 Écarts entre prévisions du modèle n° 3 et réalité, selon l'approche prenant en compte l'incertitude des prévisions.

3.3.4. Modifier les réseaux viaires pour redistribuer les potentiels commerciaux : stress tests sur l'agglomération niçoise

Une fois sélectionné le meilleur modèle probabiliste de la relation entre système morphologique et distribution commerciale et mis au point une approche optimale à l'exploitation de ses inférences, nous pouvons passer à la seconde phase de notre recherche. Il s'agit ici d'un *stress test* du maillage commercial par la modification des morphologies des réseaux urbains (section 1.11). Les règles de modification des réseaux, permettant d'aboutir à de nouveaux scénarios pour la relation forme urbaine / commerce, sont les suivantes :

- Règle 1 : augmentation de la connectivité du réseau par la création de nouveaux arcs permettant de développer de nouvelles connexions à partir des nœuds de degré 1 ou 3 du réseau original ; le réseau perd (au moins localement) tout caractère arborescent, en suivant une logique de redondance des connexions.
- Règle 2 : densification du maillage du réseau par création de nouvelles rues d'interconnexion dans les îlots trop grands, prenant comme exemple les caractéristiques de régularité du damier historique niçois.
- Règle 3 : diminution drastique de la connectivité par suppression (privatisation) de tout tronçon redondant en ramenant le réseau originaire à son arbre de recouvrement minimal ; cette règle porte à l'extrême la logique de réduction des connexions redondantes et de transformation du réseau urbain dans une structure arborescente.
- Règle 4 : diminution de la connectivité du réseau par fusion des îlots trop petits, en supprimant (privatisant) un ou plusieurs tronçons qui les bordent, selon le phénomène de clôture sélective assimilable à la clubbisation et à l'appropriation privée d'espaces publics ; à la différence de la règle précédente, des grandes mailles continuent à structurer la connectivité de l'ensemble de l'espace urbain.
- Règle 5 : poursuite de la croissance arborescente du tissu urbain, par création de segments proportionnels aux dimensions des tronçons existants, auxquels ils sont connectés par une simple bifurcation se terminant en cul-de-sac ; cette règle poursuit la logique arborescente des nouveaux lotissements, tout en préservant la connectivité et le maillage du réseau existant.
- Règle 6 : réduction et homogénéisation des vitesses sur le réseau routier, permettant de rapprocher les métriques accélérantes de l'espace-temps de l'automobiliste à celle, plus homogène, des distances parcourues par les piétons.

Les six règles d'évolution des réseaux impactent différemment les configurations viaires (règles 1-5) et routières (règle 6) selon le sous-espace morphologique au sein de l'aire d'étude. Par exemple, la densification du maillage (règle 2) modifier seulement à la marge les configurations de l'aire centrale de Nice, où le maillage est déjà très dense, tandis qu'il produit de nombreux nouveaux îlots dans à Saint-Laurent-du-Var, à Cagnes-sur-Mer et sur les collines niçoises. De même, l'augmentation de la connectivité (Figure 53, haut) modifie seulement à la marge le tissu maillé du centre de Nice, mais démultiplie considérablement le nombre de tronçons à Cagnes, à Saint-Laurent et sur les collines. A contrario, les deux règles comportant une diminution quantitative du réseau viaire par fermeture/privatisation de tronçons redondants impactent plus lourdement le centre niçois (Figure 54). Que ça soit pour transformer le réseau viaire dans une grande structure arborescente, ou pour obtenir des

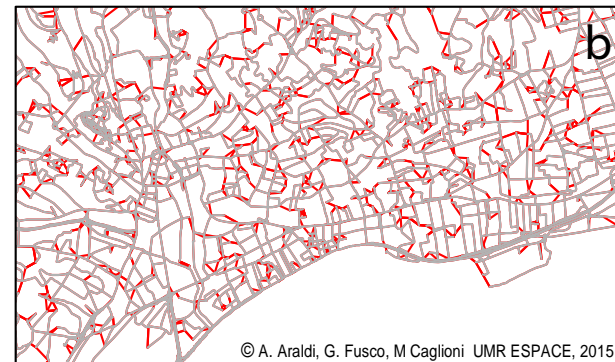
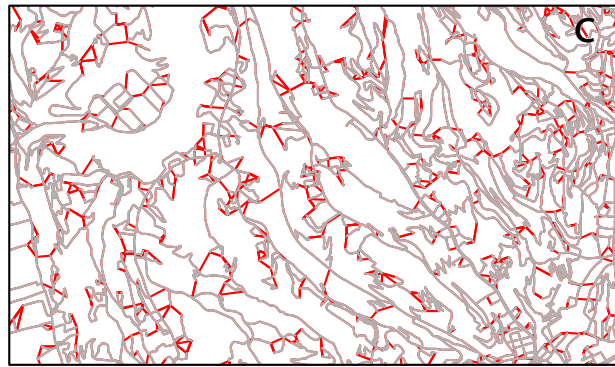
grandes mailles au sein du réseau, le tissu viaire finement maillé du centre niçois perd beaucoup d'éléments. Plus à l'ouest, ou sur les collines, les configurations sont déjà relativement arborescentes ou grossièrement maillées et le nombre d'éléments à supprimer s'en trouve d'autant réduit. Même la poursuite de la croissance arborescente des réseaux (Figure 53, en bas) impacte plus lourdement les configurations viaires de l'ouest et des collines : les nombreux segments viaires particulièrement longs voient surgir des nouveaux branchements pour segments arborescents. Dans le centre niçois, ce phénomène est plus circonscrit à la colline de Cimiez ou aux abords des parcs et des aires ferroviaires.

Pour quantifier l'impact de ces transformations sur les indicateurs configurationnels, nous avons reconduit les analyses de centralité multiple, avec l'outil UNA, sur les nouvelles configurations viaires et routières qui émergent de l'application des règles locale de transformation des réseaux. On remarquera que, lorsque les règles prévoient une croissance du réseau (règles 1, 2 et 5), aux nouveaux tronçons créés nous avons attribué une vitesse routière maximale de 20 km/h. Dans les Figures 55-60 nous focalisons notre attention sur les trois indicateurs configurationnels qui ont été sélectionnés dans le modèle bayésien n° 3 (section 2.3) : la centralité simplifiée piétonne à 300 mètres, la performance des réseaux routiers à 5 minutes et l'intermédiarité par rapport aux grandes surfaces commerciales.

Dans les cas d'extension du réseau (règles 1, 2 et 5), s'opère une redistribution des points bâtis sur les tronçons les plus proches qui, paradoxalement, peut conduire à une augmentation des distances réseau entre points bâtis et, par conséquent, à une diminution des valeurs de *Reach* piétonne à 300 mètres. En réalité, la croissance du réseau viaire, est accompagnée par une augmentation corrélative de la trame bâtie : sauf cas exceptionnel, c'est pour atteindre des nouveaux points bâtis que le réseau se développe. Nous garderons à l'esprit cette observation dans l'évaluation des résultats de nos modélisations.

Certaines propriétés varient corrélativement à l'augmentation/diminution de la connectivité des réseaux. En ce qui concerne l'intermédiarité, par exemple, les Figures 59 et 60 montrent comment la règle 1 est susceptible de démultiplier les hautes valeurs d'intermédiarité, car les chemins minimaux se redistribuent sur de nombreuses connexions redondantes. A contrario, les règles 3 et 4 produisent des réseaux hautement hiérarchisés où un nombre limité de tronçons capte l'essentiel des chemins minimaux : il s'agit des structures axiales au niveau de base de l'arborescence pour la règle 3, et des axes bordant les grandes mailles dans le réseau produit par la règle 4. La règle 5, en revanche, démultiplie les tronçons à très faible intermédiarité, confortant encore plus le rôle des axes à forte intermédiarité vers les grandes surfaces, identifiés dans le réseau de référence (Figure 41, en haut).

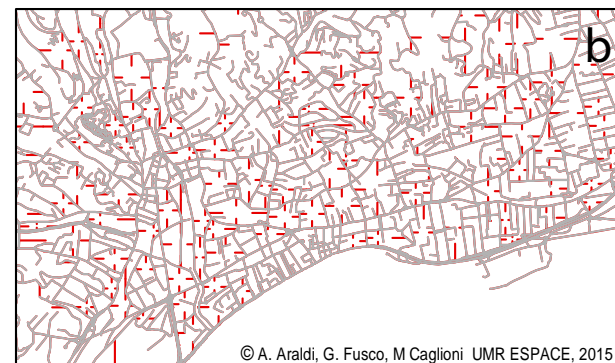
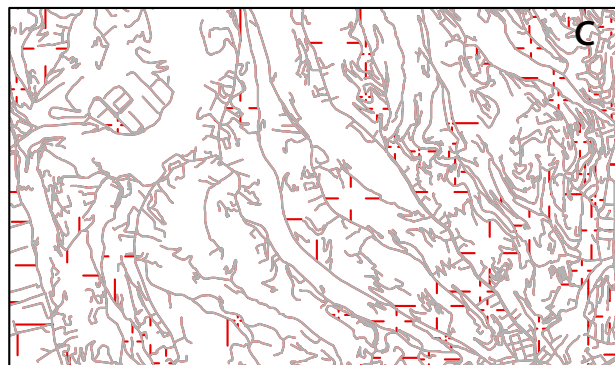
Dans le cas de l'indicateur de performance des réseaux routiers (Figures 57 et 58), on peut observer des modifications liées à l'augmentation/diminution de la connectivité des réseaux. Les valeurs augmentent, de façon généralisée, pour les règles 1 et 2, diminuent pour les règles 3 et 4, tandis qu'elles n'évoluent pas beaucoup pour la règle 5. Les diminutions observées pour la règle 3 sont drastiques : seulement pour les plus longs axes linéaires, la performance du réseau continue à être supérieure aux 25 km/h ; dans tous les autres tronçons, la grande circuité des parcours minimaux réduit considérablement la performance finale. La performance du réseau routier diminue également dans le scénario 6, où les tronçons n'évoluent pas, mais la vitesse des routes les plus rapides est réduite. Cela pénalise les tronçons à proximité immédiate des échangeurs des autoroutes et des voies rapides urbaines.



Règle numéro 1:
Augmentation de la connectivité

a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice

— Réseau originaire
— Eléments rajoutés

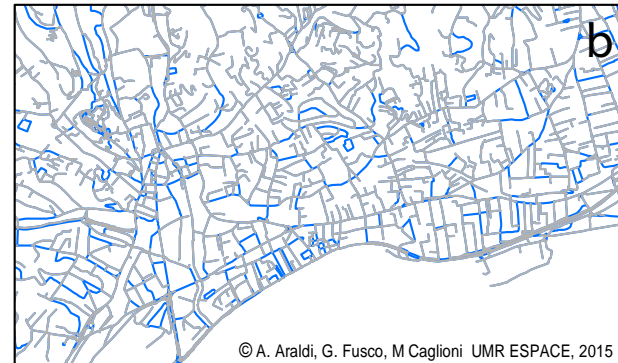
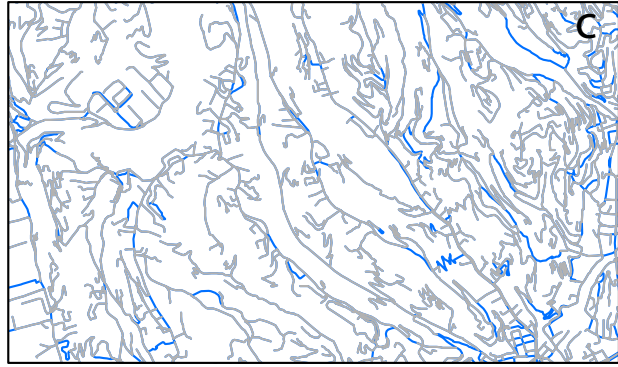


Règle numéro 5:
Augmentation de l'arborescence

a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice

— Réseau originaire
— Eléments rajoutés

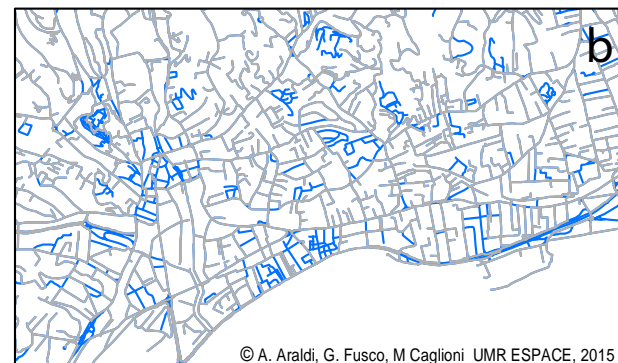
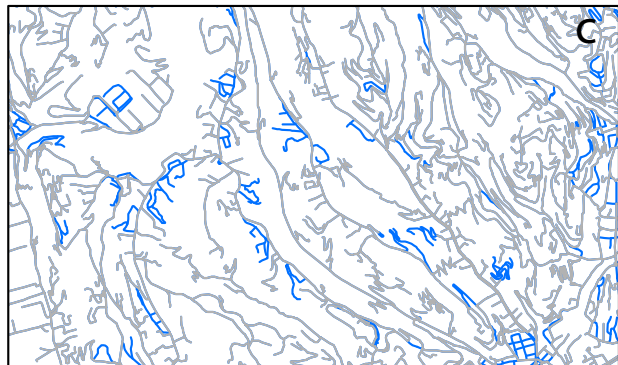
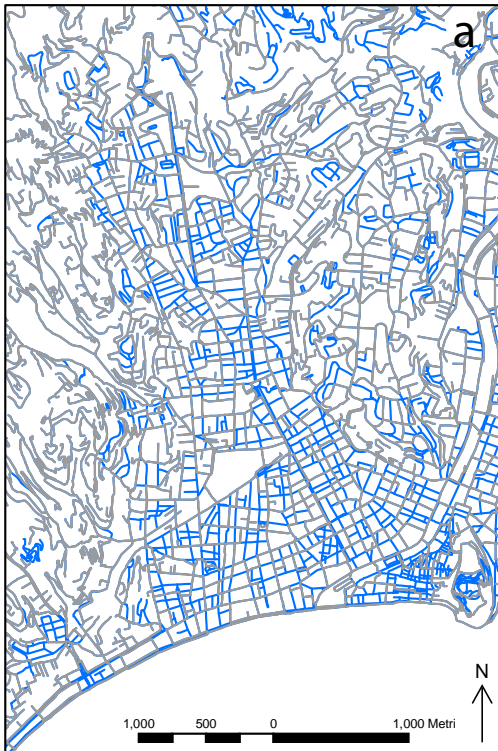
Figure 53 *Comparaison des scénarios d'augmentation de la connectivité (Règle 1) et de la croissance arborescente (Règle 5) avec le réseau viaire actuel.*



Règle numéro 3:
 Réduction de la connectivité par
 arbre de recouvrement minimal

a. Zoom sur Nice centre
 b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
 c. Zoom sur les collines de Nice

— Eléments supprimés
 — Réseau modifié

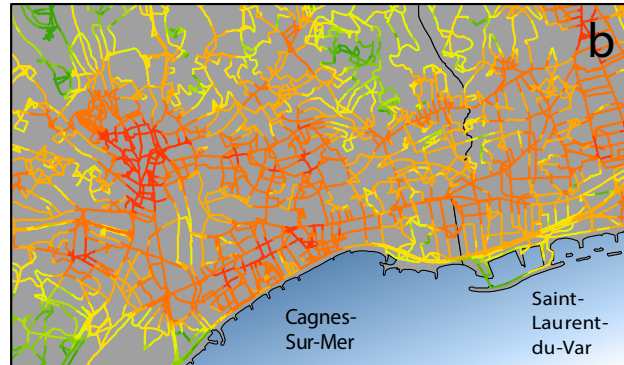
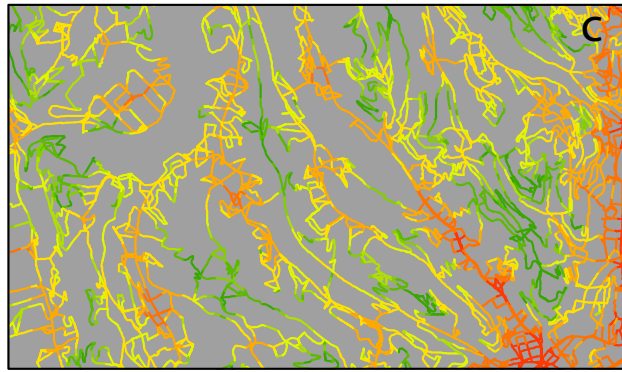
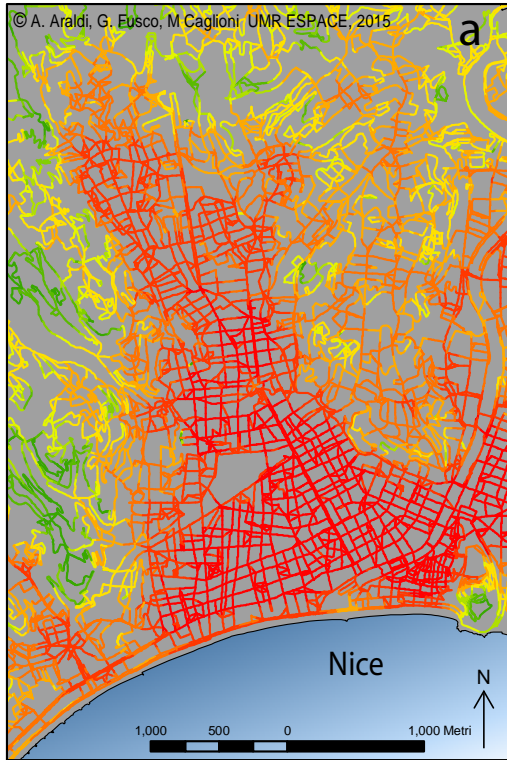


Règle numéro 4:
 Réduction de la connectivité
 par dédensification du maillage

a. Zoom sur Nice centre
 b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
 c. Zoom sur les collines de Nice

— Eléments supprimés
 — Réseau modifié

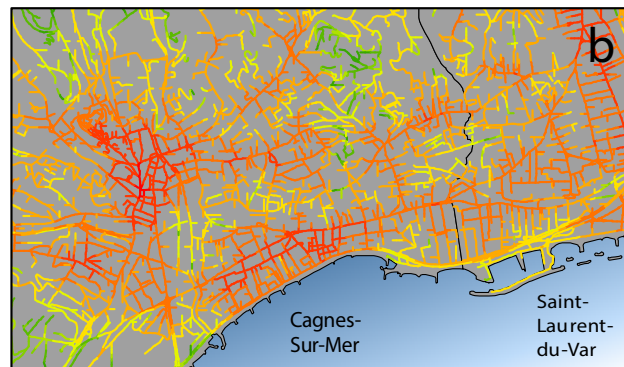
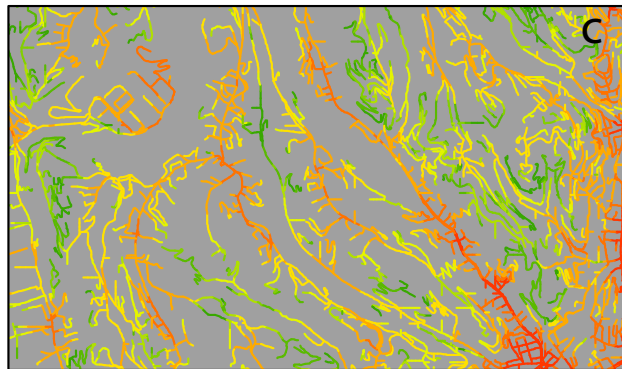
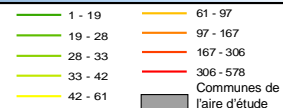
Figure 54 Comparaison des scénarios de réduction du réseau à un arbre minimal (Règle 3) et de diminution de la densité du maillage (Règle 4) avec le réseau viaire actuel.



Règle 1 : augmentation de la connectivité

Centralité d'accessibilité simplifiée à 300 m (Reach)

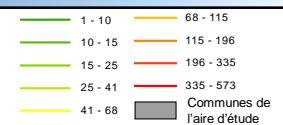
a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice



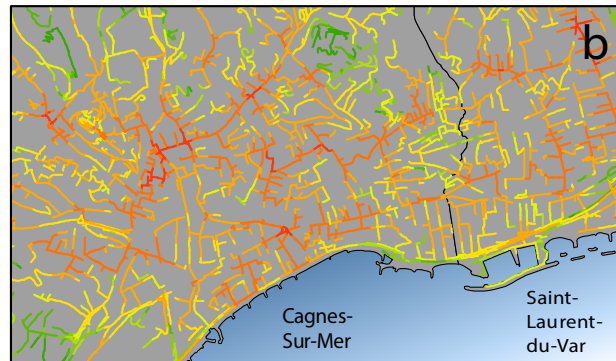
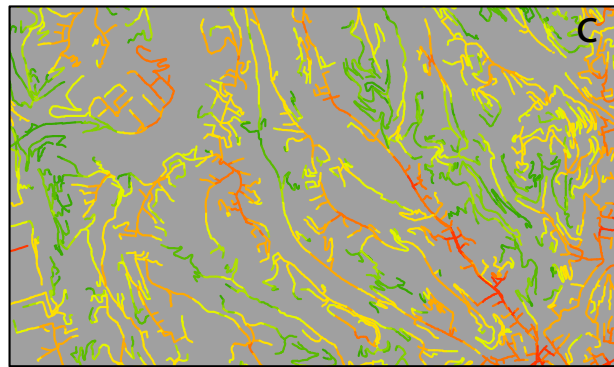
Règle 5 : croissance arborescente

Centralité d'accessibilité simplifiée à 300 m (Reach)

a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice



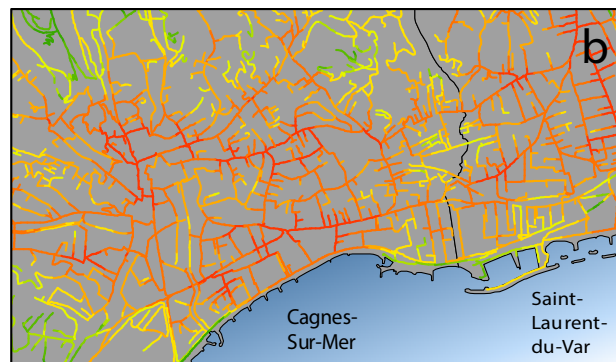
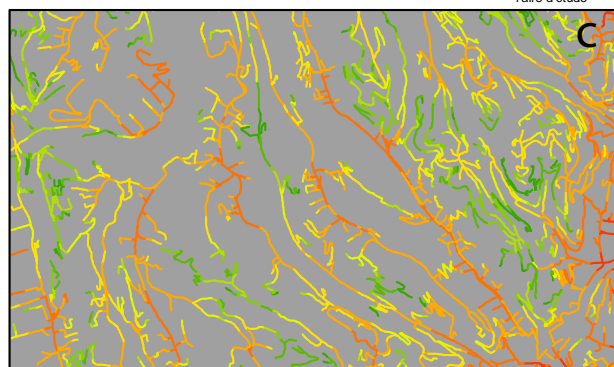
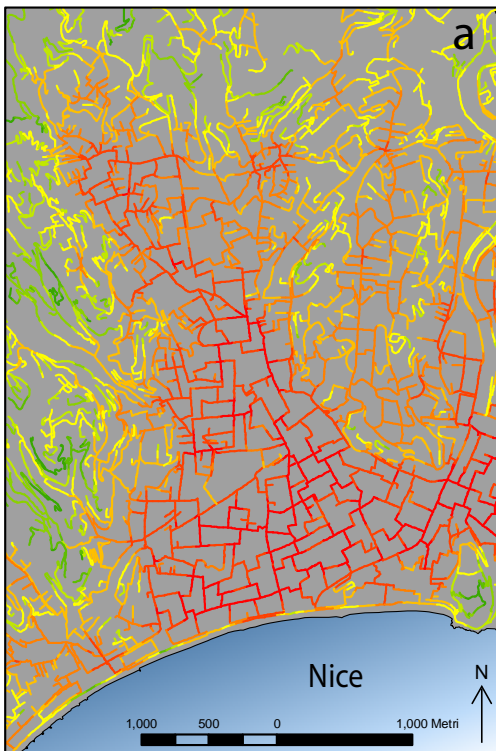
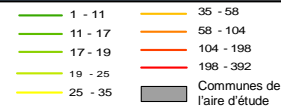
Modification des indicateurs configurationnels dans les scénarios : l'accessibilité à pied à 300 m pour les réseaux modifiés règles 1 (en haut) et 5 (en bas).



Règle 3 : arbre de recouvrement minimal

Centralité d'accessibilité simplifiée à 300 m (Reach)

- a. Zoom sur Nice centre
- b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
- c. Zoom sur les collines de Nice



Règle 4 : dédensification du maillage

Centralité d'accessibilité simplifiée à 300 m (Reach)

- a. Zoom sur Nice centre
- b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
- c. Zoom sur les collines de Nice

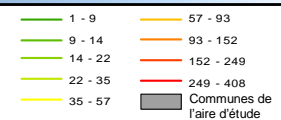
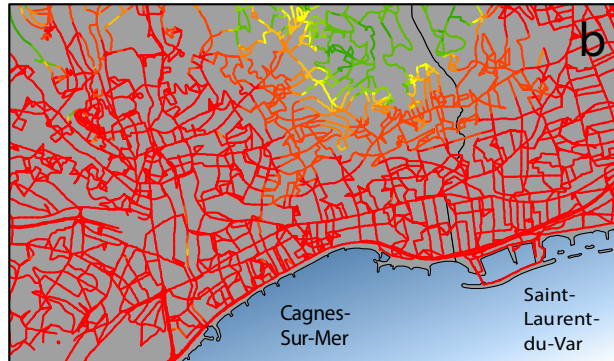
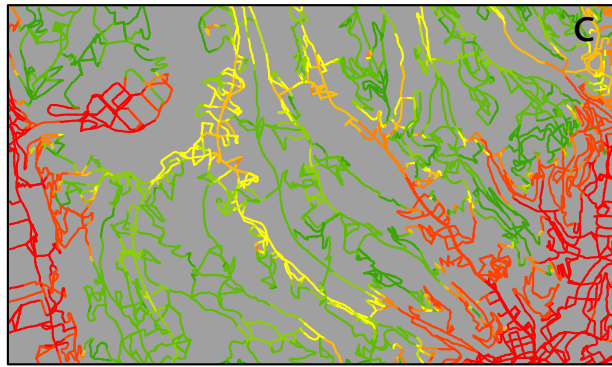


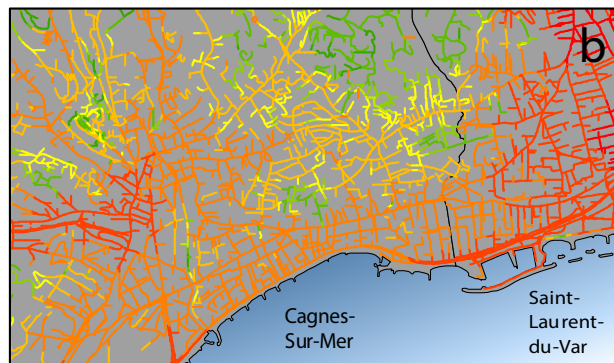
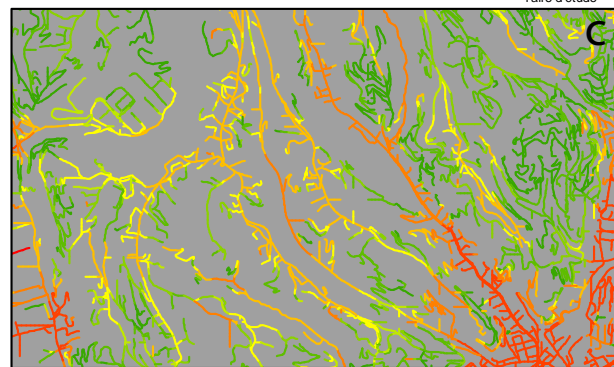
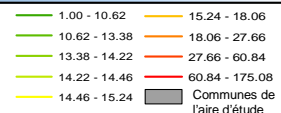
Figure 55 *Modification des indicateurs configurationnels dans les scénarios : l'accessibilité à pied à 300 m pour les réseaux modifiés règles 3 (en haut) et 4 (en bas)*



Règle numéro 1 : augmentation de la connectivité

Indice de performance
du réseau à 5 minutes
(Normalized Straightness) [km/h]

- a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice



Règle numéro 5 : croissance arborescente

Indice de performance
du réseau à 5 minutes
(Normalized Straightness) [km/h]

- a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice

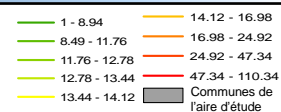
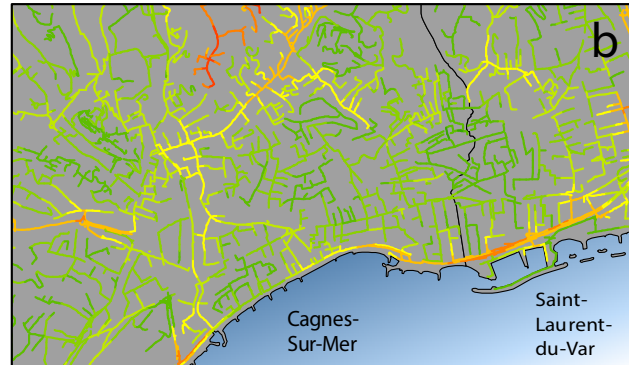
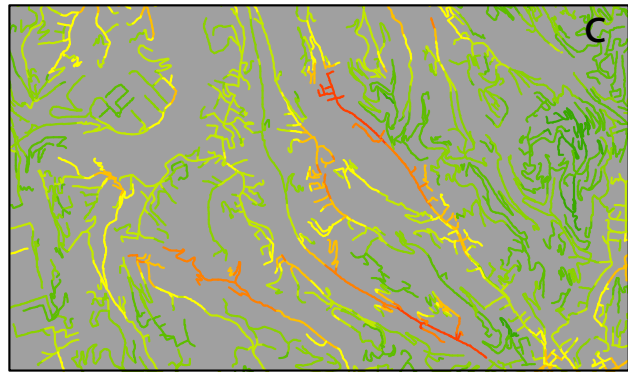


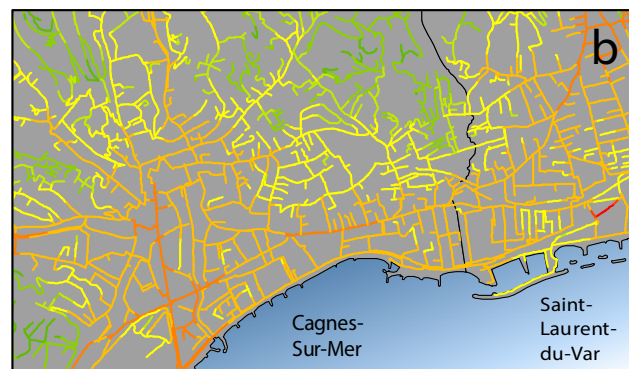
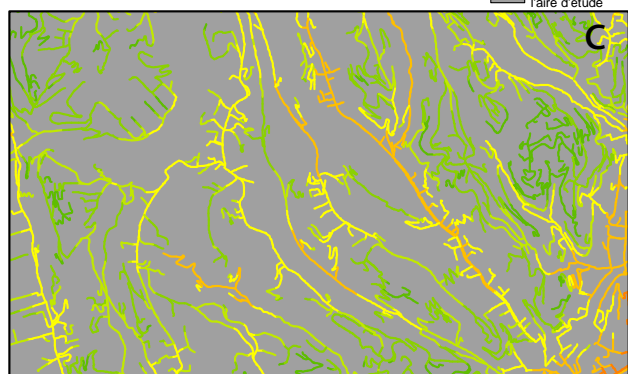
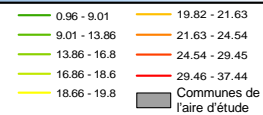
Figure 56 Modification des indicateurs configurationnels dans les scénarios : la performance des réseaux routiers à 5 minutes dans les réseaux modifiés selon les règles 1 (en haut) et 5 (en bas).



Règle 3 : arbre de recouvrement minimal

Indice de performance
du réseau à 5 minutes
(Normalized Straightness) [km/h]

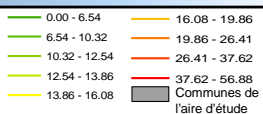
a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice



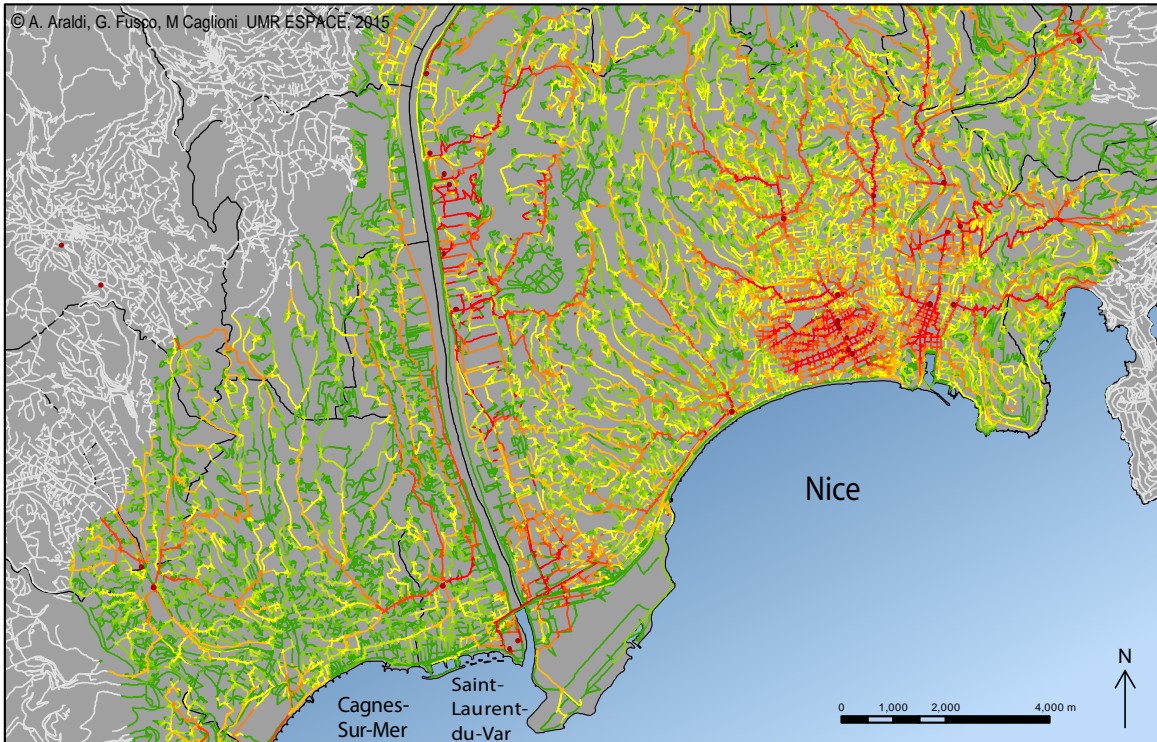
Règle 4 : dédensification du maillage

Indice de performance
du réseau à 5 minutes
(Normalized Straightness) [km/h]

a. Zoom sur Nice centre
b. Zoom sur les communes de Cagnes-Sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var
c. Zoom sur les collines de Nice

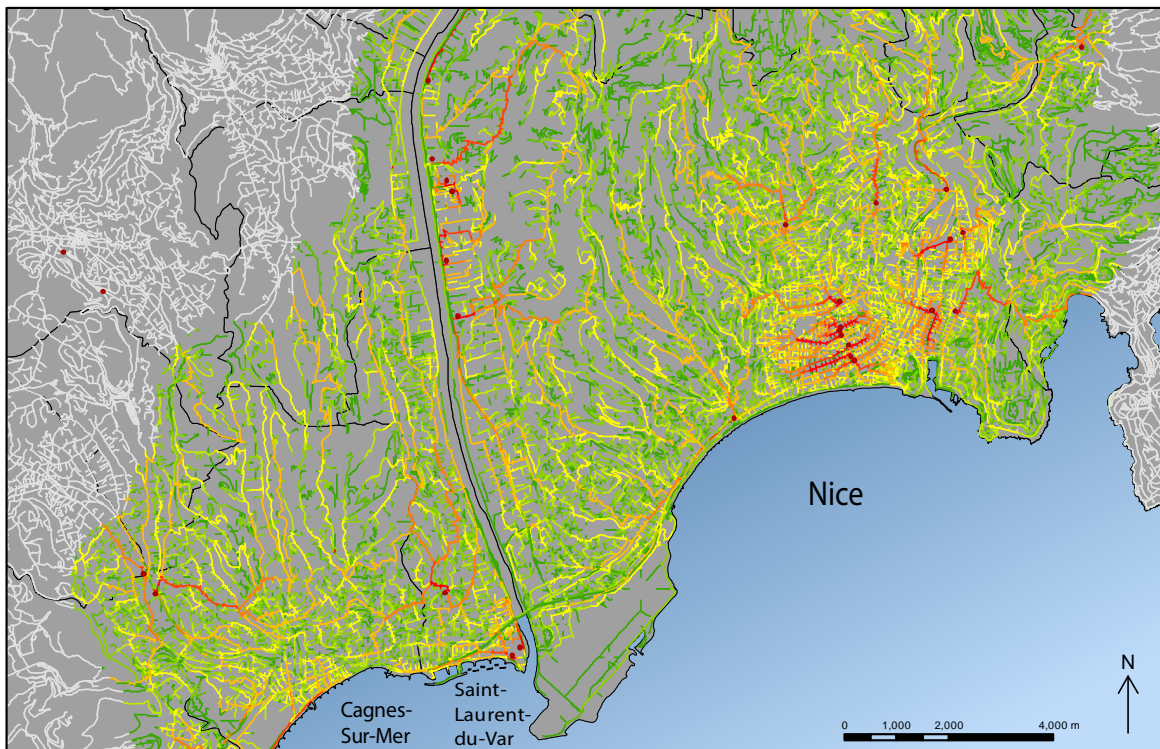
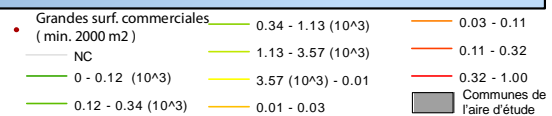


Modification des indicateurs configurationnels scénarios : la performance des réseaux routiers à 5 minutes dans les réseaux modifiés selon les règles 3 (en haut) et 4 (en bas).



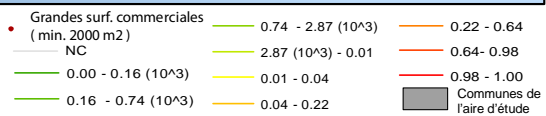
Règle 1 : augmentation de la connectivité

Betweenness générée par la présence des grandes surfaces commerciales (Normalized Betweenness)

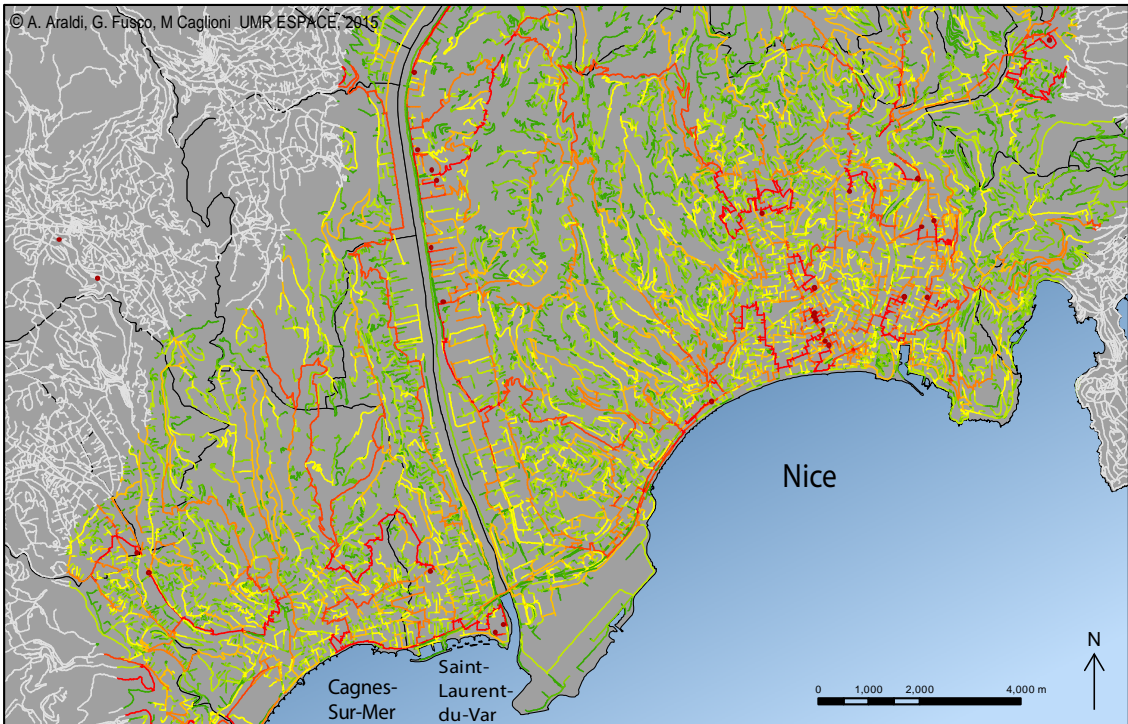


Règle 5 : croissance arborescente

Betweenness générée par la présence des grandes surfaces commerciales (Normalized Betweenness)

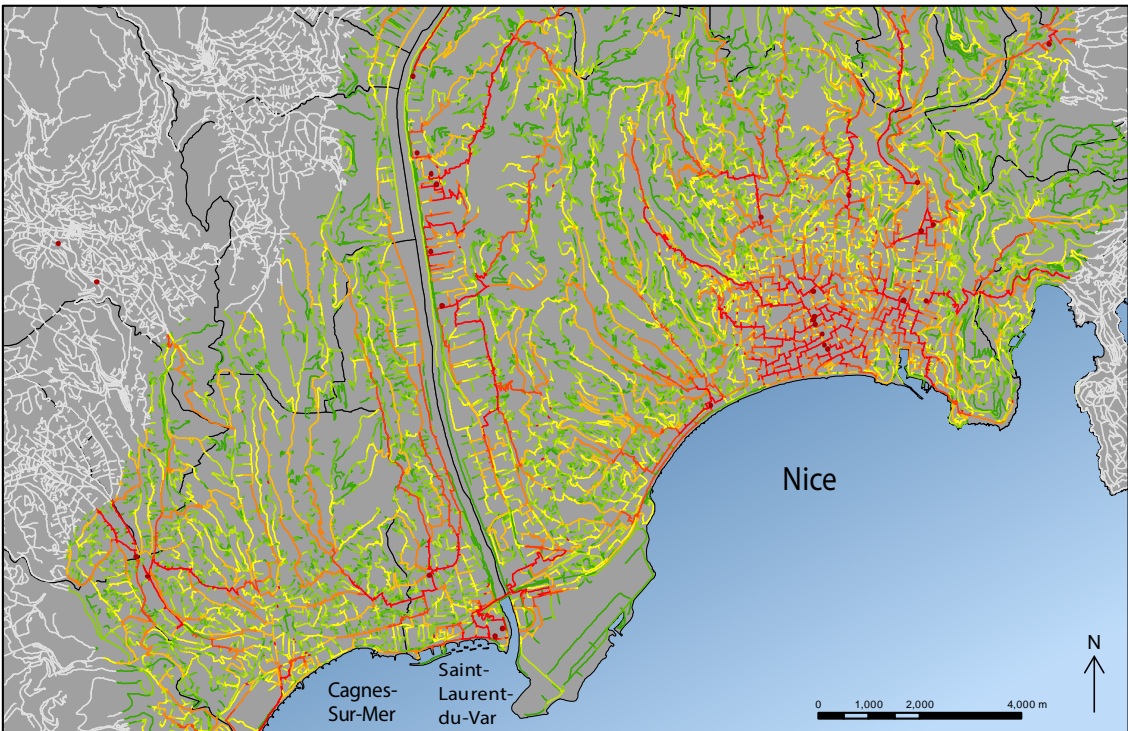
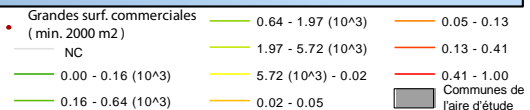


Modification des indicateurs configurationnels dans les scénarios : l'intermédiarité par rapport aux grandes surfaces commerciales dans les réseaux modifiés selon les règles 1 (en haut) et 5 (en bas).



Règle 3 : arbre de recouvrement minimal

Betweenness générée par la présence des grandes surfaces commerciales (Normalized Betweenness)



Règle 4 : désensification du maillage

Betweenness générée par la présence des grandes surfaces commerciales (Normalized Betweenness)

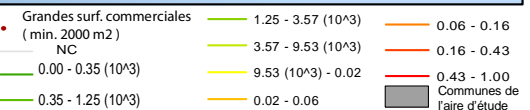


Figure 57 *Modification des indicateurs configurationnels dans les scénarios : l'intermédierité par rapport aux grandes surfaces commerciales dans les réseaux modifiés selon les règles 3 (en haut) et 4 (en bas).*

En général, les modifications des indicateurs configurationnels dans les différents scénarios peuvent être appréhendées en tant qu'externalités directes des modifications locales des réseaux. Une externalité moins directe est précisément celle sur la redistribution des potentiels commerciaux, que nous allons étudier par l'application aux nouveaux réseaux du modèle bayésien traduisant l'impact probabiliste des propriétés configurationnelles sur les densités commerciales.

Les cartes dans les Figures 62-67 spatialisent les inférences du modèle probabiliste (avec l'approche intégrant l'incertitude) pour les six différents scénarios. La figure 61, synthétise ces inférences et évalue de façon globale chaque scénario d'évolution des réseaux, dans sa capacité à favoriser le maillage commercial de l'aire d'étude. La comparaison avec l'état actuel doit se faire, de façon plus cohérente, avec le potentiel inféré par le modèle à partir du réseau actuel, et non pas avec les données empiriques des densités commerciales. Nous allons ainsi comparer un potentiel actuel avec les différents potentiels futurs, liés à chaque scénario.

Nb tronçons	État Actuel (Réel)	État Actuel (Potentiel)	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
<=0	33577	39427	58484	56514	37915	35792	45554	38782
<=0.4	7130	235	251	441	497	1224	323	242
<=1.6	4583	3020	3071	5301	1950	2930	2973	2213
<=6.4	3907	6276	12576	5117	1930	1718	6217	7529
>6.4	3156	3395	5116	3686	57	20	3487	3588
Total	52353	52353	79498	71059	42349	41684	58554	52353

% tronçons	État Actuel (Réel)	État Actuel (Potentiel)	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
<=0	64.1	75.3	73.6	79.5	89.5	85.9	77.8	74.1
<=0.4	13.6	0.4	0.3	0.6	1.2	2.9	0.6	0.5
<=1.6	8.8	5.8	3.9	7.5	4.6	7.0	5.1	4.2
<=6.4	7.5	12.0	15.8	7.2	4.6	4.1	10.6	14.4
>6.4	6.0	6.5	6.4	5.2	0.1	0.0	6.0	6.9
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Évaluation de l'impact du scénario sur le commerce	Très favorable	Favorable	Très défavorable	Défavorable	Neutre / Défavorable	Favorable

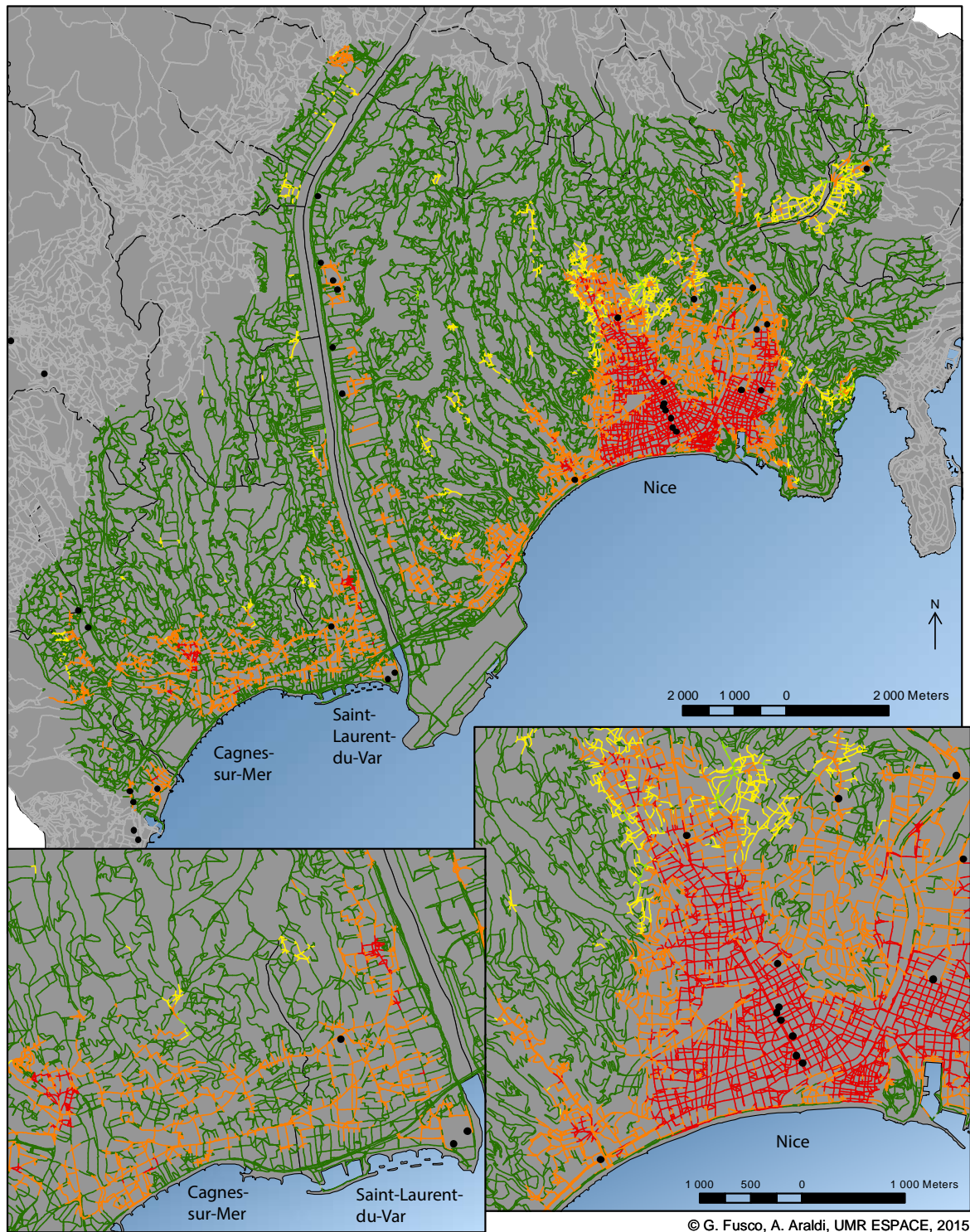
Figure 58 Synthèse de l'impact des différents scénarios de modification des réseaux sur le potentiel commercial des tronçons.

En observant les données quantitatives synthétiques et les répartitions spatiales dans l'aire d'étude, nous pouvons parvenir aux conclusions suivantes :

L'augmentation de la connectivité et la diminution corrélative du caractère arborescent du réseau viaire, déroulant de la Règle 1 (Figure 62) agissent prioritairement sur tous les tronçons précédemment attribués aux classes de densité commerciale 2, 3 et 4, ainsi que sur les tronçons contigus, pour augmenter leurs valeurs de classe de densité commerciale. L'augmentation de la connectivité est beaucoup plus bénéfique aux abords des tissus urbains traditionnels que dans le système collinaire, où les configurations actuelles sont tellement

défavorables que même le rajout des nouvelles connexions n'est pas susceptible de changer les opportunités commerciales. Dans les espaces plus densément urbanisés, à l'exception de quelques tronçons sur le littoral de Saint-Laurent-du-Var et de Cagnes-sur-Mer, où la *Reach* diminue par redistribution des points bâtis sur les nouveaux tronçons, le scénario 1 porte à une augmentation généralisée des densités commerciales et à une diminution des tronçons à potentiel commercial nul.

- Le scénario 2 aussi (Figure 63) est très favorable à l'augmentation de la densité commerciale dans l'aire d'étude, mais avec une intensité moindre. Les modifications les plus importantes de la règle 2 s'observent en effet dans le système collinaire, où la relative amélioration des configurations n'est pas suffisante à créer du potentiel commercial. Dans les espaces plus urbanisés, les potentiels commerciaux s'améliorent de façon globale, mais peuvent aussi parfois diminuer, comme c'est le cas dans la zone littorale entre Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer. L'influence des espaces plus densément urbanisés s'élargit spatialement sur leurs abords, qui se maillent plus finement, ce qui entraîne une augmentation des classes 2 et surtout 3 du potentiel commercial.
- Les scénarios 3 et 4 (Figures 64 et 65) sont très défavorables au potentiel commercial de petites et moyennes surfaces. Elles produisent une réduction spatiale généralisée des classes à haut et très haut potentiel commercial. Même dans les espaces centraux de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer, précédemment caractérisés par un fort potentiel commercial, généralisé à l'ensemble des tronçons de ces secteurs, les opportunités de commerce se limitent désormais aux axes principaux de l'arborescence (scénario 3) ou du maillage (scénario 4). Dans le scénario 3, ces axes sont un peu plus fréquents dans le centre niçois, mais peuvent être repérés en mesure moindre même à Cagnes et à Saint-Laurent. L'ensemble du maillage commercial se trouve néanmoins fortement appauvri. Le scénario 4 est relativement moins négatif pour le maillage commercial du centre niçois, mais aboutit à une forte pénalisation du potentiel commercial dans les espaces centraux et littoraux de Cagnes et Saint-Laurent. On peut imaginer que, dans ces deux scénarios, le potentiel commercial perdu par le tissu viaire, et non plus disponible pour les petites et moyennes surfaces, se traduit en des parts de marché plus importantes pour les grandes surfaces et que, éventuellement, des opportunités commerciales résiduelles pour le petit et moyen commerce se développeraient à proximité de nouvelles locomotives commerciales.
- Le scénario 5, découlant de la règle d'extension du réseau par poursuite de la croissance arborescente, ne modifie pas la distribution du potentiel commercial à un niveau qualitatif (Figure 66). Il produit une petite inversion de valeurs entre les classes 2 et 3 au nord et au centre de Nice ainsi que sur le littoral de Cagnes-sur-Mer. On observe également une toute petite augmentation de tronçons à très haut potentiel commercial (une petite centaine de plus par rapport à la situation de référence), mais surtout la prolifération de nouveaux tronçons à potentiel commercial nul. La presque totalité de la croissance quantitative du réseau concerne en effet des tronçons branchés de façon arborescente dans des espaces souvent périphériques, qui ne possèdent pas les caractéristiques configurationnelles propices au développement du commerce.



© G. Fusco, A. Araldi, UMR ESPACE, 2015

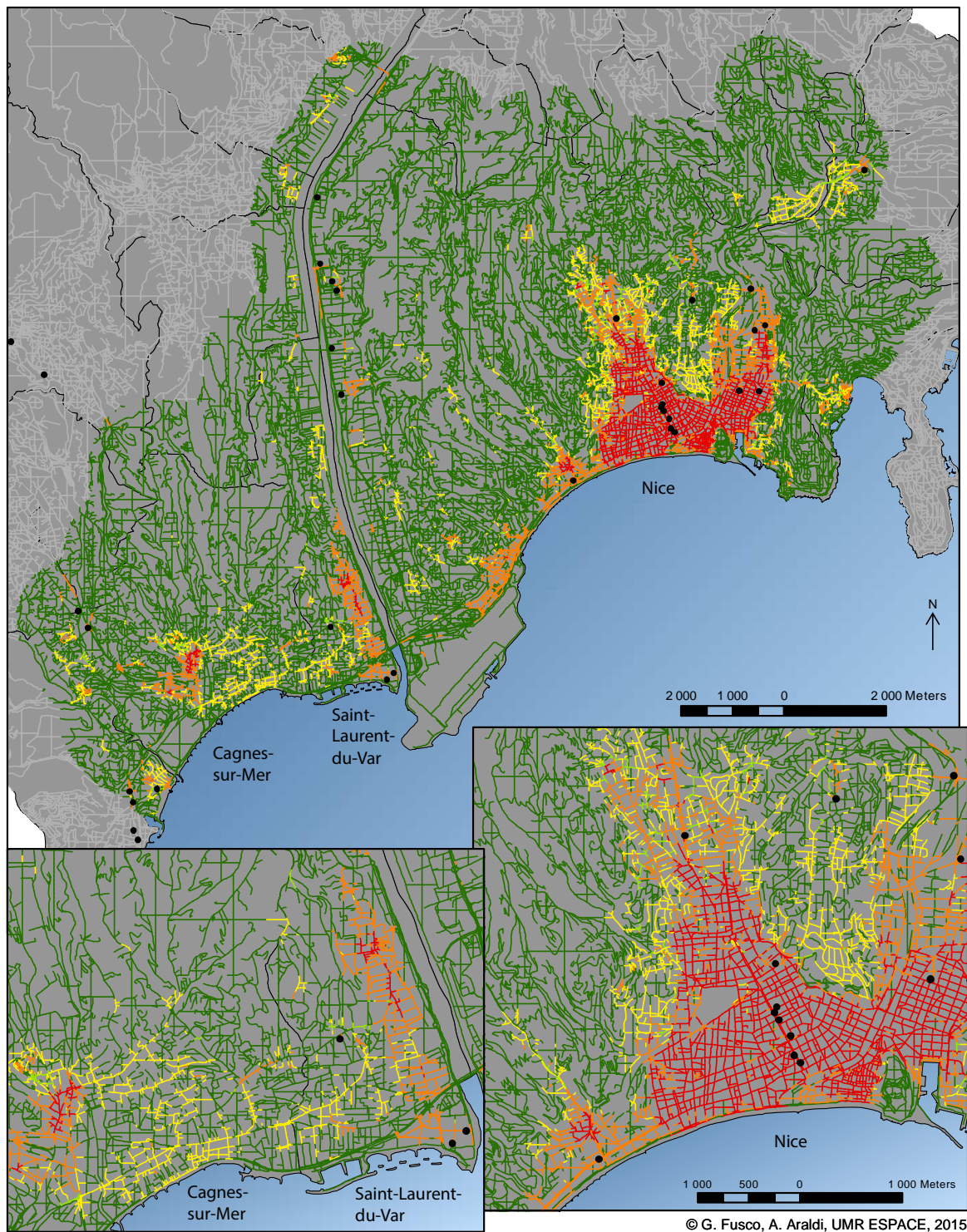
Scénario 1 : classes de densité commerciale suite à une augmentation de la connectivité du réseau
 (DK = densité de Kernel)

- 1 (DK = 0)
 - 2 (0 < DK ≤ 0,4)
 - 3 (0,4 < DK ≤ 1,6)
- 4 (1,6 < DK ≤ 6,4)
 - 5 (DK > 6,4)
 - N.C.

- Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)
- Communes de l'aire d'étude

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 59 Distributions des classes de densité commerciale potentielle dans le scénario n° 1



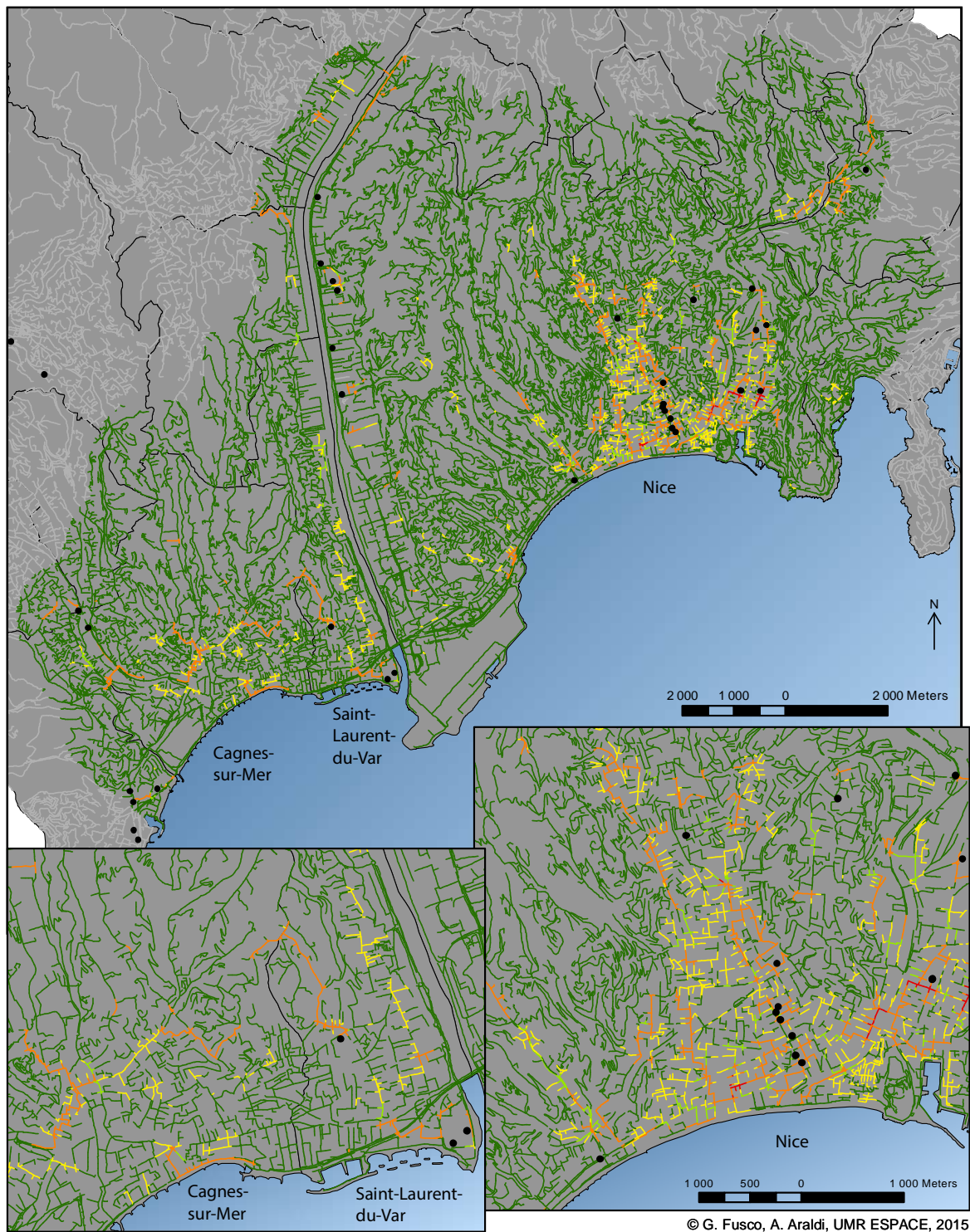
© G. Fusco, A. Araldi, UMR ESPACE, 2015

Scénario 2 : classes de densité commerciale suite à une augmentation du maillage du réseau
(DK = densité de Kernel)

- 1 (DK = 0)
 - 2 (0 < DK ≤ 0,4)
 - 3 (0,4 < DK ≤ 1,6)
- 4 (1,6 < DK ≤ 6,4)
 - 5 (DK > 6,4)
 - N.C.
- Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)
 - Communes de l'aire d'étude

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 60 Distributions des classes de densité commerciale potentielle dans le scénario n° 2

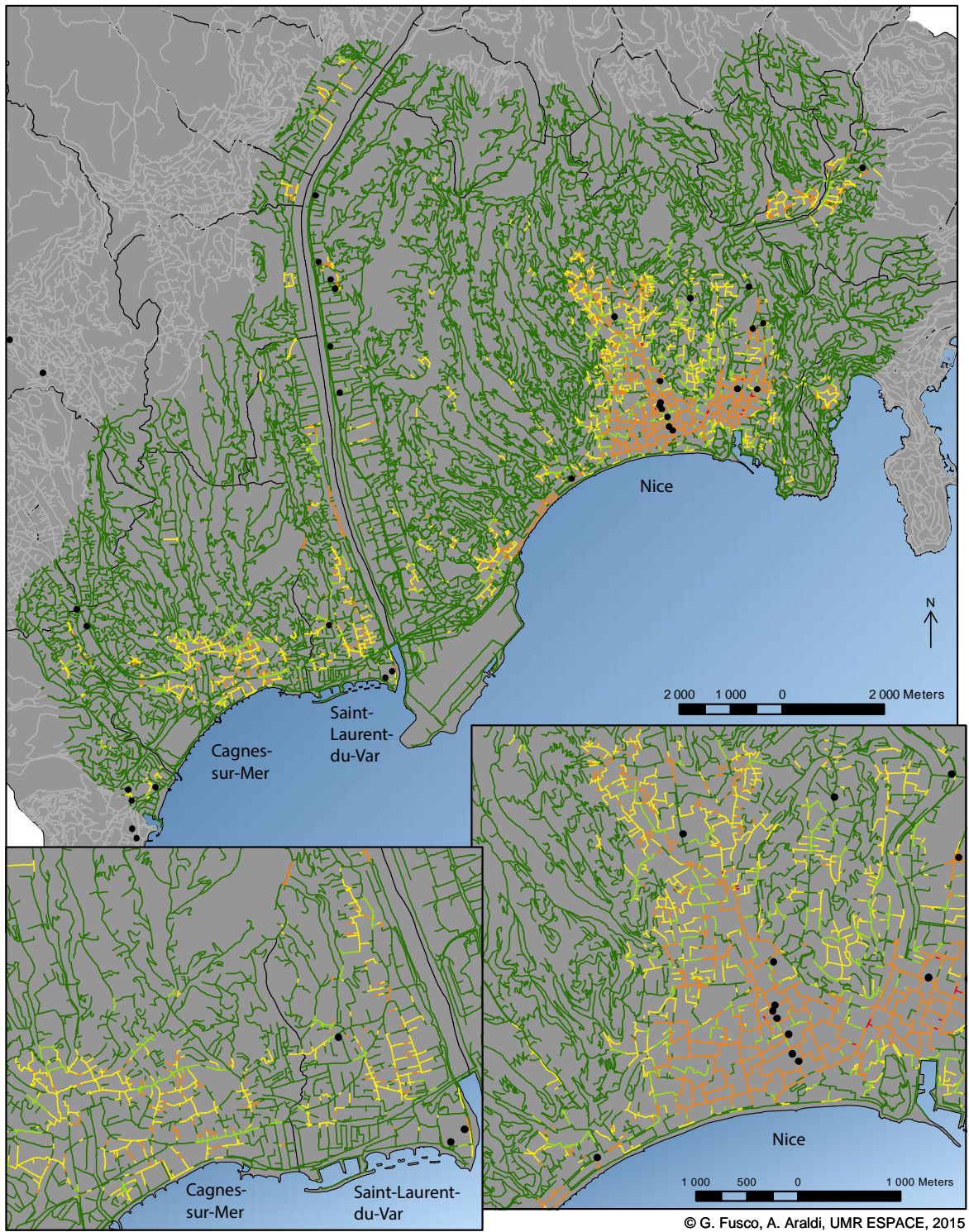


Scénario 3 : classes de densité commerciale suite à une réduction à l'arbre de recouvrement minimal
(DK = densité de Kernel)

- | | | |
|----------------------|----------------------|---|
| — 1 (DK = 0) | — 4 (1,6 < DK ≤ 6,4) | • Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m ²) |
| — 2 (0 < DK ≤ 0,4) | — 5 (DK > 6,4) | ■ Communes de l'aire d'étude |
| — 3 (0,4 < DK ≤ 1,6) | — N.C. | |

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 61 Distributions des classes de densité commerciale potentielle dans le scénario n° 3.



Scénario 4 : classes de densité commerciale suite à une diminution du maillage du réseau
(DK = densité de Kernel)

1 (DK = 0)

2 (0 < DK ≤ 0,4)

3 (0,4 < DK ≤ 1,6)

4 (1,6 < DK ≤ 6,4)

5 (DK > 6,4)

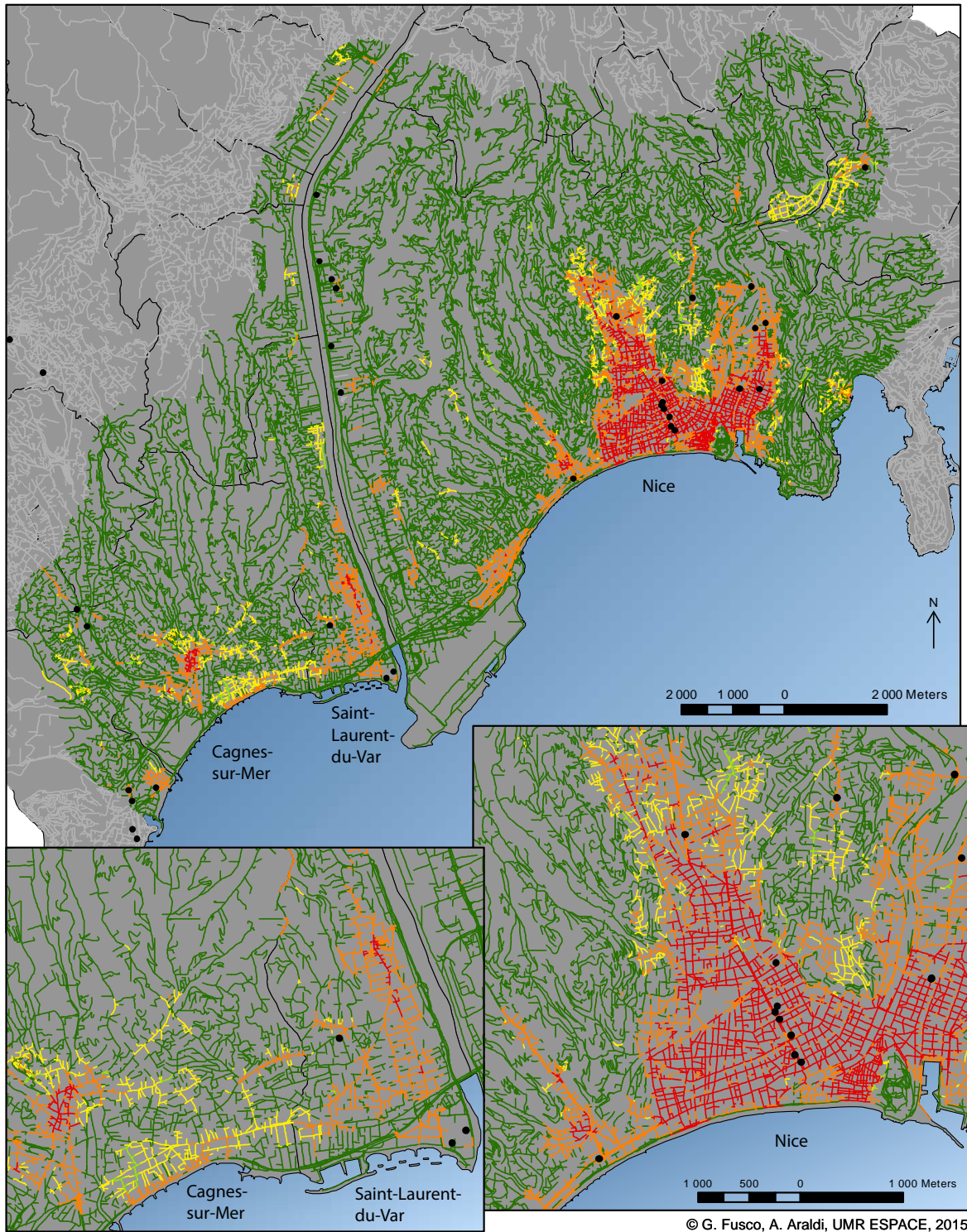
N.C.

• Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)

■ Communes de l'aire d'étude

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 62 Distributions des classes de densité commerciale potentielle dans le scénario n° 4.



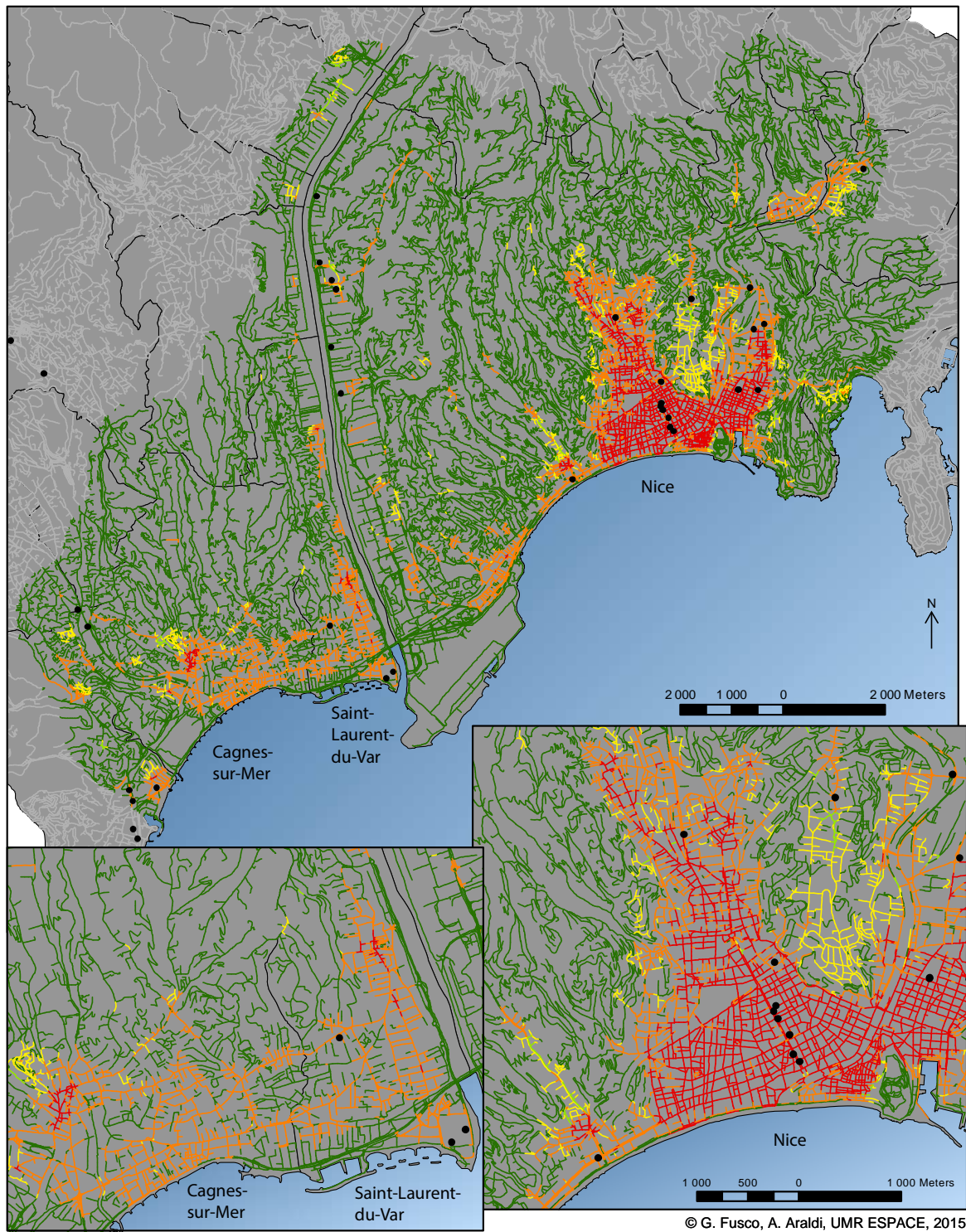
© G. Fusco, A. Araldi, UMR ESPACE, 2015

Scénario 5 : classes de densité commerciale suite à une augmentation de l'arborescence du réseau
 (DK = densité de Kernel)

<ul style="list-style-type: none"> — 1 (DK = 0) — 2 (0 < DK ≤ 0,4) — 3 (0,4 < DK ≤ 1,6) 	<ul style="list-style-type: none"> — 4 (1,6 < DK ≤ 6,4) — 5 (DK > 6,4) — N.C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²) ■ Communes de l'aire d'étude
--	--	---

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 63 Distributions des classes de densité commerciale potentielle dans le scénario n° 5



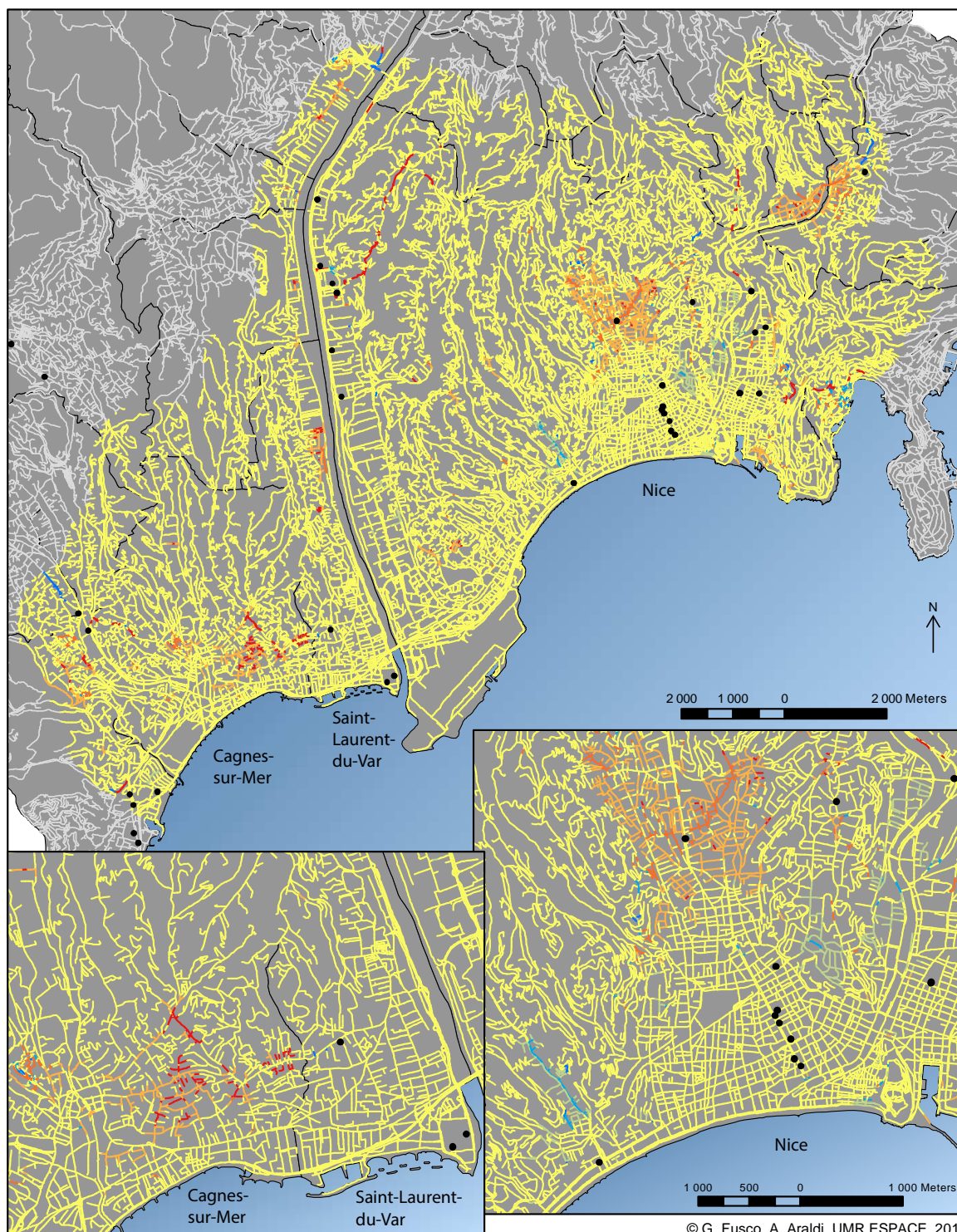
© G. Fusco, A. Araldi, UMR ESPACE, 2015

Scénario 6 : classes de densité commerciale suite à une homogénéisation des vitesses du réseau
(DK = densité de Kernel)

- | | | |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> — 1 (DK = 0) — 2 (0 < DK ≤ 0,4) — 3 (0,4 < DK ≤ 1,6) | <ul style="list-style-type: none"> — 4 (1,6 < DK ≤ 6,4) — 5 (DK > 6,4) — N.C. | <ul style="list-style-type: none"> • Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²) ■ Communes de l'aire d'étude |
|--|--|---|

Sorties du modèle utilisées : classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$); espérance mathématique ($p < 0,4$)

Figure 64 Distributions des classes de densité commerciale potentielle dans le scénario n° 6



© G. Fusco, A. Araldi, UMR ESPACE, 2015

Evolution des densités commerciales potentielles selon le modèle, entre la situation actuelle et le Scénario 6 (homogénéisation des vitesses)
 (écarts de classes de densité commerciale)
 Sorties du modèle utilisées :
 - classe de densité la plus probable ($p \geq 0,4$)
 - espérance mathématique ($p < 0,4$)

-
 -4
-
 -3
-
 -2
-
 -1
-
 0
-
 1
-
 2
-
 3
-
 4
-
 N.C.

- Grandes surfaces commerciales (min. 2000 m²)
- Communes de l'aire d'étude

Source réseau : BD TOPO IGN

Figure 65 *Évolution des classes de densité commerciale potentielle dans le cadre du scénario 6*

- Finalement, le scénario 6, où le réseau n'évolue pas quantitativement, mais seulement par rapport aux vitesses automobiles, génère une augmentation des densités commerciales de classe 4 et 5. Cette augmentation dérive de la seule variation de la performance du réseau routier et provoque également des petites redistributions spatiales des potentiels commerciaux. L'absence d'évolution des réseaux nous permet en effet de cartographier la variation de classe de densité des tronçons du réseau actuel (Figure 68). La carte montre une réduction modérée du potentiel commercial à proximité immédiate des échangeurs de la voie rapide urbaine niçoise (en bas de la Madeleine ou à Cimiez). Le potentiel commercial augmente en revanche, et de façon beaucoup plus importante, dans les zones relativement bien maillées de Nice-nord, de l'Ariane et de l'espace entre les centres de Cagnes et Saint-Laurent, relativement proches aux échangeurs autoroutiers. L'homogénéisation des vitesses comporte une réduction spatiale des chemins minimaux : ceux-ci deviennent davantage des parcours locaux, dans un environnement maillé, et moins des chemins empruntant l'autoroute vers des espaces plus éloignés. Ces espaces font alors l'expérience d'une réduction relative de la performance du réseau, en présence de bonnes valeurs d'accessibilité locale piétonne, et évoluent vers des configurations typiques des espaces de centre-ville, très propices à l'activité commerciale.

En synthétisant les résultats de l'ensemble des scénarios, la connectivité des réseaux joue un rôle fondamental pour la localisation des petits et moyens commerces, comme déjà constaté de façon empirique et qualitative par J. Jacobs (1960) dans le cas des grandes villes américaines. La réduction de la connectivité influence très négativement le potentiel commercial de la voirie (scénarios 3 et 4). Son augmentation, par la densification du maillage (scénario 2) et encore plus par l'élimination des arborescences locales (scénario 1) est susceptible d'augmenter considérablement le potentiel commercial dans les espaces centraux, péricentraux et de première périphérie ; à l'exception du système collinaire, on se rapprocherait ainsi beaucoup d'une ville aux faibles distances susceptible de conjuguer forte accessibilité et faible mobilité automobile, ce qui était l'objectif premier du projet DAMA. L'augmentation du potentiel commercial d'un certain nombre de quartiers de première périphérie, aux configurations viaires déjà bien maillées, peut être atteinte également par simple homogénéisation des vitesses du réseau routier, comme le montre le scénario 6. Il s'agit d'améliorations spatialement circonscrites, mais que l'on peut obtenir sans grande difficulté en ce qui concerne la modification des réseaux.

3.4. Conclusion

De façon générale, les recherches conduites ont proposée des méthodologies novatrices pour l'étude de la relation entre localisations commerciales et morphologie urbaine. Cette méthodologie a intégré une approche rigoureusement réticulaire à l'analyse de la configuration de la voirie et à la localisation des commerces et une modélisation probabiliste par l'approche des réseaux bayésiens. Elle s'est ensuite poursuivie par des scénarios d'évolution des réseaux, permettant d'explorer les impacts les plus probables sur le tissu commercial. Appliquées au cas d'étude de l'agglomération niçoise, ces analyses ont permis d'identifier la meilleure capacité du réseau maillé de la fin du XIX et du début du XX siècle à catalyser l'activité commerciale. Les opérations visant à mieux mailler l'espace urbain et à

augmenter sa connectivité par une « re-couture » des petites arborescences, sont susceptibles d'augmenter considérablement le potentiel commercial de la voirie de l'aire d'étude. A contrario, la dédensification du maillage et sa réduction à une grande arborescence, risquent de faire disparaître une bonne partie du potentiel commercial actuel. La relation entre morphologie des réseaux et localisation des commerces passe en tout cas par la prise en compte d'échelles emboîtées (micro-échelle des interactions locales et méso-échelle du secteur urbain) et des effets combinés des logiques piétonnes et automobiles ainsi que des effets liés à la présence des grandes surfaces commerciales.

Pour les scientifiques, les analyses conduites ouvrent la voie à de nouvelles pistes pour la compréhension du lien entre forme urbaine et commerce, tout en confirmant les grandes hypothèses à la base des recherches déjà effectuées sur le sujet (Cutini 2001, Porta et al. 2007, 2009). Pour les urbanistes et les acteurs de l'aménagement de la voirie urbaine, la présente recherche permet de prendre conscience du rôle essentiel joué par la forme urbaine dans la régulation des mobilités et, indirectement, dans la création d'un potentiel pour les petits et moyens commerces. En intervenant sur la forme du réseau de voirie (et éventuellement sur ses vitesses), il est possible de créer ou de détruire des conditions de réussite de l'activité commerciale. On peut alors entrevoir la possibilité de politiques visant à créer le potentiel d'un renouveau commercial dans les quartiers périphériques qui aujourd'hui pâttissent d'un véritable délitement de leur tissu commercial. Le renforcement de l'offre commerciale de proximité nous semble à la fois un objectif urbanistique en soi (pour sa capacité à catalyser le lien social et à contribuer à l'urbanité des espaces publics) et un objectif de politique environnementale (réduction de la consommation énergétique et des émissions). C'est en effet par cet urbanisme des courtes distances que les alternatives modales à l'automobile (et en premier chef les modes doux) pourront s'épanouir et permettre une forte accessibilité sans mobilité automobile. Les recherches conduites ouvrent également la voie à des applications en faveur des acteurs du commerce, notamment dans l'aide à la décision pour la localisation des surfaces de vente.

De façon plus détaillée, ces recherches permettent un certain nombre de considérations sur les méthodologies d'analyse des réseaux urbains. Même si plusieurs indicateurs configurationnels ici utilisés avaient été originellement développés pour l'analyse de la topologie des réseaux sociaux, les réseaux urbains (routes, rues) ont une géométrie, outre qu'une topologie : ils s'inscrivent dans l'espace topographique (avec ses contraintes orographiques et hydrographiques) et ont une longueur, un circuité géométrique et une vitesse de déplacement maximal qui permettent de calculer l'impédance spatio-temporelle au mouvement. Implémentée sur une plateforme SIG, l'analyse de centralité multiple (MCA) peut intégrer cette dimension géométrique et topographique des réseaux et fait cela d'une manière différente de l'approche de la Space Syntax, qui privilégie les relations de visibilité entre les éléments du réseau.

Les topologies des réseaux de voirie urbaine sont limitées : on ne retrouve pas de graphe sans échelle ou de graphe petit monde, identifiés en revanche dans les réseaux sociaux. L'univers du possible reste néanmoins large, comme le montrent les différences importantes de connectivité, de maillage ou d'arborescence entre les tissus urbains traditionnels (plus ou moins réguliers et planifiés) et les morphologies produites au cours des cinquante dernières années. Les évolutions récentes parmi ces possibles constituent de véritables enjeux urbanistiques.

Nous pouvons également identifier plusieurs perspectives de développement pour les recherches conduites. Il est ainsi envisageable de faire converger les approches de modélisation MCA et celles de la Space Syntax dans l'analyse des configurations des réseaux urbains. L'approche MAPPA (Mark Point Parameter Analysis, Cutini 2010) semble ainsi capable de développer des analyses purement topologiques (comme la Space Syntax), mais sur des topologies qui intègrent l'essentiel des caractéristiques géométriques des réseaux. D'autres approches peuvent également être explorées pour la recherche de règles liant les caractéristiques configurationnelles aux localisations commerciales. Les réseaux bayésiens ont l'avantage indéniable de l'exploration de relations statistiques non paramétriques et de l'intégration de l'incertitude probabiliste dans les relations trouvées. D'autres formalismes sont néanmoins disponibles, comme les réseaux de neurones (Fausett 1994) pour identifier les relations et/ou les approches possibilistes (Dubois et Prade 1985, 2001) et floue (Zadeh 1965, De Ruffray 2007) pour formaliser leur incertitude.

De façon plus spécifique, la relation entre configurations des réseaux et localisations commerciales pourrait être approfondie pour chaque famille de commerces, ce qui permettrait d'identifier les caractéristiques configurationnelles les plus intéressantes, par exemple, pour l'hôtellerie /restauration plutôt que pour le commerce alimentaire ou celui d'équipement de la personne. De même, les réseaux urbains pourraient être modélisés de façon plus réaliste. En ce qui concerne le mouvement piéton, il faudrait intégrer le rôle des transports en commun (et notamment des TCSP) en tant qu'accélérateurs du mouvement piéton dans la ville : voirie, lignes et arrêts des TCSP devraient ainsi être intégrés dans un seul réseau à impédance spatio-temporelle. Le mouvement automobile devrait en revanche intégrer l'offre de stationnement et être modélisé par le biais d'un réseau intégrant arcs et points de stockage. Du point de vue géographique, l'analyse pourrait être menée à la fois sur des espaces plus restreints et sur de nouveaux cas d'étude. Dans la première perspective, on pourrait identifier des sous-espaces morphologiquement plus homogènes au sein d'une agglomération, pour comprendre quelles caractéristiques configurationnelles sont les plus discriminantes dans un espace central relativement bien maillé ou dans un espace plus périphérique au maillage plus lâche et aux configurations arborescentes. La perspective d'investir de nouveaux terrains est en revanche liée au besoin de monter en généralité par l'identification de régularités dans une approche comparative. La reproductibilité de la démarche de notre recherche (y compris en termes de données mobilisées) permet ainsi d'envisager des analyses similaires sur d'autres agglomérations françaises, qui aboutiraient à une mise en perspectives des résultats trouvés pour le cas niçois.

Bilan

Une nouvelle méthodologie a été mise au point pour étudier la relation entre localisations commerciales et morphologie urbaine. Elle intègre une approche rigoureusement réticulaire à l'analyse de la configuration de la voirie et à la localisation des commerces et une modélisation probabiliste par l'approche des réseaux bayésiens.

La relation entre morphologie des réseaux et localisation des commerces est le fait d'échelles emboîtées (micro-échelle des interactions locales et méso-échelle du secteur urbain) et des effets combinés des logiques piétonnes et automobiles ainsi que des effets de la présence des grandes surfaces commerciales. Appliquée au cas d'étude de l'agglomération niçoise, l'analyse a permis d'identifier la meilleure capacité du réseau maillé traditionnel à catalyser l'activité commerciale.

Des scénarios d'évolution des réseaux ont ensuite permis d'explorer les impacts les plus probables sur le tissu commercial. Les opérations visant à mieux mailler l'espace urbain et à augmenter sa connectivité, peuvent augmenter considérablement le potentiel commercial de la voirie de l'aire d'étude. A contrario, la dédensification du maillage et sa réduction à une grande arborescence risquent de faire disparaître une bonne partie du potentiel commercial actuel.

Cette recherche montre aux urbanistes et aux gestionnaires de la voirie le rôle essentiel joué par la forme urbaine dans la création d'un potentiel commercial et, indirectement, dans la régulation des mobilités. En intervenant sur la forme du réseau de voirie (et éventuellement sur ses vitesses), il est possible de créer ou de détruire les conditions de réussite de l'activité commerciale. Nos méthodes permettront ainsi d'accompagner des politiques visant à créer le potentiel d'un renouveau commercial dans les quartiers périphériques, qui aujourd'hui pâtissent d'un véritable délitement de leur tissu commercial. Le renforcement de l'offre commerciale de proximité est un élément essentiel d'un urbanisme des courtes distances permettant une forte accessibilité sans recourir à la mobilité automobile.

Les recherches conduites ouvrent également la voie à des applications en faveur des acteurs du commerce, notamment dans l'aide à la décision pour la localisation des surfaces de vente.

La méthodologie ici proposée est finalement susceptible d'importants développements pour augmenter le réalisme de la modélisation des réseaux et le pouvoir prédictif des analyses.

3.5. Bibliographie

- Adolphson M., 2010, Kernel densities and mixed functionality in a multicentred urban region, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(3), 550-566.
- Anselin L., Bera A., 1998, Spatial Dependence in Linear Regression Models with an Introduction to Spatial Econometrics, in Giles D., Ulah A. (Eds.), *Handbook of Applied Economic Statistics*, New York: Marcel Dekker.
- Bayesia, 2009, *BayesiaLab Documentation*, version 4.6, Laval, Bayesia, 339 p.
- Boquet Y., Desse R.-P. (dir.), 2010, *Commerce et mobilité*, Dijon : Editions Universitaires de Dijon
- Brunsdon, C., 1995, Estimating probability surfaces for geographical points data: an adaptive kernel algorithm, *Computers and Geosciences*, 21, 877–894.
- Brunsdon C., et al., 2002, Geographically weighted summary statistics — a framework for localised exploratory data analysis, *Computers, Environnement and Urban Systems*, 26 (2002) 501–524.
- Cao R., Cuevas A., Gonzalez W., 1994, A comparative study of several smoothing methods in density estimation, *Computational Statistic & Data Analysis*, 17/2, pp. 153-176.
- Charmes E. (2011) *La ville émiettée. Essai sur la cllubisation de llla vie urbaine*, Paris, PUF.
- Cutini V., 2001, Centrality and Land Use: Three Case Studies on the Configurational Hypothesis, *Cybergeo*, *Revue Européenne de Géographie*, num. 188, <http://cybergeo.revues.org/3936>
- Cutini V., 2010, *La rivincita dello spazio urbano. L'approccio configurazionale allo studio e all'analisi dei centri abitati*, Pise : Pisa University Press
- Dalton R., Bafna S., 2003, The syntactical image of the city:a reciprocal definition of spatial elements and spatial syntaxes. In: *4th International Space Syntax Symposium*, 17 June 2003 - 19 June 2003, London, ht tp://nrl.northumbria.ac.uk/3909
- De Rufrray S., 2007, *L'Imprécision et l'Incertitude en géographie. L'Apport de la logique floue aux problématiques de régionalisation*, Université Paris Diderot-Paris 7, mémoire d'habilitation à diriger des recherches
- Dorier E., Berry-Chikhaoui I, Bridier S., 2012, Fermeture résidentielle et politiques urbaines, le cas marseillais, *Articulo - Journal of Urban Research*, 8(2012), <http://articulo.revues.org/1973>
- Drudzel M., Simon H., 1993, *Causality in Bayesian Belief Networks*, in *Proceedings of the Ninth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-93)*, San Francisco, Morgan Kaufmann, 3-11.

- Dubois D., Prade H., 1985, *Théorie des Possibilités. Applications à la Représentation des Connaissances en Informatique*, Masson
- Dubois D., Prade H., 2001, Possibility Theory, Probability Theory and Multiple-valued Logics: A Clarification, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 32, p. 35–66,
- Epanechnikov V. A., 1969, On some global measures of the deviations of density function estimates, *Ann.Statist.*, 1, pp.1071-1095.
- Fausett L., 1994, *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, algorithms, and applications*. New Jersey: Prentice Hall, 469 p.
- Fotheringham A. S. et al., 2000, *Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationship*, Wiley, Chichester, England, 2002, pp. 1-25.
- Fotheringham A. S. et al., 2000, *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*, SAGE Publications Ltd, Londra, pp. 130-161.
- Freeman L., 1977, A set of measures of centrality based on Betweenness, *Sociometry*, 40, pp. 35-41.
- Freeman L., 1979, Centrality in social networks: conceptual clarification, *Social Networks*, 1.
- Freeman L., 2004, *The Development of Social Network Analysis: A Study in the Sociology of Science*. Vancouver, BC: Empirical Press.
- Fusco G., 2004, « Looking for Sustainable Urban Mobility through Bayesian Networks », *Scienze Regionali / Italian Journal of Regional Sciences*, n° 3/2003, pp. 87-106 et *Cybergeog*, n° 292, <http://cybergeog.revues.org/2777>, 22 p.
- Fusco G., 2005, « L'interazione trasporti-territorio a Genova e in Costa Azzurra: nuove applicazioni delle reti bayesiane », in *Silvia Occelli et Aurelio Bruzzo (dir.)*, *Le relazioni tra conoscenza ed innovazione nello sviluppo dei territori*, Collana Scienze Regionali vol 37, Milano, Franco Angeli, pp. 287-311
- Fusco G., 2008, Spatial Dynamics in the Coastal Region of South-Eastern France, in *O. Pourret, P. Naim. B.G. Marcot (Eds.)*, *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications*, New York, John Wiley & Sons, p. 87-112
- Fusco G., 2010, Uncertainty in Interaction Modelling: Prospecting the Evolution of Urban Network in South-Eastern France, in H. Prade, R. Jeansoulin, O. Papini, S. Schockaert (Eds.) *Methods for Handling Imperfect Spatial Information*, Berlin, Springer, p. 357-378
- Fusco G., 2012, Démarche géo-prospective et modélisation causale probabiliste, *Cybergéo*, n° 613, <http://cybergeog.revues.org/25423>, 23 p.
- Genre-Grandpierre C., 2007, Des «réseaux lents» contre la dépendance automobile? Concept et implications en milieu urbain, *L'Espace géographique*, 36, pp. 27-39.
- Graff P., 2000, *L'exception Urbaine. Nice: de la renaissance au Consiglio d'Ornato*, Marseille, Parenthèses
- Graff P., 2014, *Une ville d'exception. Nice, dans l'effervescence du 20^e siècle*, Nice, Serre
- Hillier B., 1996, *Space is the machine: A configurational Theory of Architecture*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Hillier B. et al., 1993, Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement, *Environmental and Planning B: Planning and design*, 20, pp.29-66.
- Hirtle S., Jonides J., 1985, Evidence of hierarchies in cognitive maps, *Memory and Cognition*, 13 (3), pp. 208-217.
- Hotelling H., 1929, Stability in competition, *The Economic Journal*, 39, pp. 41-57.
- Jacobs J., 1960, *The Death and Life of Great American Cities*, New York, Vintage
- Jensen F.V., 2001, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York, Springer, 284 p.
- Jiang B., Liu X., 2011, Computing the fewest-turn map directions based on the connectivity of naturalroads, *International Journal of Geographical Information Science*, 25/7, pp.295-309.
- Jourdan G., 2011, *Le chronoaménagement*, Formation ENPC – le 16 novembre 2011, Agence d’Urbanisme de Grenoble, Note N°11-221
- Katz L., 1953, A new status index derived from sociometric index, *Psychometrika*, pp.39-43.
- Korb K.B., Nicholson A.E., 2004, *Bayesian Artificial Intelligence*, Boca Raton, FA, Chapman & Hall / CRC, 364 p.
- Navez Bouchanine, F. (dir.), 2002, *La fragmentation en question : des villes entre fragmentation spatiale et fragmentation sociale*, Paris, L’Harmattan (coll. villes et entreprises)
- Noh J. D., Rieger H., 2004, Random walks on complex networks, *Physicall Review Letters*, 92/11, pp.1-4
- Okabe A., Okunuki K., and Shiode S., 2006, SANET: A toolbox for spatial analysis on a network, *Geographical Analysis*, 38, pp. 57-66.
- Okabe A., Satoh T., Sugihara K., 2009, A kernel density estimation method for networks, its computational method and GIS-based tool, *International Journal of Geographical Information Science*, 23, pp.7-32.
- Opsahl T., 2010, Node centrality in weighted networks: generalizing degree and shortest path, *Social Networks*, 32/3, pp.245-251.
- Paolillo P. L. et al., 2011, An Assessment-Based Process for Modifying the Built Fabric of Historic Centres: The Case of Como in Lombardy, *Computational Science and its Applications ICCSA 2011*, LNCS 6782, pp.162-172.
- Pearl J., 2000, *Causality – Models, Reasoning and Inference*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Penn A., 2003, Space Syntax and spatial Cognition.Or why the Axial Line?, *Environmental Studies*, 1/35, pp.30-65.
- Porta S. et al., 2009, Street centrality and densities of retail and services in Bologna, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, pp.450-456.
- Porta S. et al., 2007, Correlating densities of centrality and activities in cities: the cases of Bologna (IT) and Barcelona (ES), in *Planning*, Alinea Editrice, Firenze, pp.37-46.

- Porta S., Crucitti P., Latora V., 2006a, The network analysis of urban streets: a dual approach, *Physica A*, 369, pp.853-866.
- Porta S., Crucitti P., Latora V., 2006b, The network analysis of urban streets: a primal approach, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33, pp.705-725.
- Salingros N., 2005, *Principals of Urban Structure*, Delft: Techne.
- Sevtsuk A., Mekonnen M., 2012, Urban Network Analyst. A new toolbox for ArcGIS, *Revue Internationale de géomatique*, 2/2012, pp.287-305.
- Stevens A., Coupe P., 1978, Distortion in judged spatial relations, *Cognitive Psychology*, 10, pp. 422-437.
- Tomko M., Winter S., Claramunt C., 2008, Experiential hierarchies of streets, *Computers, Environment and Urban Systems*, 1/32, pp. 41-52.
- Wiel M., 1999, *La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisé*, Liège : Mardaga
- Williamson R. C. et al., 1998, Structural risk minimization over data-dependent hierarchies, *IEE Transaction on Information Theory*, 44/5, pp.1926-1940.
- Zadeh L., 1965, Fuzzy sets, *Information and Control*, vol. 8, no 3, p. 338-353.

4. Métrique des réseaux et localisation des aménités : quel couplage pour une accessibilité durable ?

Contact : Cyrille Genre-Grandpierre - UMR 7300 ESPACE :

cyrille.genre-grandpierre@univ-avignon.fr,

Objectif : *voir dans quelle mesure une restructuration des réseaux routiers couplée avec un processus de relocalisation des aménités urbaines (emplois, logements, commerces, etc.) est susceptible de permettre un partage modal moins favorable à la voiture, tout en maintenant le niveau de satisfaction des individus, qui est une des conditions pour une accessibilité et une ville plus durables, qui ne peuvent se construire sans l'adhésion individuelle*

4.1. Introduction

L'influence de la structure des réseaux routiers sur les pratiques de mobilité a aujourd'hui largement été mise en évidence notamment en termes de pratiques modales (Hillier et al. 1993 ; Genre-Grandpierre 2007, etc.). Certains réseaux de par leur morphologie et leur topologie apparaissent ainsi intrinsèquement plus ou moins favorables à tel ou tel mode. Le réseau viaire ne constitue donc pas un simple support des déplacements, mais un des déterminants des pratiques de mobilité.

Par ailleurs, l'influence de la structure des réseaux viaires et des métriques induites sur les localisations a également été mise à jour, notamment par Isabelle Thomas (2002) dans son ouvrage « transportation network and the optimal location of human activities. A numerical geography approach ». Selon le type de réseaux (i.e. plus ou moins hiérarchisés, concentriques, avec ou sans rocade, etc.) les localisations optimales d'activités (dans une logique d'efficacité qui est celle de la p-médiane) vont ainsi être plus ou moins concentrées ou au contraire dispersées, favoriser le centre ou les périphéries, ce qui influence en retour bien entendu les pratiques de mobilité.

Réseaux routiers, localisations d'activités et pratiques de mobilité sont donc intimement liés par des interactions mutuelles. Aussi, si on veut comprendre et agir sur les mobilités (dans une perspective de durabilité notamment) il est donc nécessaire de considérer simultanément dans une perspective systémique le système de transport, le système de localisations et les mobilités.

Cette vision a été mobilisée dans la première partie pour étudier les différentes composantes de l'accessibilité en considérant simultanément les systèmes de transport et de localisations, mais en délaissant la troisième composante, c'est-à-dire celle des mobilités induites et la satisfaction conséquente des individus. C'est ce que se propose de faire cette troisième partie en explorant les interactions entre le réseau routier et les qualités de déplacements qu'il permet ; les localisations d'aménités et les comportements de mobilité. Plus spécifiquement, il s'agira tout d'abord d'illustrer l'influence de la structure du réseau routier sur les pratiques modales. Au-delà des travaux qui ont montré théoriquement, les externalités négatives de la structure très hiérarchisée par la vitesse des réseaux viaires actuels à la fois en termes de concurrence modale et d'étalement urbain (programme Predit « des réseaux lents contre la

dépendance automobile » notamment, Genre-Grandpierre, 2009), il s'agira d'adopter une approche plus orientée sur les choix individuels pour voir dans quelle mesure certains réseaux sont, ou pas, plus ou moins favorables à une mobilité moins automobile. Nous chercherons notamment à voir quelle peut être l'influence de réseaux routiers moins hiérarchisés, plus connectifs, sur les pratiques de mobilité des individus et sur la satisfaction qu'ils en retirent.

La méthode se base sur l'utilisation du système multiagents Matsim de l'ETH Zurich. Dans ce simulateur, les individus (les agents) ont un programme d'activités quotidiennes à réaliser et cherchent à maximiser leur utilité individuelle en choisissant tel ou tel mode de transport, telles routes, tels horaires ou encore de fréquenter tels ou tels lieux (quand le choix est possible ce qui n'est par exemple pas le cas du lieu de travail ou du logement). Grâce à ce simulateur, on peut donc en simulant des changements de réseaux routiers en observer les effets sur les choix des agents et sur leur satisfaction.

Ce travail introductif, qui considère le système de localisations comme fixe (mais pas leur fréquentation, puisque les individus peuvent changer les lieux fréquentés pour s'adapter), va permettre de montrer que si certaines structures de réseau permettent bien d'orienter les pratiques vers un partage modal moins favorable à l'automobile, elles ne permettent en revanche pas d'assurer la satisfaction des individus (dit autrement, par exemple baisser les vitesses de circulation est favorable aux modes non automobiles, mais rend les individus insatisfaits). C'est pourquoi, dans un deuxième temps Matsim a été couplé avec des méthodes de localisations optimales issues de la recherche opérationnelle pour étudier dans quelle mesure la combinaison : modification des réseaux + relocalisation d'aménités pouvait permettre tout à la fois de tendre vers une mobilité plus durable tout en assurant l'utilité individuelle des agents. On pourra par exemple chercher à savoir combien d'aménités (emplois, domicile, commerces, etc.) sont à relocaliser si on baisse les vitesses de circulation de x% en cherchant tout à la fois un meilleur partage modal et en assurant la satisfaction des individus. L'approche est donc dans la ligne des travaux sur la ville cohérente, mais ils sont plus englobants puisque l'on peut simuler la relocalisation d'un ou plusieurs types d'aménités et surtout voir l'impact en termes de pratiques de mobilités, au-delà du simple fait de calculer des longueurs de trajets domicile-travail.

Enfin, les agents peuvent être différenciés selon leur catégorie socioprofessionnelle (dont dépend partiellement la valeur qu'ils accordent au temps). Ainsi, pour chaque scénario d'aménagement, on peut chercher à savoir qui sont les gagnants ou les perdants eu égard à la catégorie des agents. Par exemple, si on baisse les vitesses de circulation automobile et que ce sont les plus pauvres qui habitent le plus loin de leur travail et qu'ils n'ont pas de moyen d'adaptation possible (par exemple basculer sur du transport en commun ou se relocaliser) alors ils seront, toute chose égale par ailleurs, les plus perdants.

Après avoir exposé la logique du système multiagents Matsim et de la méthode de relocalisation optimale utilisée, nous présenterons les résultats des simulations effectuées sur l'agglomération de Zurich en partenariat avec l'ETH Zurich.

Nous montrerons tout d'abord l'importance de la structure morpho-fonctionnelle des réseaux routiers sur les comportements de mobilité (et certaines externalités qui y sont liées telles que les émissions de polluants). Puis, après avoir vu que la seule modification des réseaux routiers ne permet pas d'assurer à la fois un meilleur partage modal et la satisfaction des individus, nous monterons que ce n'est qu'à la condition de coupler cette restructuration des réseaux

avec un processus de relocalisation qu'il est possible de découpler accessibilité et mobilité automobile, tout en garantissant la satisfaction individuelle.

4.2. Méthode

4.2.1. Le simulateur Matsim (www.matsim.org)

Matsim (Axhausen et al., 2008) est à la base un simulateur de trafic basé sur la modélisation multiagents. Il est développé par l'ETH Zurich, partenaire du projet DAMA. Les agents du système modélisé sont représentés à l'échelle individuelle et agissent dans un environnement artificiel selon des règles données. Ils poursuivent un but et ont des capacités d'apprentissage. Le comportement du système qui émerge des simulations est donc la conséquence des comportements individuels et de leurs interactions. Ainsi, chaque individu, localisé au départ de la simulation à son domicile, a un programme d'activités à réaliser (un plan). Il doit par exemple aller au travail, puis faire des courses et enfin se rendre sur son lieu de loisir avant de rentrer chez lui tout en respectant des contraintes horaires (horaires d'ouverture des commerces par exemple), ce qui correspond à la demande initiale de transport. Cette demande a été calibrée à partir de données de recensement très précises (Swiss travel diaries survey, ARE and BFS, 2011)

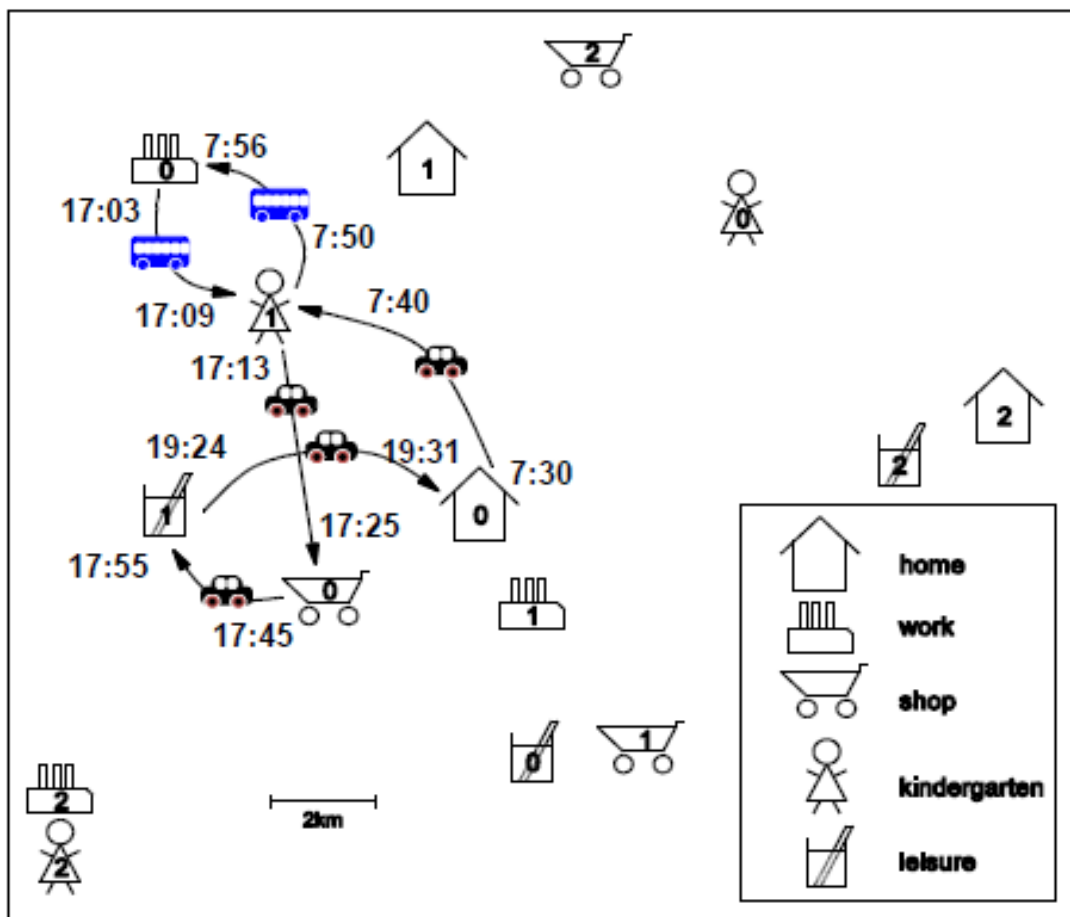


Figure 66 Un exemple de programme d'activité dans Matsim avec les lieux, les horaires et les modes de transport

Une fois cette demande initiale donnée, chaque agent va chercher à optimiser sa chaîne d'activités quotidienne par un jeu d'essais et d'erreurs au cours de la simulation (appelé processus de replanning). Il peut ainsi :

- changer de chemin et s'écarter du plus court chemin théorique si celui-ci ne devient plus optimal du fait de la présence d'autres agents en cours de simulation (problème de bouchons sur la route par exemple). Les temps de parcours des agents peuvent donc différer des temps théoriques optimaux selon l'intensité du trafic rencontré sur les plus courts chemins, ou si l'agent allant de A à B s'est écarté du plus court chemin théorique trop encombré pour trouver une meilleure solution.

- changer de mode de transport (si la fonction est activée). Les modes disponibles sont la voiture, le transport public, la marche et le vélo et le car sharing dans les versions les plus récentes, mais que nous n'avons pas mobilisées. Ainsi, si lors d'une simulation un agent se rend compte que le fait de passer de la voiture au vélo maximise son utilité alors il retiendra ce mode pour la suite des simulations. Précisons que le calcul de l'utilité se faisant pour tout le programme d'activité, les trajets sont « interdépendants » ce qui interdit par exemple le fait qu'un individu accompagne à pied ses enfants à l'école puis, de l'école parte au travail avec une voiture qu'il n'aurait pas, puisque restée à la maison.

- changer les horaires de ses activités en respectant certaines contraintes temporelles (ex : il faut que le lieu de travail ou les magasins soient ouverts pour pouvoir s'y rendre)

- changer la localisation de ses lieux de shopping et loisirs (si la fonction est activée). Ainsi, si en cours de simulation un individu se rend compte que fréquenter un supermarché proche de son lieu de travail plutôt que proche de son domicile va lui apporter plus d'utilité (un gain de temps par exemple), alors il intégrera au pas suivant de simulation cette nouvelle destination dans son programme de travail. Précisons que si un individu peut changer en cours de simulation de lieu de commerce, loisir ou équipement public, il ne peut en revanche pas changer de domicile et de travail, car il est considéré que les lieux de travail et logement ne sont pas substituables. Le simulateur permet néanmoins d'explorer cette possibilité à titre heuristique.

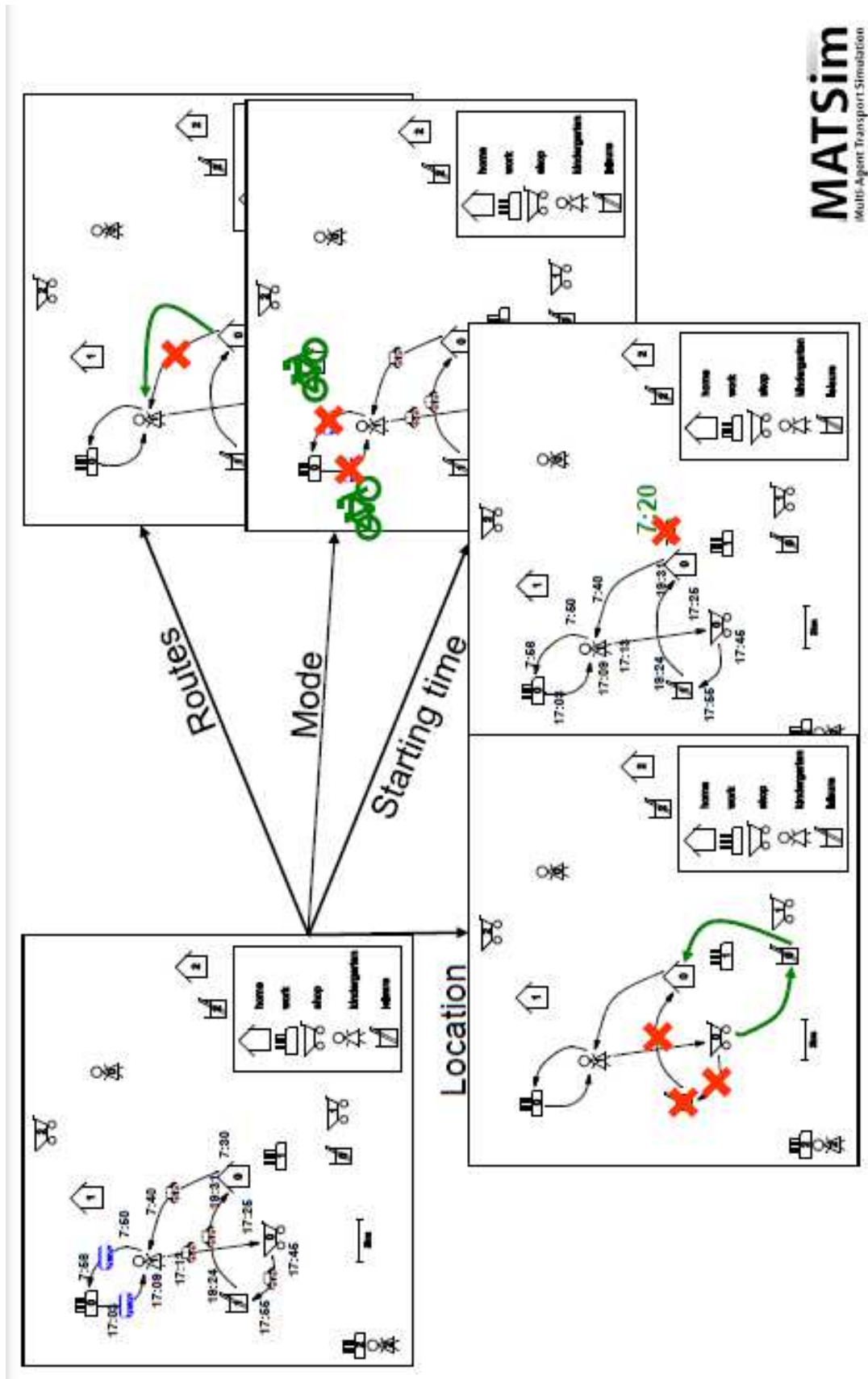


Figure 67 Exemple de replanning pour un programme d'activités : en changeant les routes, les modes, les horaires

L'agent va donner un score à chaque essai qu'il va réaliser et mémoriser les plans lui ayant conféré la meilleure utilité individuelle. La simulation s'arrête lorsqu'un équilibre est obtenu c'est-à-dire lorsqu'une stabilité est observée pour les valeurs d'utilité moyenne, de distance parcourue et de temps de transport.

Précisons que, pour assurer la possibilité de converger vers une situation d'équilibre, qu'à chaque itération 10% des agents ont cette possibilité de modifier leur plan en cherchant à maximiser leur utilité individuelle.

Formellement, l'utilité d'un plan U_{plan} (basée sur les travaux de Charypar, D. and K. Nagel, 2005) correspond à la somme des utilités des activités réalisées $U_{act,i}$ (ce qu'apporte à l'agent le fait de faire telle activité, par exemple travailler, dans tel créneau) plus la somme des désutilités liées à la réalisation des trajets $U_{trav,i}$ (le coût de transport) :

$$U_{plan} = \sum U_{act,i}(type_i, debut_i, dur_i) + \sum U_{trav,i}(loc_{i-1} - loc_i)$$

Avec $type_i$: le type de l'activité réalisée ; $debut_i$: horaire du début de l'activité et dur_i la durée de l'activité.

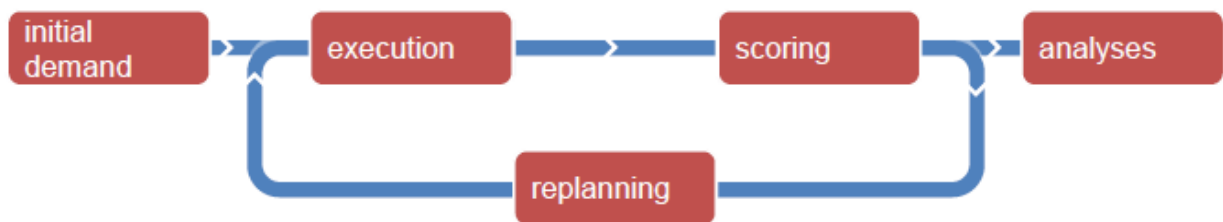


Figure 68 Le workflow de Matsim avec ou sans replanning

En fin de simulation on peut savoir pour chaque agent son utilité individuelle et tous les détails concernant le plan retenu : lieux fréquentés, horaires, mode utilisé, distance parcourue etc.... ce qui permet l'analyse et l'évaluation des simulations.

Dans le cadre du projet DAMA, le principe de simulation va donc dans un premier temps consister à modifier l'offre de transport (i.e. la structure morpho-fonctionnelle du réseau routier, en particulier en faisant différents scénarios de vitesse) puis à voir comment les agents s'adaptent en modifiant leur comportement pour enfin évaluer quantitativement ces adaptations (nombre de kilomètres parcourus, partage modal, satisfaction moyenne, etc.).

4.2.2. Le processus de relocalisation

Les détails sur les plans retenus par chaque agent permettent d'évaluer de manière plus ou moins réaliste la matrice Origine-Destination (O-D) entre les diverses aménités. Nous la noterons F . F est une matrice carrée comportant autant de lignes (ou de colonnes) qu'il y a d'aménités, et dont chaque cellule F_{ij} contient le nombre total de déplacements de l'aménité i

vers l'aménité j. Le calcul d'une telle matrice se fait simplement en lisant séquentiellement les plans, et en incrémentant progressivement d'une unité la valeur F_{ij} quant un déplacement de i à j a été constaté. Il est également possible par le même procédé de calculer un temps moyen de déplacement d'une localisation k vers une localisation l, noté T_{kl} , en tenant compte des temps de déplacement expérimentés par chaque agent. Nous noterons T la matrice résultante. Sur la base de ces informations (F et T), nous cherchons à "relocaliser" les aménités sur l'aire urbaine de sorte à optimiser une mesure de "l'accessibilité" des agents à ces mêmes aménités. Notons qu'en procédant de la sorte nous faisons implicitement le présupposé que l'amélioration de l'accessibilité permet d'accroître l'utilité pour les agents, et ainsi leur satisfaction.

L'accessibilité se définit de façon très générale comme la "capacité" pour des agents à atteindre des activités données dans un temps donné. Mais dès lors que l'on met en oeuvre des méthodes quantitatives, comme c'est le cas dans cette section, la notion se matérialise par plusieurs mesures possibles. Bhat et al. (Urban Accessibility Index : literature review, Technical Report, 2000) ont par exemple recensé plus de 46 mesures différentes allant de l'accessibilité gravitaire la plus communément utilisée, à l'accessibilité dite moyenne d'une aire (Allen, Liu, Singer, Accessibility Measures of US Metropolitan Areas, Transportation Research 8, 27B, 439-449, 1993) définie comme la somme des temps de déplacement pour tous les agents. Notre méthode s'intéresse précisément à déterminer une relocalisation des aménités minimisant cette accessibilité moyenne. Il convient à ce point de donner un contenu précis à ce que nous entendons par "relocaliser".

"Relocaliser" une aménité i est compris ici par le déplacement de i de sa localisation d'origine vers une localisation destination. Si l'origine ne pose pas de difficulté de compréhension, la localisation destination est par contre sujette à plusieurs approches. La destination pourrait être un espace non occupé (un terrain constructible) que l'aménité viendrait occuper. Mais pour faire cela, d'un point de vue opérationnel, il aurait été nécessaire de disposer de données, non disponibles au moment des expérimentations, fournissant la liste de ces espaces disponibles. L'autre approche plus réalisable consiste à considérer que la destination est déjà occupée par une autre aménité j que l'aménité i viendrait remplacer. Avec comme corolaire que j devrait alors être repositionné autre part, en l'espèce ici à la localisation d'origine de i, ou à la place d'une autre aménité k qui elle-même devra être repositionnée, et ainsi de suite.

Etant donné un ensemble E d'aménités, la méthode de relocalisation testée ici consiste donc à déterminer une permutation des éléments de E, entre eux, permettant de minimiser l'accessibilité moyenne. Il s'agit formellement d'un problème d'optimisation combinatoire connu sous le nom de problème d'affectation quadratique (voir Loila et al. A survey for the Quadratic Assignment Problem, 2007).

Mathématiquement, si l'on désigne par $i = 1, 2, \dots, n$ les aménités et p l'application permutation qui à une aménité (origine) i fait correspondre le numéro de l'aménité j dont elle va prendre la place, le problème d'optimisation est le suivant :

$$\text{Min}_p \sum F_{ij} T_{p(i)p(j)}$$

Notre problème de relocalisation est cependant une variante du problème classique, car toutes les permutations d'aménités ne sont pas permises. Nous n'autorisons en effet que la permutation d'aménités de différents types. En effet, échanger par exemple les positions de deux centres commerciaux n'aurait aucun impact sur l'accessibilité puisque la version actuelle de MatSim ne permet pas de tenir compte de spécificités entre aménités de même type, ou de préférences d'un usager pour un centre commercial plutôt qu'un autre. Il faut également remarquer que, posé de la sorte, nous assumons dans le modèle d'optimisation qu'un temps de déplacement quelconque T_{kl} ne varie pas quelle que soit la permutation adoptée. Cette observation, qui n'est pas toujours vérifiée en pratique, justifie la nécessité de re-simuler, à la suite du processus de relocalisation afin de découvrir les nouveaux temps de déplacement.

Même sous cette version contrainte, la littérature en recherche opérationnelle classifie notre problème comme l'un des plus durs à résoudre exactement. Il est théoriquement NP-Complet, ce qui en pratique signifie l'inexistence (en l'état des connaissances) d'algorithme de complexité polynomiale. C'est à dire permettant de trouver dans des temps de calcul "humainement" acceptables une solution optimale. Il est même parmi la classe de ces problèmes (NP-Complet) l'un des plus difficiles pour lequel trouver une solution approchée (c'est à dire non nécessairement optimale), mais en garantissant la déviation maximale avec la valeur optimale est en soi un problème difficile. La seule famille de méthodes de résolution envisageable, tenant compte du nombre très important d'aménités que nous considérons, sont les méthodes purement heuristiques sans garantie de performance, mais dont l'expérience acquise à travers divers tests numériques ont montré leur capacité à trouver de bonnes solutions rapidement. Nous avons implémenté un algorithme glouton heuristique, dit 2-opt, d'exploration de voisinages. Celui-ci consiste (schématiquement), partant de la localisation courante, à calculer séquentiellement les gains (ou pertes) d'accessibilité obtenus en permutant deux aménités, et à retenir au fur et à mesure les meilleures permutations. Soulignons que l'énorme quantité d'aménités présentes sur une aire urbaine contraint aussi à se limiter à des pourcentages. Nous ne relocalisons donc pas toutes les aménités, mais des pourcentages donnés (définis par l'utilisateur) d'aménités de types donnés (également définis par l'utilisateur).

A la fin de l'algorithme heuristique, les nouvelles localisations proposées sont renseignées dans le simulateur que nous relançons pour actualiser les temps de déplacement (T), de même que les flots O-D (F). F et T sont à leur tour ré-utilisées dans l'heuristique. Et ainsi de suite jusqu'à un nombre fixé d'itérations, ou jusqu'à ce que la différence de gain d'accessibilité devienne suffisamment marginale pour justifier l'arrêt du processus.

4.2.3. Le grand Zurich comme zone d'étude

Les simulations sont réalisées pour le "Grand Zurich" c'est-à-dire le secteur situé dans un cercle de 30 kilomètres de rayon centre sur la place Bellevue dans le centre de Zurich. Le réseau routier comprend plus de 240000 arcs avec des vitesses variant de 0 à 120 km/h. Le haut niveau de détail du réseau permet de bien prendre en compte les accessibilités pour tous les modes, y compris la marche à pied.

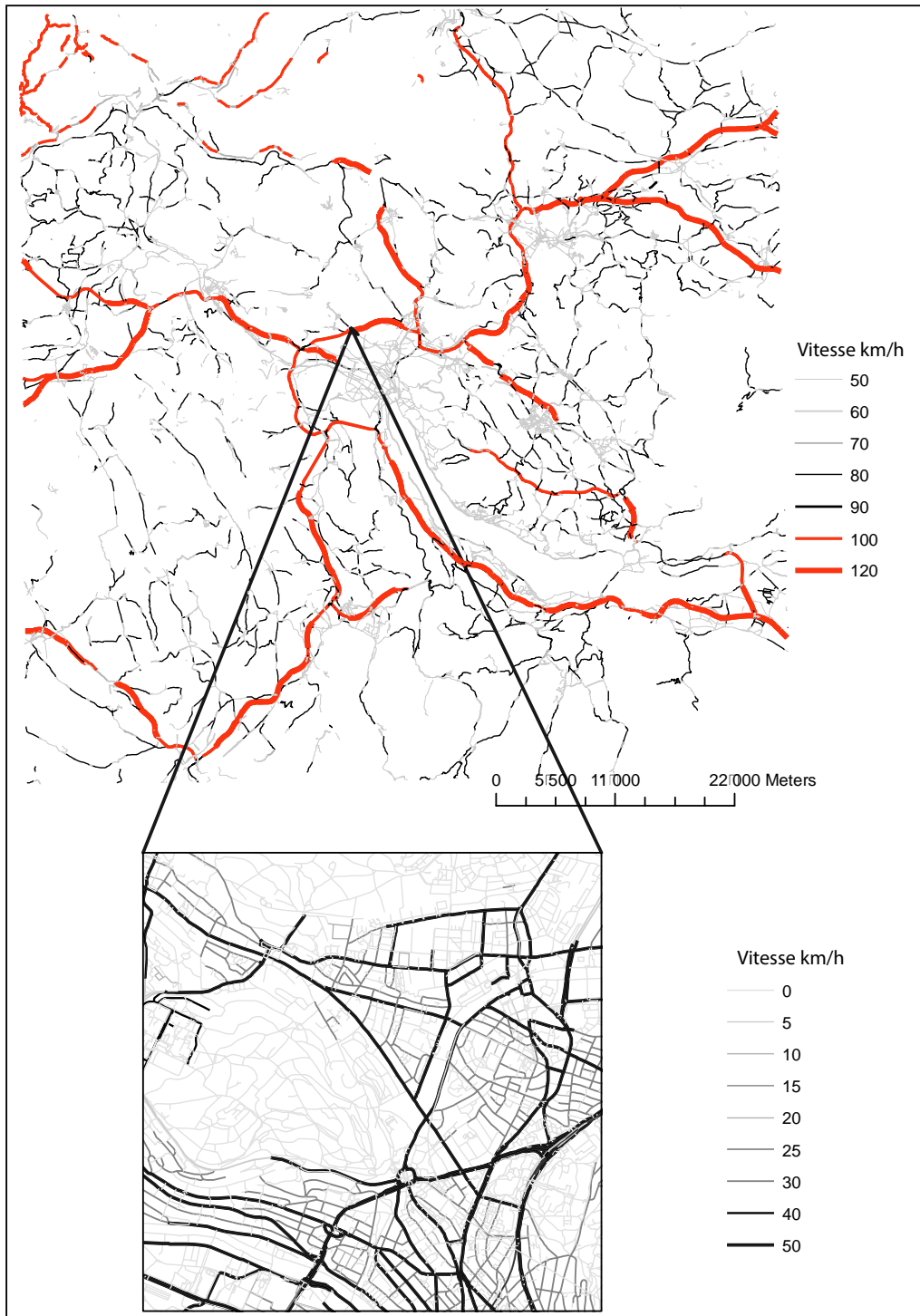


Figure 69 *Vue générale et une vue détaillée du réseau routier du Grand Zurich*

Notons que bien que la vitesse maximale du réseau (120 km/h) soit inférieure à ce qu'on peut trouver dans d'autres pays (130 km/h en général), l'efficacité des trajets automobiles (efficacité = portée du trajet en km / temps effectivement mis pour faire le trajet) qu'il permet est parmi les plus fortes des réseaux empiriques analysés jusqu'ici, ce qui s'explique par sa forte densité et bonne connectivité.

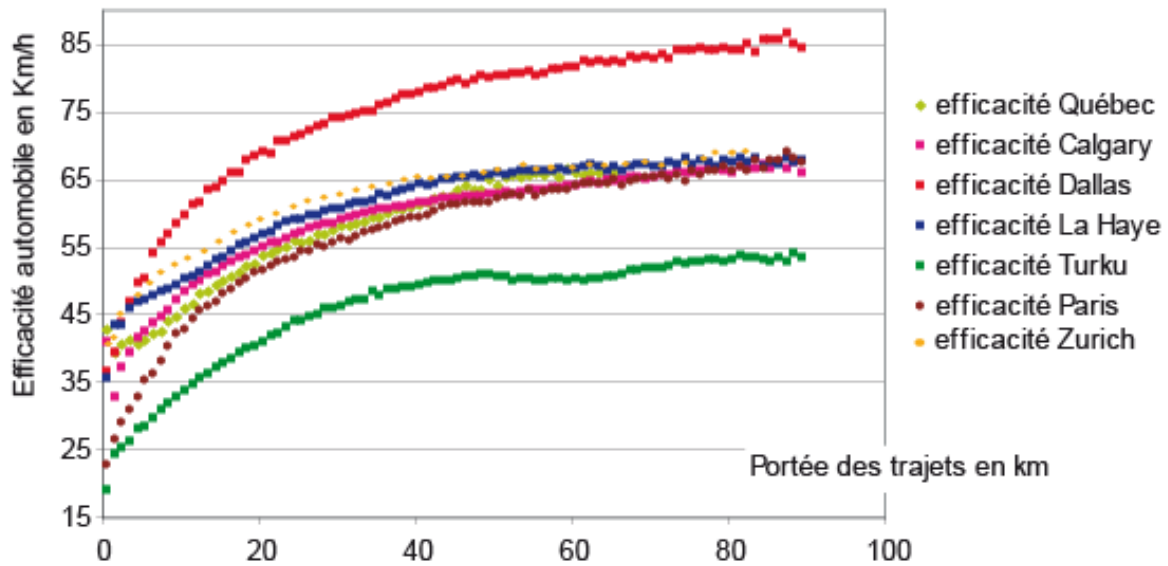


Figure 70 Métrique de différents réseaux métropolitains

La métrique « accélérante » selon laquelle plus on va loin plus les déplacements automobiles sont efficaces (métrique qui est due à la hiérarchisation du réseau par la vitesse, car plus on va loin plus la part des trajets effectuée sur une infrastructure rapide est importante et donc plus l'efficacité est forte Genre-Grandpierre, 2009), est donc bien marquée pour le cas zurichois. Précisons enfin que le partage modal à Zurich est nettement plus équilibré que dans bien des villes européennes et plus particulièrement françaises, puisque la voiture réalise un peu moins de 45 % des trajets, la marche 30 %, le bus 18 et le vélo 6.5%. Toutes choses égales par ailleurs, les simulations réalisées pour Zurich partent donc d'une situation plutôt déjà favorable en termes de mobilité durable (les résultats sur d'autres terrains n'en seront donc que plus probants).

4.2.4. Les métriques testées

Conformément à notre logique de stress test le réseau de Zurich a été modifié de deux façons

- en baissant les vitesses sur tous les arcs de 30% : scénario Bais. Cette baisse correspond à une tendance actuelle de l'aménagement urbain qui se fait au nom de la sécurité, de la limitation de la pollution et des consommations d'énergie, de l'augmentation de l'efficacité relative des modes non automobiles, mais aussi dans une logique de chrono-aménagement qui cherche à « contraindre » les individus en rapprochant leurs lieux de vie de façon à éviter une explosion de leur budget temps de transport quotidien.
- en homogénéisant les vitesses, c'est-à-dire en augmentant légèrement les vitesses des voies les plus lentes et en diminuant celles des voies les plus rapides: scénario Homog.

L'objectif est ici :

- de limiter la dualisation de l'espace ou dit autrement de rendre la différenciation spatiale de l'accessibilité moins forte
- de mieux distribuer l'intermédiarité (probabilité d'un arc de se trouver sur des plus courts chemins liant des lieux i et j) pour obtenir une distribution plus homogène des flux
- de limiter « l'effet métrique rapide » qui favorise l'efficacité des trajets aux portées les plus longues et qui n'étant valable que pour l'automobile, revient intrinsèquement à encourager l'usage, en particulier quand la portée des trajets augmente (Genre-Grandpierre, 2009)

Note :

Précisons que la métrique lente (Genre-Grandpierre, 2007) a également été testée, mais pas exactement dans les mêmes conditions que les autres métriques (car elle est beaucoup plus difficile à modéliser). Aussi, les résultats ne sont-ils pas directement comparables, c'est pourquoi nous avons fait ici le choix de ne pas les présenter (il est possible pour cela de se reporter à l'article Genre-Grandpierre, Ciari 2014). En bref, la métrique lente cherche à inverser la logique de la métrique des réseaux actuels de façon à réintroduire la contrainte de proximité physique dans les choix des individus en « faisant payer en temps » la distanciation des lieux de vie. Alors qu'aujourd'hui plus on va loin plus l'efficacité des trajets automobiles est forte, ce qui permet aux individus de se déplacer à longue portée sans en payer le prix en temps, avec des réseaux lents c'est l'inverse, c'est-à-dire que l'efficacité des trajets diminue avec leur portée. On obtient ce type de métrique en disposant des feux dont le nombre et la durée sont liés par une loi de puissance (peu de feux longs, davantage de feux moyens, encore plus de feux courts). Ces feux sont ensuite disposés soit aléatoirement, soit en fonction du degré d'intermédiarité de chaque arc pour des types de trajets donnés. Ainsi, plus un arc va avoir une forte probabilité d'être intégré dans de nombreux trajets de longue portée, plus la probabilité qu'un feu long y soit localisé va être forte (pour plus de détails, voir Banos, Genre-Grandpierre, 2011).

Vitesse actuelle	Vitesse réduite (30%)	Homogénéisation des vitesses (H)
15	15	15
20	15	20
30	21	30
35	24.5	40
40	28	45
45	34.5	50
50	35	50
55	38.5	50
60	42	55
65	45.5	55
70	49	60
80	56	65
90	63	70
100	70	70
120	84	80

Figure 71 Les modifications de vitesse testées

Les simulations ont été réalisées selon les cas avec 16181 agents, soit 1% de la population de la zone, ou avec dix fois plus d'agents. L'augmentation du nombre d'agents ne change pas la logique des résultats (notamment parce que les capacités du réseau routier sont ajustées au nombre d'agents simulés), mais si il rend les calculs plus longs, il permet aussi une meilleure précision et robustesse des analyses et une analyse plus désagrégée des résultats.

4.3. Résultats

4.3.1. Baisser les vitesses routières conduit à une baisse des distances parcourues, mais pas à un réel meilleur partage modal et à la satisfaction individuelle

Scenario 1% (16181 agents)

Pour les résultats ci-dessous les simulations ont été réalisées pour 16181 agents. Les possibilités de changer de mode de transport en cours de simulation (adaptation au stimulus) et de changer de lieux de commerces et de loisirs (mais pas de domicile ou de lieux de travail) sont activées.

A titre indicatif, il y a plus de 100 grands magasins dans la zone d'étude et 2460 agents qui ont cette activité commerciale dans leur plan d'activités.

La figure ci-dessous montre l'effet de la baisse des vitesses et de leur homogénéisation sur le partage modal de toute la population et de ceux qui ont l'activité commerce dans leur plan.

Réseau	Mode			
	Voiture	Vélo	Marche	Transport public
	Pour tous les agents (16181)			
Vitesse normale	56.28%	5.32%	23.49%	14.89%
Vitesse réduite	54.28%	5.51%	25.11%	15.08%
Vitesse homogénéisée	56.22%	5.31%	23.54%	14.92%
	Pour les agents ayant l'activité commerce dans leur plan (2460)			
Vitesse normale	69.22%	4.14%	10.96%	15.66%
Vitesse réduite	67.47%	4.77%	11.11%	16.63%
Vitesse homogénéisée	69.07%	4.58%	10.85%	15.47%

Figure 72 Partage modal suite à des changements de vitesses sur le réseau routier

Comme attendu, il apparaît que les changements de limites de vitesse réduisent le nombre d'individus utilisant la voiture puisqu'elle devient moins efficace au regard des autres modes (toutes choses égales par ailleurs). Toutefois, la baisse est très réduite (2% en moyenne) au regard de la diminution des vitesses (30%). Les individus qui changent de mode le font au profit de la marche et un peu du vélo et du TP.

On peut par ailleurs noter que si l'impact de la baisse des vitesses est faible sur le partage modal, celui de l'homogénéisation est nul.

Toutefois, si on s'intéresse à présent aux distances parcourues pour chaque mode pour aller dans les commerces (tableau ci-dessous), on note que les deux scénarios de vitesse conduisent à une diminution des distances parcourues. Ainsi, les diminutions-homogénéisations des vitesses forcent les agents à choisir des lieux de commerces plus proches de leurs autres lieux d'activités (à commencer par le domicile) afin de contrecarrer la perte de temps potentielle.

La distance moyenne pour commercer pour tous les modes diminue ainsi de 10.9% pour la baisse des vitesses et de 6.1% pour le réseau homogénéisé.

réseau	Mode				
	Voiture	Vélo	Marche	Transport public	Tous
Vitesse normale	6935	1394	1876	3341	5588
Vitesse réduite	6107	1475	2125	3334	4982
Vitesse homogénéisée	6445	1446	1960	3337	5248

Figure 73 Distance moyenne par mode pour aller aux magasins

On observe en outre la même chose pour tous les déplacements, mais la baisse est plus faible puisque la possibilité de changer de lieux d'activité n'est ici possible que pour les commerces et loisirs (activités qui ne sont pas présentes dans tous les plans).

réseau	Mode				
	Voiture	Vélo	Marche	Transport public	Tous
Vitesse normale	11697	1976	1654	6755	8083
Vitesse réduite	11408	1931	1769	6720	7757
Vitesse homogénéisée	11033	1895	1694	6787	7716

Figure 74 Distance moyenne par mode (en m) pour tous les déplacements

Concernant les temps de transport (tableau ci-dessous) on voit logiquement qu'ils augmentent pour les vitesses réduites pour l'activité commerce considérée de façon isolée ou pour tous les plans (+16.9%). Toutefois, pour le réseau homogène la situation est plus complexe puisque les temps de transport changent très peu quand tous les modes et tous les motifs sont pris en compte (+3.4%), et qu'ils diminuent de 1.1% si on ne considère que les déplacements liés au commerce (alors que les vitesses sont plus faibles que les vitesses actuelles). L'explication tient au fait que pour les vitesses homogènes les nouveaux lieux de commerces et loisirs sont plus proches, ce qui est aussi le cas pour les vitesses réduites, mais la compensation de la baisse des vitesses se fait mieux avec les vitesses homogènes qu'avec les vitesses abaissées.

réseau	Mode				
	Voiture	Vélo	Marche	Transport public	Tous
Vitesse normale	684.44	711.82	1656.68	1764.83	1075.27
Vitesse réduite	938.67	695.82	1771.19	1754.81	1257.48
Vitesse homogénéisée	733.13	678.93	1697.01	1775.79	1112.76

Figure 75 Temps de transport moyen pour tous les trajets et tous les modes

réseau	Mode				
	Voiture	Vélo	Marche	Transport public	Tous
Vitesse normale	464.11	603.94	1875.89	995.82	708.01
Vitesse réduite	587.57	639.00	2124.82	993.79	828.48
Vitesse homogénéisée	465.36	626.39	1959.97	994.56	716.89

Figure 76 Temps de transport moyen pour tous les trajets liés au commerce

Pour évaluer le rôle respectif du changement de vitesse et des changements de localisation, nous avons refait les simulations, mais en rendant impossible la possibilité de changer de lieux d'activité (les agents ne peuvent désormais s'adapter au stimulus qu'en changeant de mode de transport). Dans ce cas, le temps de trajet augmente de 16% pour les vitesses réduites et de 1.8% pour les vitesses homogénéisées, ce qui montre que la diminution des temps et distances des trajets pour le réseau homogène est effectivement due aux changements de lieux de commerce et loisir.

Les scores des plans (l'utilité des individus) baissent fortement pour les vitesses réduites (-2.7% en moyenne pour tous les agents), mais elle reste relativement stable pour le réseau homogène, car les changements de lieux de commerces et loisirs parviennent à compenser les réductions de vitesses sur les routes les plus importantes.

réseau	Statistiques	
	Moyenne	Ecart Type
Vitesse normale	131.08	63.07
Vitesse réduite	127.57	64.30
Vitesse homogénéisée	130.35	63.00

Figure 77 *Statistiques sur les plans des individus suite aux changements de vitesse*

Ce premier jeu de simulations montre que la seule modification des vitesses (ici orientées à la baisse) peut aider pour tendre vers un partage modal moins favorable à l'automobile, mais que l'effet reste très limité, même avec des politiques fortes (baisse de 30% des vitesses). Cela s'explique notamment par le phénomène de dépendance automobile (Dupuy, 1999) selon lequel de nombreux individus n'ont pas de réel choix de mode, notamment quand on considère l'interdépendance spatio-temporelle des lieux d'activités.

En revanche, l'effet des politiques de vitesse est plus important sur les distances parcourues en encourageant les individus à agencer leurs lieux de vie sur une base davantage dictée par la proximité kilométrique, plutôt que sur des proximités temporelles liées à l'usage de la voiture.

Si ce dernier point est important et peut permettre de diminuer le trafic, les consommations d'énergie et les pollutions liées, il s'accompagne malheureusement d'une hausse des temps de transport et par voie de conséquence d'une baisse relativement importante de la satisfaction des individus. Une politique de baisse des vitesses pour contraindre à agencer les lieux de vie en tenant davantage compte de la proximité physique entre les lieux, se ferait donc contre la satisfaction des individus, au moins à court terme avant qu'ils n'ajustent éventuellement leur lieux de vie, sans compter qu'elle reviendrait par ailleurs à remettre en question la « préférence pour la diversité » selon laquelle les individus préfèrent avoir le choix (des lieux de commerces, loisirs, etc.) plutôt que d'être contraint à une solution unique.

Si une baisse unilatérale des vitesses paraît être une politique difficilement soutenable à structure territoriale donnée, il apparaît en revanche que l'homogénéisation des vitesses est plus facilement acceptable. Elle conduit en effet à baisser à la fois les distances et temps de trajets grâce à des changements obligés d'organisation dans les plans d'activité, tout en n'influençant pas trop la satisfaction individuelle (en précisant que la préférence pour la diversité n'est pas prise en compte). Une homogénéisation des vitesses permet donc plus de

flexibilité pour l'optimisation sous contraintes des programmes d'activités à l'échelle individuelle qu'une diminution pure et simple des vitesses.

Note : Vitesse et émission de polluants

En parallèle du travail sur les localisations le modèle Matsim et les scénarios de vitesses présentés sont actuellement utilisés (publication soumise à Transportation Research en septembre 2015) pour analyser l'effet de différents scénarios de vitesse sur les émissions de polluants.

Pour cela nous utilisons le modèle de calcul d'émissions de polluants au tronçon GREEN développé dans le cadre de la thèse de Julie Prud'homme³. La méthode est la suivante : on calcule les trajets, les parts modales, les temps de transports, les vitesses effectives aux tronçons de routes (c'est-à-dire prenant en compte les interactions entre véhicules) grâce au système multiagents Matsim pour différents scénarios de vitesse (baissées, homogénéisées et actuelles). Une fois les trajets et les enchaînements de vitesses sur les trajets connus pour tous les agents, le modèle Green permet de calculer les émissions globales et les émissions pour chaque tronçon du réseau routier, en tenant compte des phases d'accélération – décélération qui sont très émettrices.

Les premiers résultats montrent :

- que la prise en compte des interactions entre véhicules (ce que ne font pas les modèles de calculs d'émissions de polluants traditionnels) change considérablement les émissions (jusqu'à un tiers d'émission en plus selon le type de polluants !)
- que des réseaux plus homogènes en termes de vitesses (qui limitent de fait les phases d'accélération décélération) permettent (plus que les baisses des vitesses) de réduire les émissions globales (les proportions dépendent fortement du type de polluants) et limitent aussi leur concentration locale, puisque l'intermédiarité est mieux distribuée pour des réseaux plus homogènes.

Encore une fois, ici au regard des émissions de polluants, l'homogénéisation des vitesses semble avoir de nombreux bénéfices collatéraux pour une mobilité plus durable.

Scenario 10% (161810 agents)

Dans une deuxième phase du projet DAMA, nous avons réalisé des simulations avec dix fois plus d'agents. L'objectif est ici d'avoir plus de robustesse dans les résultats et de pouvoir les désagréger pour différentes catégories d'agents en ayant un nombre d'individus suffisant pour que cette désagrégation soit statistiquement valable (dans ce qui suit, nous distinguerons actifs occupés et non actifs ou chômeurs). Précisons aussi que pour ces simulations le réseau de transport en commun a été recalibré pour correspondre à l'offre effective actuelle de Zurich et que de ce fait les résultats ne sont pas directement comparables avec ceux du scénario 1%.

Enfin, outre le fait de vouloir étudier, en séparant actifs et non actifs, si les différents scénarios de vitesse ont des effets variables sur les différentes catégories d'agents, nous avons aussi simulé une forte augmentation de la désutilité de l'usage de la voiture. L'objectif est ici d'étudier quel serait l'effet de l'augmentation de cette désutilité (multipliée par deux) qui correspondrait par exemple à une augmentation du coût d'usage de la voiture dans les prochaines années (liée à des taxes, aux prix des carburants, etc.). On pourra donc comparer les effets de cette augmentation de la désutilité des trajets automobiles aux effets des politiques de vitesse.

Pour ne pas surcharger ce rapport en chiffres et tableaux, nous ne présenterons dans les lignes qui suivent que les résultats les plus saillants pour les simulations du scénario 10 % réalisées

³ Prud'Homme J., 2013 « Pour l'intégration d'une dimension spatiale dans l'estimation des quantités de polluants émis par l'usage d'un système de transport. Application aux systèmes de transports à la demande », doctorat de Géographie, Université d'Avignon.

avec les scénarios de vitesse vus précédemment et avec un scenario supplémentaire qui consiste à réduire les vitesses de 15%.

Choix des locs				
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	43,65	43,73	42,26	39,89
Vélo	6,51	6,34	6,68	7,01
Marche	31,71	31,79	31,89	32,14
Transport Public	18,13	18,14	19,17	20,95
Pas de choix des locs				
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	44,95	45,15	43,83	41,73
Vélo	6,47	6,43	6,67	6,96
Marche	28,58	28,53	28,67	28,89
Transport Public	20,00	19,89	20,82	22,41

Figure 78 Partage modal scenario 10%

On constate tout d'abord que tous les enseignements vus pour la simulation à 1% se retrouvent ici (ce qui montre d'ailleurs la robustesse des analyses) même si les chiffres varient parfois un peu, notamment du fait que le réseau de TC n'est pas strictement le même dans les deux cas.

Ainsi, en termes de partage modal, et pour les simulations où les agents peuvent adapter leurs lieux de commerces et loisirs, on note qu'il faut une très forte baisse des vitesses (-30%) pour voir l'usage de la voiture diminuer (-4%) au profit du transport public et dans une moindre mesure de la marche et du vélo. L'ajout du scenario 15% montre que dans ce cas la voiture ne perd que 1.4% de part de marché. Pour le réseau homogène, les parts modales sont quasiment stables.

Si à présent on enlève la possibilité aux agents d'adapter leurs lieux de commerces et loisirs, on note que la part modale de la voiture baisse moins (41.73 % pour le scenario vitesse moins 30%, contre 39.89% si l'adaptation est possible), mais que le transport public lui gagne du terrain (22.41% contre 20.95%), au détriment de la marche.

Ainsi, logiquement si les agents ne peuvent pas adapter les lieux de commerces et loisirs fréquentés aux baisses de vitesses, ils ne peuvent pas compenser par plus de proximité et ils sont donc contraints à l'usage de la voiture ou du bus.

Ce phénomène se voit notamment dans le fait que les trajets automobiles sont plus longs en distance quand le choix des lieux n'est pas permis que quand il l'est. Dit autrement, les agents face aux baisses de vitesses font en voiture et en bus les trajets qu'ils ne peuvent pas faire autrement, soit par absence d'offre alternative crédible, soit parce qu'ils n'ont pas pu adapter leur programme d'activités.

	Choix des locs		Dist. moyenne[m]	
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	7799,61	7735,78	7835,32	7836,93
Vélo	2513,80	2564,82	2488,62	2456,47
Marche	864,31	868,19	867,38	868,83
Transport Public	8024,66	8123,86	8047,07	8207,90
Pas de choix des locs				
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	7927,47	7862,40	7941,89	7946,43
Vélo	2729,64	2715,49	2669,51	2636,43
Marche	998,25	1002,52	1000,33	1000,28
Transport Public	7875,75	7993,98	7944,95	8082,50
	Choix des locs		Temps moyen [sec]	
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	678,88	708,48	788,81	937,59
Vélo	867,80	884,43	858,70	847,74
Marche	918,93	923,37	922,58	923,75
Transport Public	2953,46	2964,01	2932,33	2939,67
Pas de choix des locs				
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	695,87	724,59	805,33	957,11
Vélo	939,55	934,72	919,15	907,75
Marche	1055,30	1060,28	1057,91	1057,42
Transport Public	2892,82	2913,00	2896,80	2898,95

Figure 79 Distance et temps moyens des trajets scenario 10%

Du point de vue de l'utilité individuelle (les scores), elle baisse pour tous les scénarios, peu avec l'homogénéisation des vitesses, puis d'autant plus que la baisse unilatérale est forte (le score moyen passe de 97.01 à 94.97 pour une baisse de 30% des vitesses quand l'adaptation des lieux fréquentés est possible).

La possibilité d'adapter le choix des lieux de commerces et loisirs permet en moyenne une augmentation de l'utilité individuelle de 1.5 point.

Score des plans avec choix des localisations				
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Moyenne	97,01	96,49	96,10	94,97
Ecart type	134,43	134,82	134,78	134,89
Score des plans sans choix des localisations				
	Vitesses actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Moyenne	95,84	95,26	94,94	93,71
Ecart type	134,11	134,73	134,49	134,78

Figure 80 Scores des plans avec et sans choix de localisations – scenario 10%

Ces résultats reprenant très largement ceux vus pour le scénario 1%, nous ne les détaillerons pas davantage.

Actifs et non actifs

Pour illustrer l'effet des scénarios de vitesse sur les différentes catégories d'agents nous avons distingué les actifs employés des autres agents, en partant de l'hypothèse que la valeur du temps est plus importante pour les actifs employés (ce qui n'est que partiellement vrai, puisqu'une femme au foyer avec des enfants à charge a sans doute une valeur du temps aussi élevée que certains actifs).

L'analyse des données de recensement suisses montre tout d'abord que les non actifs utilisent plus le bus (+8%) au détriment majoritairement de la voiture (-2%) et de la marche (-4%). Ce plus faible usage de la marche peut s'expliquer par l'âge plus avancé des non actifs, mais aussi par ce qu'ils habitent peut-être dans des quartiers moins bien dotés en termes d'équipements, ce qui leur interdit de fait de pouvoir utiliser la marche (mode de proximité).

Le fait qu'ils effectuent en moyenne des trajets plus longs en distance pour tous les modes sauf pour le transport public tend à le confirmer (la proximité est parfois un luxe que seuls les plus aisés peuvent se payer...).

Choix des locs								
	Actifs				Non Actifs			
	Vit. actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%	Vit. actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Voiture	50,51	50,57	48,88	46,15	41,55	41,75	40,15	37,81
Vélo	6,14	6,00	6,42	6,79	6,29	6,07	6,26	6,68
Marche	27,89	27,94	28,09	28,43	27,62	27,74	27,87	27,91
T. Public	15,45	15,50	16,60	18,63	24,54	24,44	25,71	27,60
	Dist. Moy. [m]							
Voiture	7656,58	7593,50	7694,02	7688,22	8132,34	8059,23	8166,18	8194,98
Vélo	2188,92	2233,73	2158,52	2116,93	2657,33	2710,73	2703,47	2640,05
Marche	939,53	930,33	929,99	934,16	1043,14	1070,06	1066,55	1064,78
T. Public	7349,90	7493,66	7447,74	7730,16	7882,15	7956,89	7874,70	7992,15
	Temps moy.[sec]							
Voiture	660,13	688,11	767,66	912,11	729,85	762,83	846,89	1008,60
Vélo	758,32	773,67	747,24	733,75	919,92	938,12	936,61	912,90
Marche	1001,03	991,31	991,54	995,06	1107,40	1137,45	1132,65	1131,62
T. Public	2685,69	2701,22	2678,72	2715,02	2983,19	2998,44	2964,96	2981,62
	Scores							
	Actifs				Non Actifs			
	Vit. actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%	Vit. actuelles	Homogènes	baisse 15%	baisse 30%
Moyenne	98,75	98,04	97,67	96,29	94,01	93,73	93,31	92,39
Ecart type	144,22	144,76	144,62	144,79	110,57	110,83	110,76	111,00

Figure 81 Partage modal, distances, temps et score moyens pour les actifs et non actifs (scénario 10%)

Pour les différents scénarios de vitesse, il apparaît que les évolutions suivent les mêmes tendances que celles constatées au niveau le plus agrégé (plus de bus, moins de voitures plus les vitesses sont orientées à la baisse). Les longueurs des trajets changent elles très peu sauf en ce qui concerne les travailleurs qui voient ces longueurs augmenter pour le bus avec la baisse des vitesses. Les temps de trajets d'origine sont plus courts pour les actifs et le restent quel que soit le scénario de vitesse.

La différence majeure entre actifs et non actifs se situe sans doute au niveau des scores des utilités des plans. Ils sont en effet plus faibles à l'origine pour les non actifs, mais les différents scénarios conduisent à une baisse plus réduite pour eux (-1.5 point) que pour les actifs qui sont les plus perdants lorsque la vitesse diminue (-2.5 points). Cela s'explique par le fait qu'ils sont de plus gros utilisateurs de la voiture (ils sont donc mécaniquement plus impactés par les baisses de vitesses) et par le fait qu'en moyenne leur emploi du temps sont plus contraints ce qui rend plus difficile l'adaptation (changement pour des modes plus lents ou changements de lieux fréquentés).

Cette distinction actifs non actifs, réalisée à titre heuristique, illustre le fait que toute politique de transport n'est pas socialement neutre. On voit ici que baisser les vitesses impacte davantage, toutes choses égales par ailleurs, les actifs que les non actifs qui ont sans doute une valeur du temps moindre. Pour une estimation plus précise il conviendrait ici de faire un travail sur la valeur du temps de chaque catégorie pour estimer avec précisions qui sont les gagnants et les perdants (selon l'âge, le sexe, etc.). On peut toutefois penser que ces gagnants et perdants, au moins dans leur proportion changeraient selon le terrain d'étude et la composition sociale de la population. On ne pourra donc pas faire l'économie de monographies pour traiter finement cette question, mais on peut voir que le simulateur réalisé a déjà la capacité à appréhender cette problématique.

On notera aussi que les situations sont beaucoup plus homogènes (à l'aune de l'écart type des scores) pour les non actifs. Pour les actifs les situations varient donc beaucoup à l'origine et cette variation s'accroît encore un peu avec les différents scénarios de vitesses (notamment en fonction du recours obligé à la voiture).

Et si le coût d'usage de la voiture augmentait ?

Enfin, une dernière simulation, toujours dans une logique de stress test, mais pas en lien avec la vitesse cette fois, a consisté à augmenter la désutilité de l'usage de la voiture dans le calcul des scores des plans (en la multipliant par deux). Cela revient donc à considérer que l'usage de la voiture deviendrait considérablement moins attractif (en raison de taxes, ou encore d'une forte hausse du prix des carburants, etc., évolution possible si ce n'est probable).

Désutilité de la voiture * 2	Choix des locs		Vitesses actuelles	
	Partage modal	Dist. Moy. [m]	Temps moy.[sec]	
Voiture	38,06	7840,91	664,76	
Vélo	7,19	2473,54	853,41	
Marche	31,48	896,08	952,83	
T. Public	23,27	8258,60	2955,61	
Score				
Moyenne	94,18			
Ecart type	134,83			

Figure 82 Partage modal, distances, temps et score moyens en cas de multiplication de la désutilité de la voiture par deux

Les résultats montrent (dans le cas où les agents peuvent choisir leurs lieux de commerces et de loisirs) que l'augmentation de la désutilité de la voiture est favorable au transport public qui augmente de 5% sa part de marché (et un peu au vélo +1%, mais pas à la marche). Conjugué au fait que la distance des trajets bus augmente, cela signifie que le bus retrouve de la compétitivité dans cette situation y compris sur les trajets plus longs, au détriment de la voiture. En revanche, les scores des plans baissent fortement : de 97.01 dans la situation normale, à 94.18 avec l'augmentation de la désutilité automobile. Ce score correspond d'ailleurs à celui obtenu lorsque l'on baisse les vitesses de 30%. Dit autrement, et en caricaturant, on pourrait dire que du point de vue utilité individuelle et en moyenne pour toutes les catégories de population, multiplier la désutilité de l'automobile par deux, a les mêmes effets que baisser les vitesses de 30%.

Orienter les vitesses à la baisse ne permettant pas de tendre à la fois vers un partage modal plus équilibré (même avec l'homogénéisation des vitesses), une baisse des distances tout en assurant la satisfaction individuelle, nous avons dans un deuxième temps couplé cette baisse des vitesses avec un processus de relocalisation des aménités pour voir si cette double action permettait de tendre vers une accessibilité plus durable et qui soit satisfaisante à l'échelle individuelle.

4.3.2. La nécessité de coupler politiques de vitesse et réflexion sur les localisations pour une accessibilité plus durable

Le principe de simulation consiste à partir d'une demande de transport et d'un réseau routier donné (réseau actuel ou avec des vitesses modifiées). On lance ensuite une simulation Matsim pour obtenir l'agencement spatio-temporel des programmes d'activités des individus (qui va où avec quel mode, à quelle heure, en passant par où ?). Ensuite, nous utilisons ces flux comme données d'entrée pour lancer un programme de localisation optimale d'activités (cf. 4.2.2). Il vise à relocaliser les activités de façon à minimiser le temps total de transport sur la

base de pratiques de mobilité observées (plutôt que les distances parcourues parce que les individus s'organisent davantage en fonction du temps que des distances effectivement parcourues, cf. Zahavi, Talvitie, 1980). Une fois les relocalisations d'activités obtenues, elles sont utilisées comme données d'entrée pour une nouvelle simulation Matsim afin d'analyser leurs impacts sur les pratiques de mobilité (théoriquement cette boucle peut être répétée, jusqu'à ce que l'effet des relocalisations soit négligeable). La logique est donc différente de celle des premières simulations, puisqu'ici on change les localisations des aménités alors que précédemment c'étaient les agents qui changeaient de lieux fréquentés en réaction au stimulus des variations de vitesse.

Dans un premier jeu de simulations, le processus de relocalisation ne porte que sur les commerces (précisons que le choix du ou des types d'aménités à relocaliser est fait par l'opérateur), considérant (comme nous l'avons vu en partie 3) que les aménités commerciales sont très « réactives » à tout changement dans le fonctionnement territorial et qu'elles sont sans doute celles sur lesquelles la puissance publique a le plus « la main ». La question peut ici se résumer à savoir si des politiques de vitesses couplées à une relocalisation des commerces peuvent conduire à une mobilité globale plus durable (rappelons que les déplacements liés au commerce, que ce soit au départ du lieu d'habitation ou des autres lieux d'activités comme le travail, comptent pour un petit tiers des mobilités). L'enjeu est donc possiblement important. Précisons que l'objectif diffère de celui des travaux de Ciari, Axhausen (2012) qui utilisaient Matsim afin de trouver les localisations optimales des commerces sur la base des programmes d'activités des agents dans une logique de maximisation de l'accessibilité aux commerces. Ici il ne s'agit pas d'optimiser l'accès au commerce, mais de les relocaliser pour minimiser le total des temps de transport pour tous les programmes d'activités.

Dans un deuxième temps, le processus de relocalisation porte sur les lieux de commerces et de loisirs, la marge que l'on se donne pour optimiser les mobilités est donc plus importante que précédemment.

Enfin, dans un troisième temps tous les types d'aménités sont considérés simultanément. On cherche donc, en se donnant la possibilité de relocaliser un pourcentage donné des aménités (ci-dessous 15% des aménités de chaque type), à minimiser le temps total de transport pour les différents types de réseaux testés. Précisons que pour limiter les temps de calcul, les relocalisations sont en fait des permutations entre activités de type différent (un lieu de loisir peut donc être permuté avec un lieu de travail). Puisqu'il s'agit de permutations, une zone sans activité au départ de la simulation, ne peut donc pas accueillir d'activité par la suite. Si la possibilité de localiser n'importe quelle activité n'importe où (qui n'existe d'ailleurs pas dans la réalité cf. les contraintes liées aux PLU) ne présenterait pas de difficulté algorithmique, elle alourdirait en revanche considérablement les temps de calculs puisque le champ des possibles s'élargirait fortement. Une autre façon de procéder pourrait consister à donner une liste d'emplacements possibles pour chaque type d'activité (type PLU).

Les résultats présentés ci-dessous à titre heuristique portent sur la possibilité de relocaliser 15 % des aménités initiales (travail, habitations, loisirs et commerces), considérant qu'à moyen terme, à l'échelle de la réalisation d'un SCOT par exemple, cet objectif est tout à fait atteignable.

Dans les tableaux ci-dessous on peut voir les résultats pour les trois réseaux testés : vitesses actuelles, abaissées et homogénéisées et pour les différents scénarios de relocalisations.

Scenario	Statistiques des scores des plans	
	Moyenne	Ecart type
	Vitesse réduite de 30%	
Pas de relocalisation	128.58	62.84
Reloc. commerces	128.53	62.79
Reloc. commerces loisirs	129.22	63.57
Reloc. 15% des aménités	132.26	62.48
	Réseau homogène	
Pas de relocalisation	131.25	63.66
Reloc. commerces	131.27	63.82
Reloc. commerces loisirs	132.03	64.40
Reloc. 15% des aménités	135.30	63.23

Figure 83 Scores des plans pour différents scénarios de relocalisation et de vitesse

Scenario	Mode			
	Voiture	Vélo	Marche	Transport Public
	Vitesses réduites			
Pas de relocalisation	54.45%	5.00%	25.93%	14.60%
Reloc. commerces	54.68%	5.08%	25.68%	14.54%
Reloc. commerces loisirs	54.61%	5.05%	25.38%	14.94%
Reloc. 15% des aménités	50.51%	6.25%	26.34%	16.88%
	reseau homogène			
Pas de relocalisation	56.54%	4.73%	24.20%	14.51%
Reloc. commerces	56.58%	4.85%	24.02%	14.55%
Reloc. commerces loisirs	56.60%	5.06%	23.64%	14.68%
Reloc. 15% des aménités	52.21%	6.22%	24.83%	16.72%

Figure 84 Partage modal pour différents scénarios de relocalisation et de vitesse

Scenario	Mode				
	Voiture	Vélo	Marche	Transport Public	Tous
	Vitesse réduite				
Pas de relocalisation	952.30s	686.93s	1702.59s	1769.74s	1253.03s
Reloc. commerces	952.05s	711.21s	1737.81s	1786.97s	1263.11s
Reloc. commerces loisirs	977.85s	754.11s	1851.30s	1775.84s	1307.50s
Reloc. 15% des aménités	896.72s	717.03s	1727.96s	1411.04s	1191.29s
	Réseau homogène				
Pas de relocalisation	742.80	660.13	1706.50	1787.20	1123.77
Reloc. commerces	745.05	715.04	1723.56	1785.57	1133.28
Reloc. commerces loisirs	777.08	742.34	1782.08	1784.17	1160.85
Reloc. 15% des aménités	698.73	676.39	1552.88	1352.53	1018.83

Figure 85 Temps de transport (en secondes) pour différents scénarios de relocalisation et de vitesse

Les résultats des simulations montrent tout d'abord que relocaliser les magasins seulement, et dans une moindre mesure les commerces et lieux de loisirs, ne change pas fortement les scores des plans, le partage modal et les temps de transport (si ce n'est que les scores augmentent un peu pour la relocalisation des commerces et loisirs). Ce faible impact des relocalisations s'explique par le fait que les déplacements pour les différents motifs sont très fortement liés et interdépendants dans les programmes d'activités des individus. Pour un individu on peut par exemple relocaliser son lieu de commerce, il n'en reste pas moins que son programme quotidien (si il est varié ce qui est très souvent le cas) étant fortement contraint notamment par son lieu de domicile, son lieu de travail, cette relocalisation d'une seule activité ne peut avoir que des impacts limités. Ainsi, les programmes d'activités doivent être considérés globalement et non motif par motif.

C'est ce qu'on peut voir en analysant les résultats liés à la relocalisation de 15% des activités. En effet on note alors que la baisse des vitesses et de façon encore plus marquée leur homogénéisation, couplées avec le processus de relocalisation conduit à des changements très favorables en matière de mobilité durable. Ainsi, l'utilité individuelle augmente, l'usage de la voiture diminue ainsi que les temps de trajets. Par exemple, le score maximum pour les plans (135.20) est obtenu pour le réseau homogène et revient à un accroissement de 3.2% du score par rapport à la situation actuelle (précisons que la fonction d'utilité utilisée ne favorise pas les fortes fluctuations d'utilité et qu'une hausse de 3.2% représente de ce fait une évolution notable). L'usage de la voiture et les distances parcourues régressent quant à elles de 4% pour les deux scénarios de vitesse avec relocalisation.

Augmentation de l'utilité individuelle, diminution des temps de trajets et de l'usage de la voiture, tous ces éléments combinés montrent qu'il est possible de tendre vers une ville plus lente, mais qui reste accessible en agissant simultanément sur le réseau routier et plus spécifiquement ses vitesses (la dimension transport) et sur la localisation des aménités (la dimension aménagement).

Note : Précisons ici qu'au-delà de la simulation relocalisant 15% des aménités, des tests plus systématiques sont en cours afin d'estimer s'il existe un éventuel optimum au regard du pourcentage d'aménités relocalisées et du gain correspondant en termes de partage modal, de diminution des distances

Comme pour la partie 2, la question est ici celle du coût des relocalisations. A ce sujet il convient de préciser que l'augmentation de la fluidité du marché du logement peut aussi être un moyen autre que les relocalisations pour faciliter le rapprochement des lieux de vie.

4.4. conclusion

Ces simulations couplant le SMA MATSIM et méthodes de relocalisation optimale pour explorer l'effet de différents scénarios de vitesses associés ou pas à des relocalisations d'aménités sur les pratiques de mobilités montrent que :

- une réduction fortes des vitesses (jusqu'à 30%) dans l'aire urbaine de Zurich, induit a) un relativement faible transfert modal au détriment de la voiture, b), mais une décroissance des distances parcourues parce que les individus font des choix davantage basés sur la proximité physique pour contenir leur budget temps de transport, c) une augmentation forte des temps de transport et conséquemment une baisse de l'utilité des plans des agents
- un réseau avec des vitesses plus homogènes ne modifie fortement ni le partage modal ni les scores des plans des agents. Il tend en revanche à faire légèrement augmenter les temps de trajets, mais surtout à faire baisser significativement les distances parcourues. Ainsi, ce type de réseau offre plus de flexibilité aux agents pour faire des activités à proximité, mais dans de bonnes conditions d'accessibilité et semble donc à privilégier par rapport à une baisse unilatérale des vitesses.

Pour ces deux scénarios de vitesses, les impacts paraissent insuffisants pour en faire des leviers suffisants pour tendre vers des formes d'accessibilité plus durables. Les politiques de limitations des vitesses doivent obligatoirement être accompagnées d'une action simultanée sur les localisations. Cette double action montre qu'il est possible d'avoir à la fois une baisse des vitesses (et ses effets bénéfiques collatéraux en termes de consommation de carburants, d'émissions de polluants, de sécurité, etc.) et de maintenir un bon niveau d'accessibilité assurant les satisfactions individuelles. La situation la plus favorable présentée ici est obtenue pour le réseau aux vitesses homogénéisées couplé avec une relocalisation de 15% des aménités (perspective tout à fait atteignable à l'échelle de la réalisation d'un Scot par exemple). Dans ce cas non seulement les relocalisations compensent l'effet des baisses de vitesse, mais elles parviennent même à faire augmenter l'utilité individuelle moyenne et à faire diminuer le temps de trajet moyen par rapport à la situation actuelle, tout en réduisant l'usage de la voiture. En bref tendre vers une ville moins automobile, plus lente, mais qui reste accessible.

Au-delà du résultat des simulations présentées à titre heuristique (elles sont sur le fond discutables, pourquoi 30% de baisse de vitesse et pas 15 ou 40, pourquoi 15% des aménités à relocaliser et pas 10 ou 30% ?), le projet DAMA a ici surtout permis de développer un outil opérationnel très innovant pour envisager conjointement la politique de transport et la politique d'aménagement dans une perspective de développement durable.

Le simulateur MATsim était déjà un outil opérationnel en termes de planification transport qui a été utilisé dans de nombreux cas pratiques, notamment par l'entreprise Senozon qui vend cette prestation, mais le projet DAMA et la réflexion sur les localisations amènent une plus-value indéniable puisqu'il ne s'agit plus seulement de répondre à une demande de transport, mais de voir aussi comment elle émerge, de chercher à la limiter à la source en travaillant sur les localisations pour créer les conditions d'une mobilité plus durable.

Cet outil (MATsim + méthode de relocalisation optimale) va être adapté aux spécificités du continent africain (notamment en y intégrant des modes de transport flexibles tels que les « clandos » dans le cadre d'un projet européen H2020 intitulé Spot Spatial Planning simulation and Optimization Technologies⁴. Précisons aussi qu'un des éléments déterminants et coûteux pour une utilisation adéquate du modèle est de posséder des données de qualité sur la demande de transport (i.e. avoir les programmes d'activités des individus). Si en France cette demande peut être dérivée dans de bonnes conditions des enquêtes ménages – déplacements quand elles existent, ce n'est pas le cas partout (à l'étranger ou là où ces enquêtes font défaut). Aussi, en parallèle du projet DAMA un travail a été réalisé pour savoir comment se passer de ces données d'enquête en utilisant les données de téléphonie mobile (cf. le big data) pour reconstituer les mobilités quotidiennes. Si ce travail est encore à peaufiner, il est à noter qu'il a néanmoins déjà reçu un prix international dans le cadre du challenge D4D, catégorie "Data Crossing"⁵.

4.5. Bibliographie

ARE and BfS (2011) Mobilität in der Schweiz, Ergebnisse des Mikrozensus 2010 zum Verkehrsverhalten, Bundesamt für Raumentwicklung; BFS Statistik der Schweiz, Neuchâtel.

Balmer, M., M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre and K. Nagel (2009b) MATSim-T: Architecture and simulation times, in A. L. C. Bazzan and F. Klügl (eds.) *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, 57–78, Information Science Reference, Hershey.

Banos, A. et Genre-Grandpierre, C. (2011). New types of metrics for urban road networks explored with S3: an agent-based simulation platform. In Q. Bai (Dir), *Advances in practical multiagent systems studies in computational intelligence* (pp. 435-444). Paris : Springer-Verlag.

Béguin, H. et Thomas, I. (1997). Morphologie du réseau de communication et localisations optimales d'activités. Quelle mesure pour exprimer la forme d'un réseau. *Cybergeo: European Journal of Geography*. [en ligne]. Disponible sur : <http://cybergeo.revues.org/2189>

Charypar, D. and K. Nagel (2005) Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms, *Transportation*, 32 (4) 369–397.

Ciari, F. and K.W. Axhausen (2012) Modeling Location decisions of retailers with an agent-based approach, paper presented at the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2012.

Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes*. Paris : Armand Colin.

⁴ STARTPAGE Research and Innovation actions. Innovation actions International Partnership Building In Low and Middle Income Countries Call: ICT-39-2015. PART B "SPOT" Spatial Planning simulation and Optimization Technologies"

⁵ Une équipe internationale dirigée par Serigne Gueye (LIA) et composée de B. N'Dyae (Sénégal), D. Josselin (ESPACE et LIA), M. Poss (LIRMM), R. Faye (Sénégal), P. Michelon (LIA), C. Genre-Grandpierre (ESPACE) et F. Ciari (Suisse), ont été récompensés lors du Challenge D4D par le prix de la meilleure réalisation dans la catégorie "Data Crossing": http://d4d.orange.com/content/download/43330/405662/version/3/file/D4Dchallenge_leaflet_A4_V2Eweblite.pdf

- Foltête J.C., Genre-Grandpierre C., Josselin D., 2011 : “Impacts of Road Networks on urban mobility”, in Theriault M., Des Rosiers F (ed) *Modeling urban Dynamics*, Geographical Information systems series, ISTE, Wiley, pp. 103-128.
- Genre-Grandpierre, C. (2007). Des réseaux lents contre la dépendance automobile ? Concept et implications en milieu urbain. *L'Espace Géographique*, 1, 27-39.
- Genre-Grandpierre C., Banos A. 2012 : “Toward new metrics for urban road networks : some preliminary evidence from Agent-based simulations”, in Heppenstall, A.J.; Crooks, A.T.; See, L.M.; Batty, M. (Eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer.
- Geurs K.T., Ritsema van Eck J.R. (2001). *Accessibility measures : review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact*, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM,
- Gutiérrez J., Monzón A., Pinero J.M (1998). «Accessibility, network efficiency and transport infrastructure planning». *Environment and Planning A*, 30, p. 1337-1350.
- Hägerstrand, T. (1989) Reflections on “What about people in regional science?”, Papers of the Regional Science Association, 66, 1–6.
- Hillier, B., Penn, A., Hanson, J., Grajewski, T. et Xu, J. (1993). Natural movement: or, configuration and attraction in pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20(1), 29-66.
- Huriot, J.-M. (Dir) (1998). *La ville ou la proximité organisée*. Paris : Économica.
- Levinson D., Kumar A. (1994). «The rational locator : why travel times have remained stable», *Journal of the American Planning Association* 60(3), p. 319-332.
- Penn A., Hillier B., Xu J. (1998). «Configurational modelling of urban movement networks», *Environment and Planning B*, 25, p. 59 – 84.
- T. C. Koopmans and M. J. Beckmann. Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica*, 25:53–76, 1957.
- Wiel M. (2002). *Ville et automobile*. Paris, Descartes et Cie, 140 p.
- Zahavi Y., Talvitie A., 1980, Regularities in Travel Time and Money Expenditure, *Transportation Research Record*, 750, 13-19.

5. Pressions urbaines et dynamiques des réseaux de villes : couplage de l'accessibilité et de l'occupation des sols

Contact : Fabrice Decoupigny - UMR 7300 ESPACE : decoupig@unice.fr

Objectifs :

1- Problématique : L'objectif de ce travail est de simuler de manière prospective les effets des infrastructures de transports sur un réseau métropolitain de villes. Il s'agit d'explorer les relations qui existent entre les caractéristiques des réseaux et le système de villes qui forment les territoires métropolitains et d'élaborer un outil prospectif qui permet de définir les grandes tendances d'évolution en localisant les zones de pressions urbaines. La problématique majeure est de déterminer les conditions d'extension des réseaux de villes sur un territoire en fonction des réseaux de transports sous contraintes de variables spatiales (disponibilités des sols, accessibilités) qui déterminent la localisation des ménages. Etant donné que le mode de transport quasi dominant est la voiture sur la région PACA, nous analyserons les dynamiques urbaines en fonction d'un modèle d'interactions gravitaire appliqué sur un graphe routier à partir de la construction d'un indice de pression urbaine capable d'estimer les espaces sensibles à l'urbanisation. Où la pression urbaine est-elle susceptible de se localiser, si on décide de limiter [ou augmenter] les accessibilités et les densités urbaines ?

2- Formalisation et modélisation : Le modèle consiste à simuler les probabilités de pressions urbaines en fonction de scénarios prospectifs dont les hypothèses portent sur les accessibilités (temps de déplacements) et la disponibilité des sols (densification des zones urbanisées). Pour cela nous allons formaliser un indice de pression afin de modéliser et simuler dans un réseau de villes les espaces urbains les plus vulnérables. L'objectif est de construire un indice de pressions urbaines capable d'estimer les espaces sensibles à l'urbanisation. Nous construisons cet indice sur la base de variables spatiales qui intègrent les accessibilités et les occupations du sol. L'objectif de la modélisation consiste à formaliser les relations existantes entre les accessibilités qui formalisent les mobilités potentielles et la disponibilité des sols qui formalisent les politiques d'urbanisation. Ainsi, l'indice de pression permet d'estimer les vulnérabilités à l'étalement urbain engendrées par la croissance métropolitaine en fonction d'un réseau de transport routier.

3- Applications : Trois séries de scénarios prospectifs d'aménagement seront modélisées afin de simuler les effets sur les pressions urbaines qui s'opèrent sur un réseau de villes. Les deux premières séries testeront les effets de mesures opposées d'aménagement sur la région PACA dans une prospective de 2040 (scénario Fil de l'eau et Volontariste). La troisième série de simulations consiste à évaluer l'effet d'un changement du réseau de transport sur un réseau de villes en simulant la construction d'un contournement autoroutier de Nice.

5.1. Introduction : dynamiques urbaines et extension des espaces métropolitains

L'analyse des croissances métropolitaines, ces dernières années (DATAR, INSEE), a montré un double mouvement d'urbanisation. Les centres urbains croissent en accueillant des migrants originaires d'autres régions et de l'étranger, alors que les périphéries métropolitaines accueillent des migrants venant des aires urbaines.

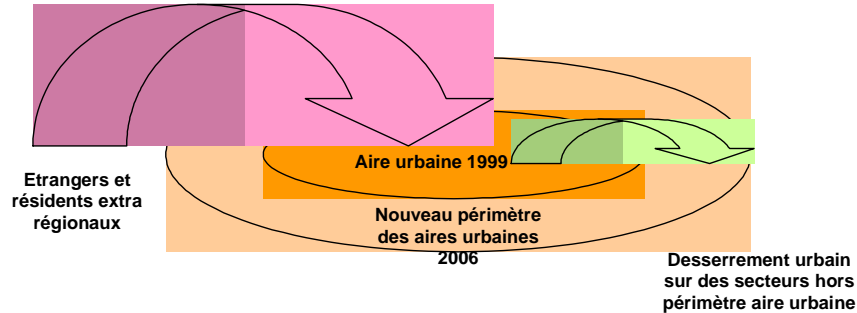


Figure 86 dynamiques des migrations résidentielles sur les grandes aires urbaines françaises

La carte 1 (figure 90) est la carte que tout le monde a en tête, c'est celle qui montre l'héliotropisme. Nous avons pris l'ensemble des flux et nous avons procédé à un simple calcul : Arrivants- Partants.

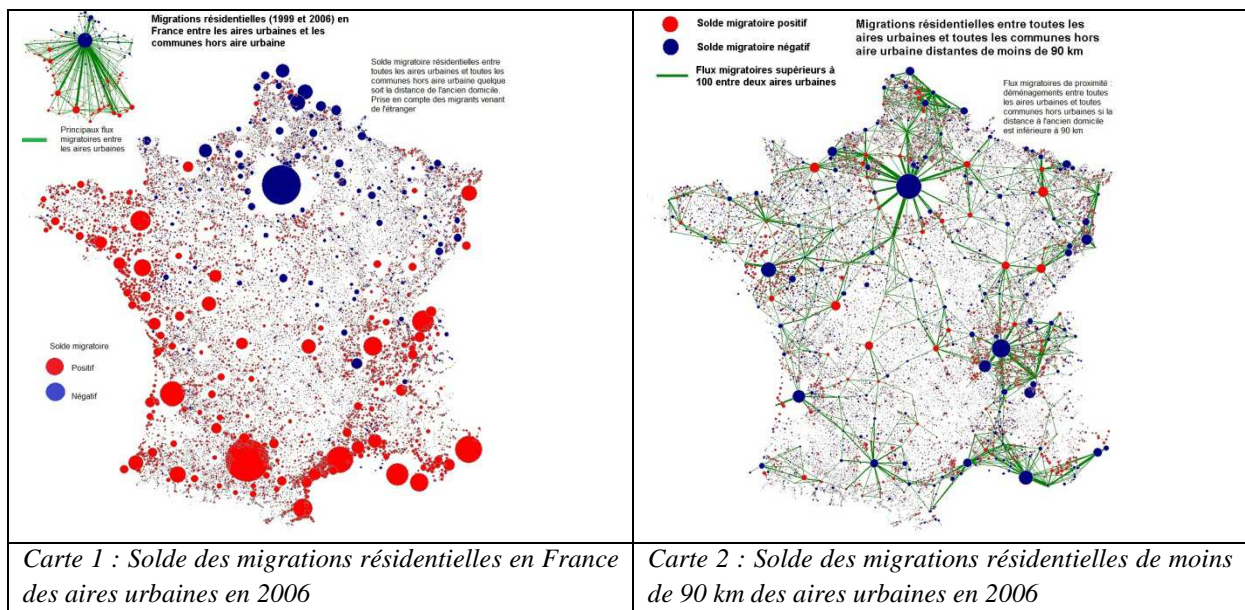


Figure 87 Migrations résidentielles en France

La carte 2 est plus subtile, elle ne calcule que les soldes migratoires de proximité. Nous avons calculé le solde migratoire uniquement entre les individus qui habitaient en France en 1999 et qui ont changé de domicile si et seulement si il était à moins de 90 km. On met ainsi en évidence les extensions des aires urbaines sur leur périphérie.

Une observation plus fine des migrations résidentielles (figure 91 : cartes 3 et 4) montre une extensification des aires urbaines sur leurs franges périphériques. On peut ainsi mettre en évidence une péri métropolisation. Non seulement, les centres urbains attirent, mais on assiste aussi à une migration de proximité allant du centre à la périphérie des aires urbaines.

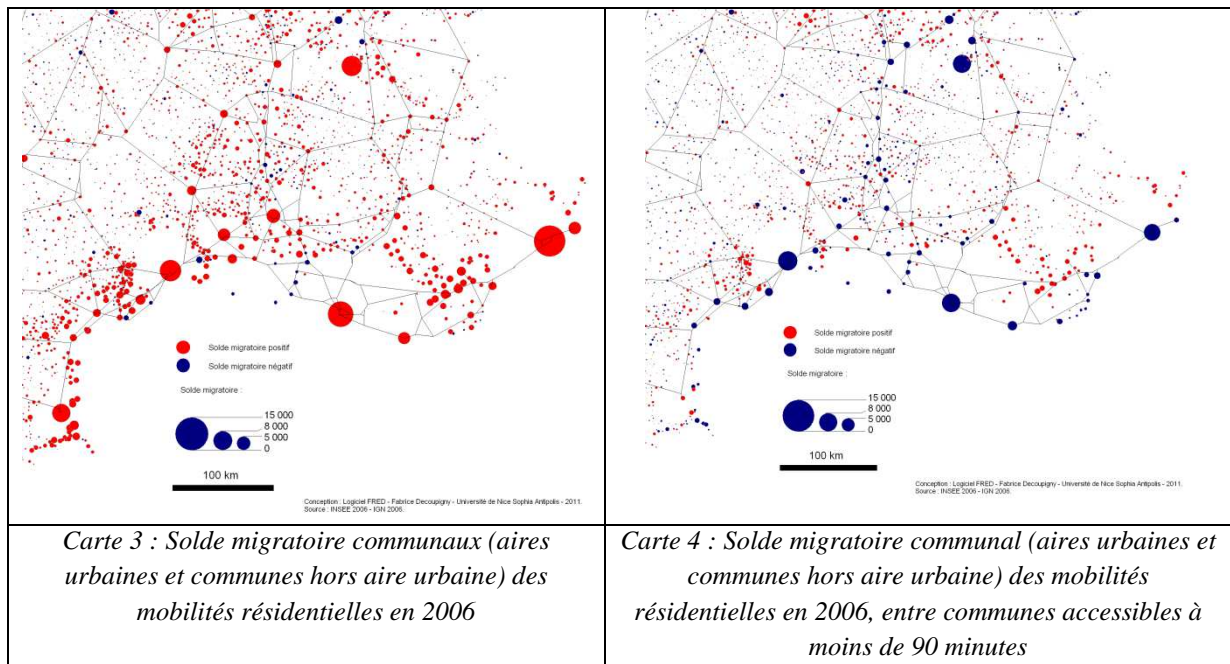


Figure 88 Migrations résidentielles sur l'espace méditerranéen.

L'INSEE prévoit près de 725 000 habitants supplémentaires sur la région PACA, d'ici 2040. Dans ce contexte de croissance et d'extension des territoires métropolitains, quels seraient les impacts d'une croissance démographique en fonction d'une politique d'urbanisation (densification urbaine ou étalement urbain) ou d'un changement de la structure du réseau de transport. Dans le cas de la région PACA, nous avons une forte dépendance à la voiture qui engendre un étalement urbain important qui entraîne une forte consommation d'espace.

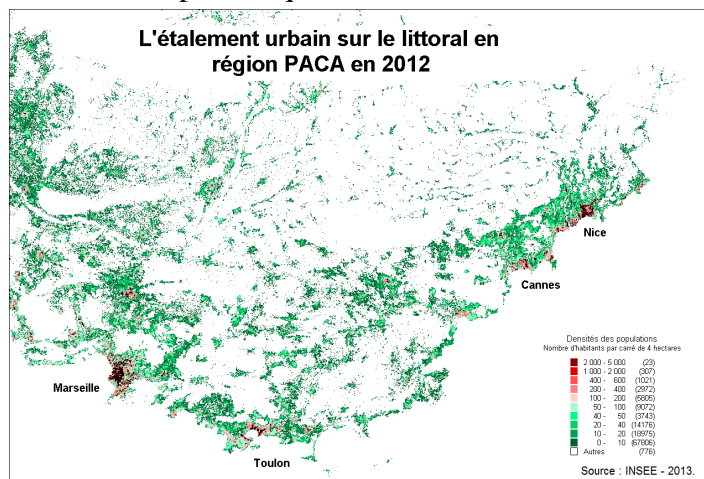


Figure 89 les densités urbaines sur la région PACA (fichier INSEE - carroyage -2012)

L'objectif du travail réalisé est de définir, dans un premier temps, la force qui s'exerce sur les réserves foncières et d'élaborer une formalisation des pressions qui y découlent. Ainsi, il sera alors possible d'évaluer spatialement la vulnérabilité des réserves foncières à l'urbanisation en fonction de la taille des unités spatiales et du poids du réseau.

Le travail réalisé consiste à simuler les pressions urbaines engendrées par une croissance démographique (issue des projections démographiques de l'INSEE en 2040) sur les

communes de la région PACA. Les résultats vont nous permettre de localiser les communes susceptibles de connaître les plus fortes pressions.

Nous nous servirons de ce modèle pour calculer et simuler les différentiels de pressions engendrées par un changement de la structure du réseau de transport.

Les principaux résultats sur les simulations de localisation des projections démographiques en 2040 montrent que la région PACA peut atteindre très rapidement une saturation de ses réserves foncières ce qui aura pour effet d'augmenter considérablement les pressions urbaines.

Nous allons réaliser trois types d'applications pour mesurer les effets des réseaux de villes sur les pressions urbaines :

- Scénario tendanciel (fil de l'eau). Il s'agit, ici, de simuler les tendances actuelles de l'extension des réseaux de villes sur le territoire et d'évaluer leurs impacts sur les pressions urbaines, en 2040, en fonction de la croissance démographique si les accessibilités et les densités restent plus ou moins constantes.
- Scénario radical de limitation des accessibilités et de densification. L'objectif est de simuler les impacts sur les pressions urbaines et de localiser les reports de pressions sur le territoire.
- Evaluation des effets d'une transformation du réseau routier. Il s'agit ici, d'étudier des effets de l'introduction d'un changement de la structure du réseau de transport (contournement routier de Nice) dans un système urbain fonctionnant en réseau de villes.

5.2. Pression urbaine et croissance urbaine sur un réseau de villes

5.2.1. Deux facteurs : la disponibilité des sols et l'accessibilité

Dans un réseau de villes, la croissance urbaine est dépendante de deux processus spatiaux à deux échelles distinctes. Le premier est l'urbanisation qui consiste soit à construire sur les réserves foncières (étalement urbain), soit à densifier le tissu urbain. Le second dépend de l'extension du réseau de villes induit par la mobilité qui permet de trouver des espaces libres à l'urbanisation.

Les travaux sur la croissance des espaces urbains ont bien montré que cette dernière s'opérait à différentes échelles, les villes construisant alors deux espaces (Pumain, 1997) : la ville et le système de villes. L'espace urbain croît simultanément sur deux niveaux d'organisation. Le premier représente l'espace local des fréquentations quotidiennes où les surfaces se spécialisent, c'est l'échelle de l'urbanisme. Le second niveau (système de villes) est l'échelle métropolitaine qui s'organise sur un territoire autour d'un réseau de villes (Lacour et Puissant, 1999 ; Ferrier, 2000 ; Moriconi-Ebrard, 2000 ; Gaschet et Lacour, 2002). Les différents travaux sur la croissance urbaine s'opérant sur les réseaux de villes se sont surtout attachés à décrire les structures réticulaires polycentriques et les hiérarchies urbaines afin d'analyser les dynamiques de croissance (Pumain, 1994 ; Rabino et Occelli, 1997 ; Cattan et Saint-Julien, 1998).

La structure en réseau de villes devient alors un facteur important de la croissance urbaine puisque les unités urbaines s'échangent mutuellement de l'attractivité par les interactions spatiales qu'elles entretiennent, ce qui a pour incidence l'essaimage de surfaces à construire.

Un des moyens d'appréhender ces interactions dans une analyse de réseau est d'introduire le concept d'accessibilité⁶ (Chapelon, 1996 ; Baptiste, 1998). La distance devient alors une variable d'état dans les calculs d'attractivités des unités spatiales.

Pondérée par la population, l'accessibilité est à la base des modèles gravitaires. Ces derniers permettent de calculer des potentiels d'interactions afin de déterminer des attractivités, des opportunités (Koenig, 1974), des flux potentiels (Hagestrand, 1957) ou des aires d'influence sur les espaces (Reilly, 1929 ; Huff, 1962 ; Hagett, 1973). Ainsi, il est possible, à travers des modèles gravitaires, d'intégrer les probabilités de mobilités et d'évaluer l'extension d'un réseau de villes sur un semis de point, et d'en déduire les capacités de croissances urbaines (Decoupigny et Fusco, 2009). Si ces modèles permettent d'avoir des résultats sur l'émergence de structures réticulaires et de leur extension, ils ne permettent pas pour autant d'évaluer la sensibilité des unités urbaines à accueillir une urbanisation. Or ce sont bien les pressions urbaines, s'exerçant dans un réseau de villes, que nous voulons définir, afin de localiser sur un territoire les unités urbaines les plus vulnérables à l'urbanisation.

Dans un contexte d'extension des tissus urbains, nous pouvons poser l'hypothèse que des espaces non urbanisés peuvent se distinguer dans les processus d'étalement urbain. Selon divers facteurs liés à leur propre contexte et à leur environnement immédiat, ils feront l'objet de pressions de différentes intensités. Ces espaces n'auront donc pas les mêmes potentialités et les mêmes risques d'être urbanisés selon leur place dans le réseau (accessibilité), leurs réserves foncières (surfaces disponibles) et la réglementation des sols (ouverture à l'urbanisation).

Au-delà des facteurs multiples de croissance d'un réseau de villes dépendant en grande partie des attractivités, les réserves foncières représentent un facteur limitant par défaut l'extension urbaine.

Il devient alors important d'identifier pour les territoires non construits, la sensibilité des surfaces à l'urbanisation dans une problématique de gestion économe de l'espace. Or, force est de constater que nous manquons d'indicateurs spatiaux quant à la détermination des risques et des aléas d'urbanisation. Un concept tente d'émerger en parlant de "pression urbaine" ou de "pression sur l'environnement" (Puissant et Weber, 2002 ; Ode et Fry, 2005 ; Chery, 2010).

Le processus de croissance urbaine qui s'opère sur un réseau de villes sous-tend une extension des réseaux sur des territoires moins urbanisés et entraîne alors un fort risque d'étalement urbain (Barattucci, 2006). La grande majorité de la bibliographie se référant à l'urbanisme et à ses diverses composantes emploie souvent le terme de pression sur tels ou tels espaces, qui serait l'une des causes principales de l'étalement urbain. De nombreuses études – notamment nord-américaines – se sont attachées à définir d'une manière scientifique l'*urban sprawl* et son impact sur les territoires (Herold *et al.*, 2003 ; Hasse et Lathrop, 2003). Il en ressort que l'étalement urbain dépend de la localisation (accessibilités aux centres urbains) et de la réglementation des sols à la construction. Dans tous les cas, ces travaux montrent que la croissance urbaine doit s'inscrire sur des territoires suffisamment élargis (ensemble de

⁶ L'accessibilité (Hansen, 1959 ; Huriot et Perreur, 1995) s'exprime sous la forme d'une fonction inverse de la distance ($1/d_{ij}$) et exprime la pénibilité pour aller d'un lieu (respectivement de tous les lieux), à un autre (respectivement à tous les autres).

communes, EPCI, PNR, territoire SCOT...), car l'étalement urbain d'une unité spatiale dépend de son poids et de sa localisation dans un réseau.

En revanche, le concept de pression demeure très ambigu. Généralement la pression urbaine est abordée, dans les travaux sur les croissances urbaines, en évaluant soit :

- les changements d'occupation des sols, la pression étant vue comme l'impact de la poussée urbaine sur les milieux naturels ou agricoles (Cabral, 2006 ; Laroche *et al.*, 2006) ou bien la propension à l'urbanisation des terres non urbanisées (Thinon *et al.*, 2007).
- en définissant la pression urbaine comme étant une densité, c'est-à-dire le rapport entre une quantité (nombre de logements, d'entreprises, d'habitants...) et une surface (Briquel *et al.*, 2007 ; Zwierzchowska, 2008). Plus la densité est forte, plus la pression est jugée importante.

Les études faites au sujet des indicateurs spatiaux et de leurs rôles dans le développement des espaces urbains (DRE Languedoc-Roussillon, 2003 ; Weber et Puissant, 2002 ; Overbeek et Ader, 2003 ; Bouma *et al.*, 1998 ; Lourenço *et al.*, 2002 ; Laroche *et al.*, 2006 ; Decoupigny, 2007) s'accordent sur le principe que d'une manière générale, la croissance urbaine est déterminée par deux paramètres (*forces conductrices*) socio-spatiaux majeurs :

- les dynamiques de populations, soulignées par l'augmentation de la densité et des mobilités,
- les modifications d'usage du sol, entraînant de ce fait une extension de la tâche urbaine sur des communes anciennement rurales qui changent de statut pour devenir urbaines.

D'une manière générale, ces analyses mettent en évidence un jeu de variables territoriales (socioéconomiques, spatiales et démographiques) qui engendrent une pression urbaine. La pression apparaît alors comme une conséquence des variations des indicateurs et non pas comme une cause d'un processus d'urbanisation. En définitive, la pression urbaine s'évalue a posteriori.

Nous sommes face à un processus qui s'opère à la fois sur un espace continu (surface disponible par commune) et un espace discret (le réseau de villes). Il est donc important lorsque l'on travaille sur la croissance urbaine, d'intégrer la variable spatiale de la surface dans les modèles, tant il apparaît évident que cette dernière semble être un facteur limitant par défaut ; pas de surface disponible, pas d'extension de la tâche urbaine possible.

Nous allons poser que chaque unité urbaine est soumise à une intensité (ou force) qui s'exerce sur son tissu urbain et sur les réserves foncières non urbanisées environnantes. Cette intensité, qui s'exerce sur deux niveaux d'organisation, est générée par deux forces :

- l'une interne : le poids de l'urbanisation de l'unité urbaine (à l'image de la quantité d'air existant dans un ballon)
- l'autre externe, c'est-à-dire le poids du réseau de villes auquel appartient l'unité urbaine (à l'image de la pression atmosphérique qui s'exerce sur le même ballon).

La pression qui va s'exercer sur les réserves foncières d'une commune sera une fonction composite des deux forces :

- la première interne qui correspond à la taille de la ville engendrée par une population répartie sur une surface bâtie ;

- la seconde externe qui correspond à la taille du réseau (étendue et accessibilités).

Par conséquent, on suppose que plus les unités urbaines seront urbanisées et importantes dans un réseau de villes composé de grandes unités urbaines, plus les pressions sur les tissus urbains et les réserves foncières seront importantes.

Nous allons aborder le problème uniquement sous l'angle spatial. Il n'est pas question de nier la dimension socio-économique des processus complexes à l'œuvre dans les milieux urbains, mais de poser que les formes d'occupation du sol traduisent de manières factuelles ces processus urbains complexes : l'espace occupé étant alors le résultat de ces processus.

5.2.2. Formalisation du modèle des pressions urbaines

En physique, le calcul de la pression s'apparente au rapport d'une force exercée sur une surface ($P = F/S$). Nous postulons que plus la concentration de la population sur un espace est forte et le territoire accessible, plus celui-ci sera soumis à une force importante : en conséquence, les espaces disponibles et constructibles d'une ville (les zones agricoles par exemple) seront d'autant plus fragiles aux forces en présence.

Il se présente sous sa forme générique comme suit :

$$IP_{commune_i} = \frac{(A_i \times P_i)}{S_{ri}} \text{ relation (1)}$$

S_{ri} est la surface des sols disponibles des communes, c'est-à-dire les superficies non urbanisées pouvant potentiellement servir de réserves foncières. Dans notre application, les réserves foncières correspondent à la surface des espaces naturels et agricoles existant dans un buffer de 1000 m autour de la tache urbaine.

A_i est la somme des interactions qu'exercent les communes voisines de i , c'est-à-dire l'intensité qui lie les communes entre elles dans le réseau. Il s'agit ici de postuler que le voisinage composé des communes limitrophes de i exerce des interactions d'autant plus fortes que la commune i se localise dans un réseau de villes plus ou moins dense et connecté.

$$A_i = \sum (P_j / d(i,j)^\alpha) \text{ pour tout } d(i,j) < d_{max} \text{ relation (2)}$$

Avec $d(i,j)$ la distance temps de déplacement voiture (chemin minimal calculé sur le graphe routier par l'algorithme de Floyd) séparant i et j , d_{max} la distance maximale de déplacement, α la rugosité de l'espace, P_i et P_j la population respectivement de i et j .

En d'autres termes, on va considérer que la force qui s'exerce sur chaque commune est donnée par une localisation dans le réseau de villes et sa masse. Par conséquent, chaque commune possède un poids dépendant de sa position relative dans le réseau (donc une force) qui s'exerce sur les réserves foncières.

On suppose ainsi, qu'en prenant en compte les différents paramètres (temps de déplacement, occupation du sol, réseaux routiers), il est possible d'appréhender les sensibilités communales à l'urbanisation en mesurant les pressions urbaines engendrées par la croissance métropolitaine.

La relation (1) peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$IP_{commune_i} = \frac{(AA_i \times P_i^2)}{S_{ri}} \text{ relation (3) avec } AA_i = \sum (P_j / d(i,j)^\alpha) \text{ et } S_{ri} \neq 0$$

Par conséquent, la pression urbaine qui s'exerce sur une commune i est le produit de la masse de la ville i (population) par le potentiel qu'exercent les communes voisines sur la commune i . On considère que l'indice de pression est dépendant de la densité relative des réserves foncières (P_i/S_i) de la relation (2). Plus ce rapport est grand, plus la pression est grande. Implicitement ce rapport tient compte d'un état de développement indépendamment de la surface urbanisée puisque la taille de la population est autocorrélée avec l'espace urbain. Le graphique ci-dessous montre bien que plus la ville est grande plus la surface des zones denses est grande.

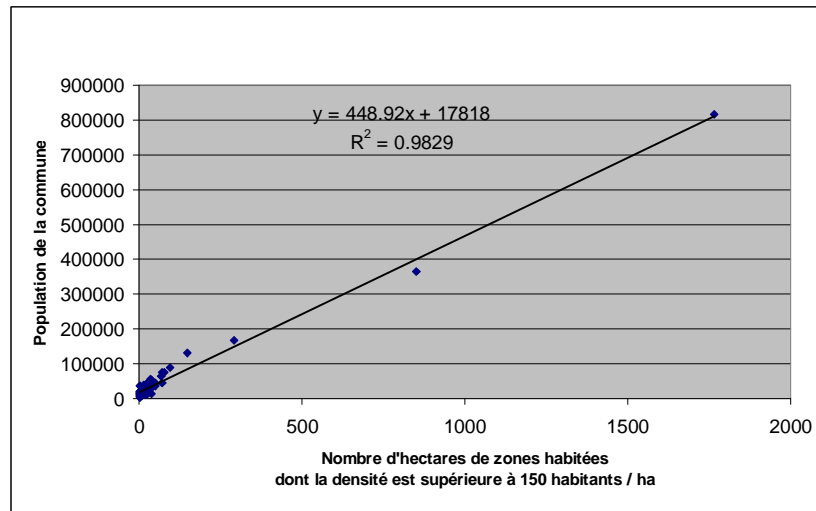


Figure 90 Tailles en population et surfaces densifiées des communes en région PACA (sources : INSEE 2006 – CLC 2006)

Si S_i est nulle, c'est-à-dire qu'il n'existe plus de réserve foncière, alors $IP=0$. On considère que la pression urbaine sur l'environnement est nulle. La commune n'est plus vulnérable à l'étalement urbain, puisque toutes ses réserves naturelles ont été consommées. Mais la commune continue à peser puisqu'elle rentre dans les calculs des AA_i des communes voisines⁷.

L'indice de pression IP calcule la vulnérabilité des espaces non construits à la pression urbaine. Cet indice peut varier de différentes manières. Si une commune i , entre deux périodes, ne connaît aucun changement (population et surfaces constantes), son IP variera si les communes dans le voisinage ont connu une extension urbaine. La commune i verra alors son AA_i , son IP et sa vulnérabilité augmenter. La fonction AA_i peut alors être appréhendée comme étant les forces d'urbanisation existant dans son voisinage. En définitive, le numérateur ($AA_i \times P_i^2$) calcule le poids (donc une force) de l'urbanisation qui va s'exercer sur la commune i .

⁷ C'est l'un des points à développer ultérieurement dans la poursuite du travail de recherche sur cet indice de pression en intégrant une surface résiduelle de réserve foncière qui serait issue de la densification de son tissu urbain existant. En effet, une ville n'arrête pas obligatoirement de croître parce que ses réserves en terres agricoles ou naturelles ont toutes été construites. Elle peut s'étendre en réhabilitant des friches ou en augmentant la hauteur des bâtiments dans son PLU.

Dès lors, il devient important de bien différencier la pression urbaine et la force attractive d'urbanisation. La pression ne détermine pas l'état d'urbanisation d'une commune, mais uniquement une dynamique qui s'exerce sur des espaces restés non construits.

Une réglementation d'occupation des sols contraignante sur une commune aura pour effet de limiter la constructibilité, mais aussi d'augmenter la pression sur le tissu urbain et les terrains restés ouverts à l'urbanisation. Deux cas peuvent alors se présenter entre deux périodes : le premier est une densification du tissu urbain, le second un report de la population sur les communes voisines.

L'indice de pression tient donc compte du voisinage afin de déterminer la vulnérabilité des réserves foncières sur une commune. Dans tous les calculs qui vont suivre, nous allons considérer que toutes les surfaces agricoles et naturelles sont des réserves foncières potentielles⁸.

5.2.3. Les pressions urbaines sur la région PACA

Paramétrage du modèle sur la région PACA

Le modèle de pression urbaine possède deux paramètres à calibrer : la distance maximale (d_{max}) d'interactions potentielles et la rugosité α des distances $d(i,j)$. Si on suppose qu'il existe une pression urbaine qui pèse sur les communes, alors elle doit être corrélée avec des évolutions territoriales observées entre deux périodes. Pour cela, nous avons testé plusieurs calibrages : les soldes des migrations résidentielles et le nombre de logements construits par commune.

Quatre bases de données ont été utilisées. Les surfaces sont données par la base de données Corine Land Cover de 2006 (CLC, 2006) et sont exprimées en hectare. Les données sur les populations (exprimées en milliers), les données sur les logements construits et les migrations résidentielles sont toutes issues du RGP de l'INSEE de 2006. Les réserves foncières (Sri) sont données par la somme des surfaces naturelles et agricoles.

⁸ Pour les développements ultérieurs du modèle, il est bien entendu que nous définirons plus précisément les réserves foncières en utilisant des bases de données plus précises que Corine Land Cover.

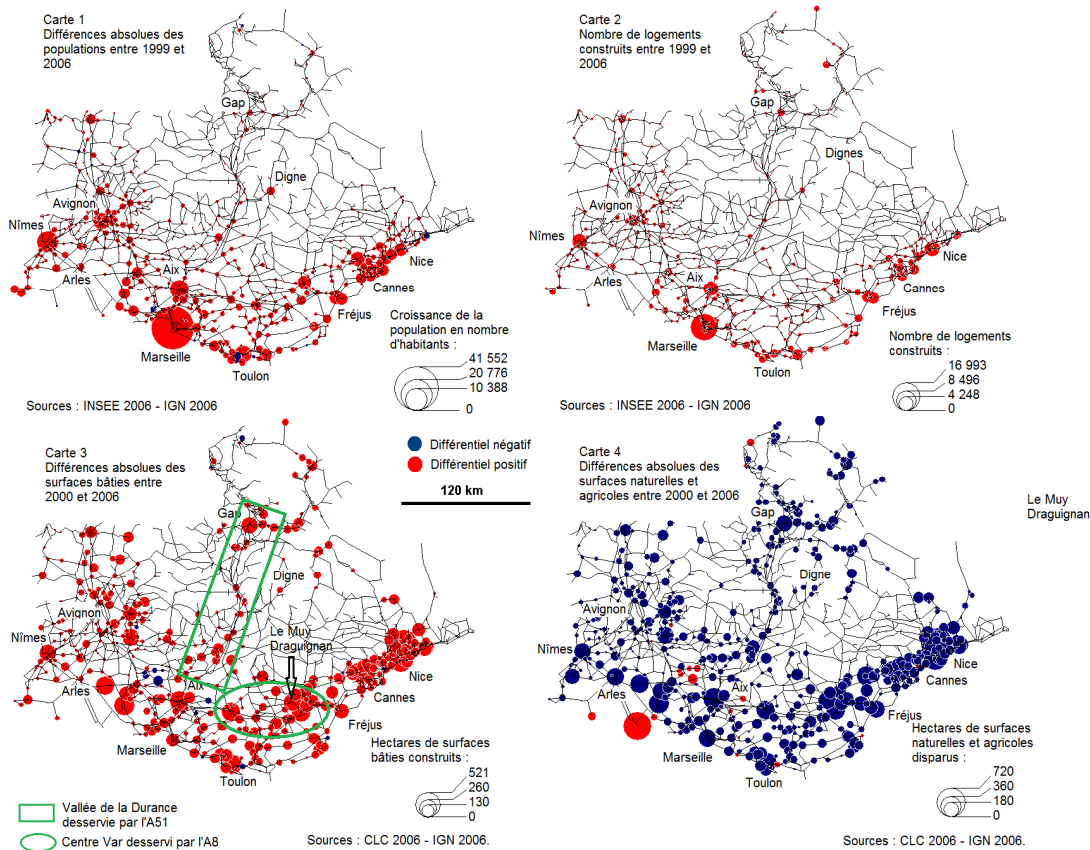


Figure 91 Evolution des variables du modèle entre 1999 et 2006

Les cartes ci-dessus montrent les variations (entre deux périodes censitaires) des variables que nous utilisons. Si, à première vue, la simple observation montre une continuité de la croissance urbaine (figure 94, cartes 1 et 2) le long du littoral et autour des grands pôles urbains avec un arrière-pays relativement protégé, la consommation d'espace semble toucher un territoire plus large (figure 94, cartes 3 et 4). Cet étalement urbain montre que l'urbanisation diffuse a touché les zones périphériques des grandes agglomérations de la région, mais aussi les communes localisées le long des autoroutes A8 (Draguignan, le Muy, Le Luc, Le Cannet des Maures...) et l'autoroute A51 qui dessert la vallée de la Durance.

L'introduction du calcul IP va nuancer les premières observations en montrant que la pression urbaine sur l'environnement est discriminante en se concentrant sur des territoires déterminés. La distance $d(i,j)$ (exprimée en minutes) est donnée par la matrice Origine / Destination des temps minimaux des déplacements en voiture sur un graphe routier et sont calculés par la plateforme de modélisation FRED (algorithme Floyd)⁹.

Le paramétrage est réalisé sur la totalité des communes de la région PACA et les communes limitrophes des départements voisins afin de réduire les effets de bords (soit 1215 communes). Nous avons calibré le différentiel de pression urbaine de 2006 et de 1999 (ΔIP

⁹ Logiciel de modélisation qui permet des calculs de fonctions gravitaires sur un graphe – conception Fabrice Decouigny.

$IP_{06-99} = IP_{06} - IP_{99}$)¹⁰ avec les migrations résidentielles et le nombre de logements construits sur la même période.

	Valeur des paramètres	Pas de
Dmax 1999 en minutes	0 à 120	5 minutes
Dmax 2006 en minutes	0 à 120	5 minutes
Alpha 1999	0 à 3	0.1
Alpha 2006	0 à 3	0.1
Nombre de simulations	51 840 600 combinaisons	

Figure 92 Combinaisons des variables du calibrage

Résultats

Si le calibrage réalisé avec les migrations résidentielles ne donne pas de résultats significatifs (R^2 non significatif variant entre 0.01 et 0.02), il en est tout autrement avec le nombre de logements construits par commune qui donne un R^2 égal à 0.7 (largement significatif pour un $\alpha=0.01$).

Ce premier résultat concernant la variable de calibrage est logique, car une grande part des logements construits se localise avant tout sur des réserves foncières libres de constructions. Par conséquent, plus le nombre de logements construits est grand, plus les réserves foncières tendent à diminuer et plus l'indice de pression croît.

$R^2 (\Delta IP_{06-99} // \text{Logements construits entre 1999 et 2006}) = 0.7$		
Paramètres	2006	1999
Distance max en minutes	71	52
Alpha	0,325	0.325

Figure 93 Résultats du paramétrage

Les résultats mettent en exergue une croissance de la pression sur les franges des réseaux de villes. On peut ainsi constater que la distance maximale des mobilités passe de 52 minutes à 71 minutes, cela veut dire que l'influence urbaine s'étend plus loin sur le territoire, et que la pression va atteindre des territoires en 2006 qui étaient épargnés en 1999. Ces résultats viennent corroborer les études qui montrent une croissance des aires urbaines de l'INSEE autour des grands pôles urbains en France (INSEE, 2010), la région PACA ne faisant pas exception.

La faible valeur de alpha (Alpha = 0.325) indique que l'accessibilité est moins soumise aux poids de la distance. De manière générale, cela a pour effet de lisser l'accessibilité en la rendant plus homogène sur le territoire. Ainsi, apparaissent des arrières pays à fortes

¹⁰ Le cas particulier où $Sri_{06} = 0$ et $Sri_{99} \neq 0$ donnerait une variation de pression négative et traduirait alors une baisse de la pression urbaine sur la commune. Ceci apparaît quelque peu contre intuitif, mais ce cas va traduire la saturation du tissu de la commune en question. Le cas ne s'est pas présenté dans nos bases de données. Si nous devions calibrer le modèle sur Paris et sa banlieue le cas se présenterait à plusieurs reprises et poserait un problème de calibrage. Comme nous le faisons remarquer plus haut dans le texte, en cas de saturation, nous avons besoin de déterminer une réserve foncière résiduelle (densification du tissu existant).

croissances de pression urbaine comme c'est le cas pour trois vallées de l'arrière pays niçois¹¹ (Tinée, Haut Var et la Roya, cf. figure 98). L'augmentation des temps d'accessibilité (de 52 à 71 minutes) a fait franchir un seuil qui leur a permis d'entrer dans l'espace métropolitain azuréen engendrant ainsi une forte hausse de leur indice de pression.

L'analyse géographique des résultats montre deux phénomènes distincts et complémentaires :

- sur les communes rurales des arrière-pays, l'émergence d'une hausse des pressions urbaines due à l'extension des réseaux de villes appartenant aux deux métropoles provençales (figure 98),
- sur les centres urbains du littoral des pressions urbaines qui restent très fortes (figure 99).

Ces deux phénomènes de croissance montrent que le processus métropolitain est en croissance soutenue autour des grands pôles urbains. Les espaces métropolitains se développent en densifiant leur tissu et en essaimant un étalement urbain sur les communes périphériques. Mais la structure spatiale de la pression qui s'exerce entre les pôles urbains peut être différente.

Pour les agglomérations de Marseille, Toulon et Avignon les pressions se concentrent sur la ville centre (cf. annexe). La distribution des pressions laisse apparaître une hiérarchisation entre les pôles urbains.

Part de la pression issue de la ville centre	Marseille	Toulon	Avignon	Nice
	87%	70%	53%	30%

Figure 94 Part de la pression contenue dans la ville centre

Ces agglomérations possèdent aussi une part importante d'espaces naturels sauvegardés (Sainte-Baume, Calanques, Conservatoire du littoral, Montagne Sainte-Victoire...). Par conséquent, le différentiel de pression entre les deux périodes censitaires s'explique surtout par une densification des zones habitées¹². Le différentiel de pression est plus dépendant des variations des "forces d'urbanisations" ($AA_i \times Pi^2$) que de la variation de l'occupation du sol, car une grande partie de ces espaces n'ont pas connu d'étalement urbain de par leur statut réglementaire. Ces résultats sont également observables autour de Fréjus - Saint Raphaël en raison de leur environnement protégé (site classé du Massif de l'Esterel).

Pour la métropole azurienne, la pression est partagée de manière plus homogène sur plusieurs pôles urbains (cf. annexe). Le différentiel de pression est surtout dû à la baisse des espaces libres (cf. les cartes 3 et 4 de la figure 94) engendrée par un étalement urbain soutenu entre 1999 et 2006.

Il est à noter que la pression sur les communes du littoral varois (entre Hyères et Fréjus) n'est pas aussi élevée. On aurait pu s'attendre à une explosion de la pression entre les deux périodes. Étant donné que cette partie du territoire est excentrée par rapport aux grands centres urbains, la pression reste contenue. Il est indéniable que cette situation peut apparaître

¹¹ Certaines communes connaissent des hausses de pression jusqu'à un multiple de 60 comme par exemple la commune d'Isola.

¹² Pour Aix-en-Provence, la taille des surfaces naturelles et agricoles (presque 15 000 ha) entraîne de facto une faible pression. A titre de comparaison, quand Aix-en-Provence consommait 400 ha (dont 300 ha de terres agricoles, soit 3 % de la surface de 1999), Nice construisait, sur les 3000 ha de zones naturelles et agricoles dont elle dispose, plus de 500 ha (dont 450 ha de terres agricoles soit 25 % de la surface de 1999).

contre-intuitive au regard de la pression touristique qui s'y applique l'été. Les chiffres de croissance (démographie, logements construits, surfaces naturelles et agricoles consommées de la figure 94) montrent en définitive que cet espace côtier varois subit moins de pression que les communes du centre Var desservies par l'autoroute A8.

Toutefois, il serait intéressant, dans des simulations prospectives, de vérifier si ce territoire est susceptible de voir sa situation évoluer.

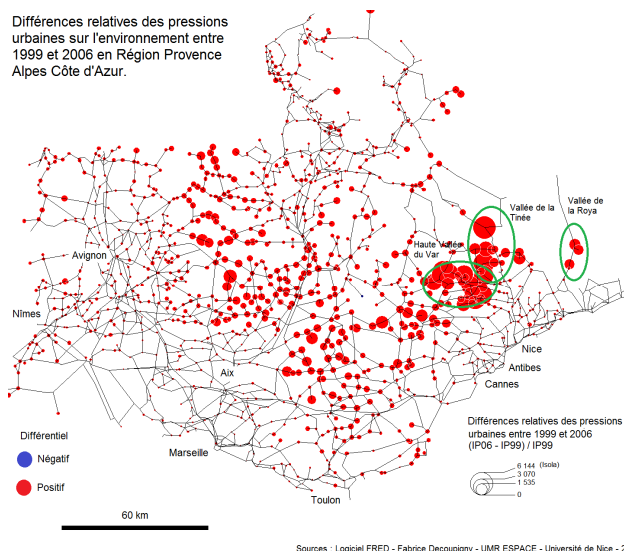


Figure 95 Variations relatives des pressions urbaines communales entre 1999 et 2006 (ΔIP_{06-99} en % par rapport à 1999)

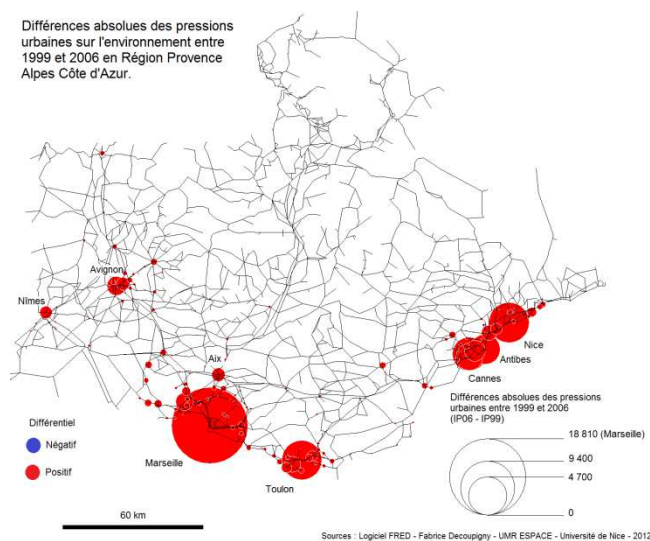


Figure 96 Variations absolues des pressions urbaines communales entre 1999 et 2006 (ΔIP_{06-99} en % par rapport à 1999)

On peut ainsi supposer qu'un système urbain en croissance va compiler deux types de changement. Le premier est quantitatif, il se traduit par une hausse de la pression urbaine, car les réserves foncières tendent à disparaître alors que la population augmente. Le second est qualitatif en rendant le poids de la distance moins important, ce qui aura pour effet de redistribuer la pression urbaine sur un territoire plus étendu.

En définitive, ces résultats mettent en exergue des enjeux émergents sur le territoire : où la pression est-elle susceptible de se focaliser à court et moyen termes ? La variation de l'indice de pression peut ainsi être utilisée comme un outil prospectif, en intégrant des changements en fonction de certains scénarios. Que se passerait-il si la distance d'accessibilité augmentait, c'est-à-dire que l'on augmente les distances déplacements ? Comment se reporteraient les pressions sur le réseau de villes si 50 % des terres étaient gelées ?

5.3. Prospective territoriale

Nous testons trois séries de simulations d'aménagement du territoire afin d'évaluer les effets des changements qui s'opèrent sur le réseau de villes.

Les deux premières séries de simulations ont pour objectif d'évaluer les pressions urbaines en 2040 engendrées par une croissance démographique. Dans la première (scénario fil de l'eau), on simule une évolution souple des politiques d'aménagements en matière d'urbanisation et d'accessibilités. En d'autres termes, on teste une évolution territoriale qui n'introduit pas de grands changements dans les réglementations des sols et dans l'utilisation de la voiture. On continue sur le modèle californien en essayant de le contrôler.

Dans la seconde série de simulations (scénario volontariste), il s'agit de tester des solutions volontaristes d'aménagement du territoire en limitant les accessibilités, l'étalement urbain en densifiant les zones urbanisables et les surfaces de réserves foncières disponibles à l'urbanisation. En d'autres termes, on teste, dans cette simulation, une politique volontariste de limiter le développement du modèle californien.

5.3.1. Modèle de croissance urbaine

Il ne s'agit pas de mettre en place un modèle de croissance et de dynamiques urbaines, mais de voir, en fonction de la capacité des communes à accueillir une croissance urbaine, la pression qui en résulte lorsque l'on fait varier la disponibilité des sols et les densités.

Le principe du modèle consiste à calculer dans un premier temps les attractivités territoriales des communes à partir d'un modèle gravitaire d'interactions en fonction. Puis on affecte la croissance démographique départementale au prorata de leur poids attractif pour chaque commune. Ainsi on obtient pour chaque commune, la croissance démographique en 2040. Etant donné que pour les six départements de la région PACA, les croissances départementales sont positives, il en résulte donc que toutes les communes possèdent une croissance démographique positive. Puis en fixant des taux de densification et des pourcentages d'ouverture des espaces naturels et agricoles, on obtient pour chaque commune les surfaces d'urbanisation.

Nous sommes conscients que ces conditions initiales sont relativement réductrices et ne prennent pas en compte la complexité des processus de localisation résidentielle des ménages. L'algorithme du modèle (figure 100) est constitué de quatre étapes qui vont chacune introduire les contraintes d'aménagement comme conditions initiales.

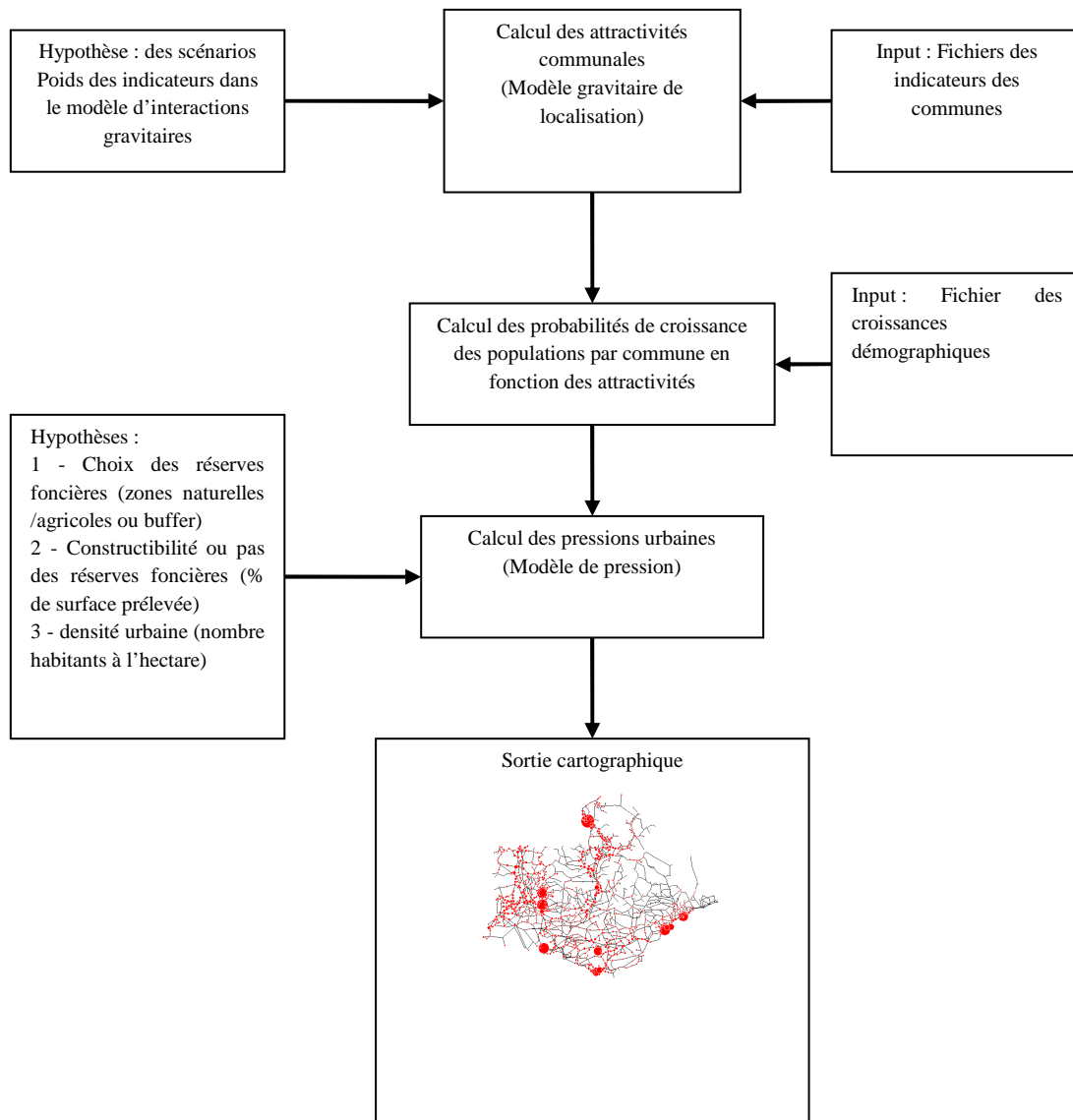


Figure 97 *Algorithme des simulations prospectives*

5.3.2. Prospective 2040

Scénario fil de l'eau

Il est question, ici de simuler des politiques d'aménagement qui vont dans le sens de la métropolisation et de l'extension des réseaux de villes qui couvrent un territoire où tous les espaces naturels et agricoles sont susceptibles d'être urbanisés à l'exception des espaces protégés.

- Fil de l'eau : les conditions d'urbanisation et d'accessibilité ne changent pas.
- Extension : impacts d'une augmentation des accessibilités avec des conditions de densification constante : on veut tester ici, une politique de développement de déplacement en augmentant les accessibilités. On va chercher les espaces plus loin ;
- Densification : impacts de la réduction de l'accessibilité avec une densification des zones construites : on évalue dans ce cas une politique volontariste de densification qui optimise les espaces ouverts à l'urbanisation.

Les simulations ont pour objectif de déterminer, sur un territoire, les espaces urbains qui verront leurs pressions urbaines évoluer en fonction des conditions d'ouverture d'espaces à l'urbanisation et des densités urbaines de constructibilité.

La projection démographique¹³ pour la région PACA donne 725 000 habitants supplémentaires pour 2040. Cela représente 15 % de population en plus. On fait donc l'hypothèse que cette croissance se fera avec une augmentation de 15 % de surfaces bâties.

Il ne s'agit pas de mettre en place un modèle de croissance et de dynamiques urbaines, mais de voir, en fonction de la capacité des communes à accueillir une croissance urbaine, la pression qui en résulte lorsque l'on fait varier la disponibilité des sols et les densités.

L'algorithme du modèle (figure ci-dessous) est constitué de quatre étapes qui vont chacune introduire les contraintes d'aménagement comme conditions initiales.

<p><i>Etape 1 : calcul, par commune, de la croissance de la surface urbanisée estimée en 2040 (Sbc_{40}) en fonction d'un taux de croissance général s'appliquant sur l'ensemble du territoire.</i></p>	<p>$Sbc_{40} = (Sb_{06} \times Txc) - Sb_{06}$ <i>Avec Sb_{06}: surface bâtie en 2006</i> <i>Txc, le taux de croissance de la surface bâtie ($Txc = 1.15$)</i> <i>Avec $Sb_{40} = Sbc_{40} + Sb_{06}$</i></p>
<p><i>Etape 2 : estimation des réserves foncières par commune en 2040 en fonction des croissances urbaines en tenant compte d'une politique d'ouverture d'espace à l'urbanisation qui fixe la surface maximale pouvant être urbanisée.</i></p>	<p>$Sri_{40} = (Sri_{06} / Tp)$ <i>Tp part des réserves foncières ouvertes à l'urbanisation ($Tp > 1$)</i></p>
<p><i>Etape 3 : estimation des populations communales en faisant varier la densité (habitants /ha) sur les surfaces bâties Sbc_{40}. Cette étape introduit dans le modèle la politique d'urbanisation en fixant une densité minimale des nouveaux espaces bâtis.</i></p>	<p><i>si $Sri_{06} > Sbc_{40}$ alors</i> $Pop_{40} = Pop_{06} + (Sbc_{40} \times D_{06} \times Tdc)$ <i>Avec Tdc : taux de densification du tissu urbain ($Tdc > 1$) et D_{06}, la densité d'habitants en 2006</i> <i>si $Sri_{06} < Sbc_{40}$ toutes les réserves foncières sont consommées alors</i> $Sb_{40} = Sri_{06} + Sb_{06}$ $Pop_{40} = Pop_{06} + (Sri_{06} \times D_{06} \times Tdc)$</p>
<p><i>Etape 4 : dans un dernier temps, on évalue le différentiel de pression (ΔIP) en fixant un temps de déplacement maximum pour les calculs des attractivités.</i></p>	<p>$\Delta IP = IP_{40i} - IP_{06i}$ $IP_{06i} = \frac{(A_{06i} \times P_{06i})}{Sri_{06}}$ et $IP_{40i} = \frac{(A_{40i} \times P_{40i})}{Sri_{40}}$ <i>si $Sri_{40} > 0$ alors $\Delta IP > 0$</i>¹⁴</p>

Figure 98 calcul des surfaces urbanisées dans le modèle

Dans un premier temps, quel peut être le total des populations accueillies si la part des réserves foncières (zones naturelles et agricoles) ouvertes à l'urbanisation et les densités urbaines¹⁵ varient. En fonction de l'état de l'urbanisation des communes, certaines d'entre elles seront saturées, car leurs réserves foncières ne pourront accueillir ces 15 % de surfaces bâties.

En effet, comme la population augmente dans toutes les communes, la surface urbaine augmente ainsi que Ai alors que les réserves foncières diminuent.

¹³ Projection de la population en 2040 (INSEE, 2011)

¹⁴ si $Sri_{06} < Sbc_{40}$ (cas particulier de la saturation), alors $Sri_{40} = 0$, donc $\Delta IP = - IP_{06i}$. La commune sera affectée d'un marqueur booléen de saturation. Si $Sbc_{40} > Sri_{06}$, la surface résiduelle ($Sbc_{40} - Sri_{06}$) n'est pas redistribuée sur les communes voisines.

¹⁵ Les densités d'habitants à l'hectare sont issues de la base de données de l'INSEE qui donne le nombre d'habitants sur des pixels de 200 par 200 mètres (données carroyées de la population - région PACA - INSEE, 2013), on peut obtenir pour chaque commune le détail des densités urbaines. La base de données utilisée est la base de donnée originale, téléchargée avant le 5 mars 2013, date à partir de la laquelle, elle a été "floutée" suite à une recommandation de la CNIL.

Le tableau ci-dessous montre que si les densités urbaines et les conditions d'accessibilité ne changent pas ($d_{\max 40} = d_{\max 06} = 70$ minutes et $\alpha_{06} = \alpha_{40} = 0.325$), la croissance démographique nécessite d'ouvrir toutes les surfaces à l'urbanisation.

% des réserves foncières (surfaces agricoles et naturelles) ouvertes à l'urbanisation	Densités urbaines de 2006 augmentées de			
	D06 ×1 Densité constante	10% D06 ×1.1	20% D06 ×1.2	50% D06 ×1.5
20	647	712	777	971
40	708	779	850	1062
50	714	785	856	1071
60	717	789	860	1076
80	721	793	865	1082
100	725	797	870	1087

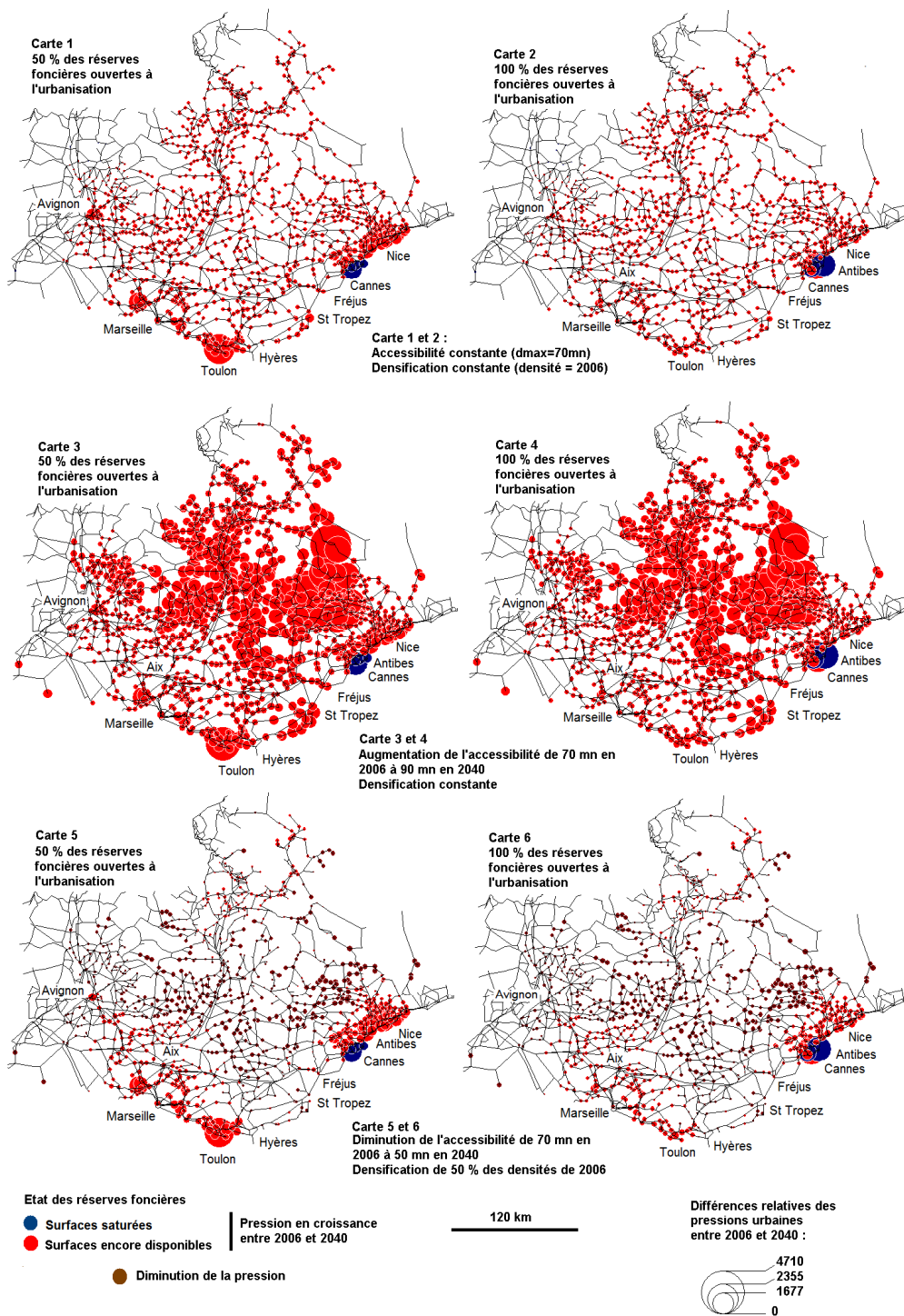
Figure 99 Estimation, en milliers, des populations pouvant être accueillies sur les communes de la région PACA

Dans ces conditions, seule une densification des zones urbanisées pourrait permettre d'accueillir un plus grand nombre d'habitants. Il est indéniable que si les conditions de constructibilité ne changent pas (accessibilité et densification des tissus urbains), le modèle montre que la région PACA souffrira d'un manque d'espace, car il faudra ouvrir toutes les réserves foncières pour accueillir les 725 000 habitants supplémentaires à l'horizon de 2040.

Simulation	$d_{\max 40}$	α_{40}	$d_{\max 06}$	α_{06}	% surfaces ouvertes à l'urbanisation	Densité des zones habitées	scénarios
Carte 1	70	0.325	70	0.325	50	$D_{06} \times 1$	Fil de l'eau
Carte 2	70	0.325	70	0.325	100	$D_{06} \times 1$	
Carte 3	90	0.325	70	0.325	50	$D_{06} \times 1$	Extension
Carte 4	90	0.325	70	0.325	100	$D_{06} \times 1$	
Carte 5	50	0.325	70	0.325	50	$D_{06} \times 1.5$	Densification
Carte 6	50	0.325	70	0.325	100	$D_{06} \times 1.5$	

Figure 100 Conditions initiales des simulations des cartes « Variations relatives des pressions urbaines communales entre 1999 et 2006 »

**Simulations de la pression urbaine en 2040 sur la région PACA
en fonction de l'ouverture à l'urbanisation des espaces naturels et agricoles**



Sources : Logiciel FRED - Fabrice Decoupigny - INSEE 2010 - CLC 2006 - Université de Nice 2013.

Figure 101 Simulations de la pression urbaine en 2040

Si les accessibilités restent constantes (cartes 1 et 2), ou baissent (cartes 5 et 6), les variations de pressions à la hausse se concentrent sur le littoral. Dès que les accessibilités augmentent, l'arrière-pays, en particulier celui de Nice, connaîtra une très forte hausse de sa pression urbaine.

Concernant la côte varoise entre Hyères et le golfe de Saint-Tropez, la pression n'augmente que si et seulement si l'accessibilité croît de 70 à 90 minutes. Par conséquent, si une route à grande capacité venant de Toulon (via Hyères) venait à être prolongée jusqu'à Fréjus en parallèle de l'actuelle autoroute A8, la pression ne peut que croître, car l'accessibilité aux deux métropoles sera plus grande. Ce territoire, actuellement excentré, connaîtra un changement structurel en intégrant les réseaux de villes des métropoles de Marseille et de Nice. Il s'agit du même processus d'intégration (par une hausse de l'accessibilité) que nous avons mis en évidence précédemment pour les vallées de l'arrière-pays niçois.

Pour Marseille, la pression chute fortement en fonction de l'ouverture ou pas de ses réserves foncières. Or, comme on l'avait vu précédemment une grande partie de ses espaces naturels sont protégés. Il est probable que, dans ces conditions, Marseille ne voit pas sa pression baisser puisqu'une grande partie de ses réserves foncières a été sanctuarisée avec la création du Parc National des Calanques.

Les unités urbaines qui subiront le plus de pressions se situent sur l'agglomération cannoise. En effet, il y a de fortes chances que ce territoire connaisse une rapide saturation de ses réserves foncières. Quelles que soient les conditions d'ouverture des réserves foncières à l'urbanisation et de la densification des zones habitées, la métropole azurée voit dans tous les cas une forte hausse des pressions urbaines. Si les politiques d'urbanisation ne visent à densifier que les nouvelles surfaces bâties, les simulations révèlent que les capacités d'accueil sont relativement limitées. Si les espaces urbains veulent se doter de capacités d'urbanisation supérieures, les politiques d'urbanisme doivent alors passer par des opérations de densification des tissus urbains existants et d'optimisation d'occupation du sol des zones d'habitat discontinu et diffus.

Scénario volontariste (ou raisonné)

Dans cette série de simulations, nous testons des mesures volontaristes d'aménagement du territoire sur la densification, l'accessibilité et la disponibilité des sols.

Nous allons donc fixer une densité minimale de 150 habitants à l'hectare qui correspond sensiblement à un COS de 1 qui permet d'obtenir un habitat individuel compact. En augmentant le poids de la distance et en abaissant la distance maximale de déplacement, on introduit une politique de limitation des déplacements qui consiste à polariser les localisations potentielles autour des pôles urbains. En jouant sur les disponibilités des sols, on limite les espaces urbanisables.

Faisons remarquer que ces mesures volontaristes ne sont pas des mesures radicales, mais correspondent à des hypothèses d'aménagement du territoire qui répondent à un développement raisonné du territoire en limitant la consommation d'espace tout en permettant aux espaces urbains de produire des formes urbaines de qualité. En effet, une densité de 150 habitants à l'hectare correspond à celle des écoquartiers tant à la mode dans les PLU.

La restriction de la disponibilité des sols se fait en limitant les réserves foncières à un buffer de 1000 m autour des surfaces des sols artificialisés qui correspondent à la tâche urbaine.

On suppose que les réserves foncières potentielles d'une commune se localisent autour des surfaces artificialisées. Pour cela on va calculer pour toutes les communes la surface des espaces agricoles et naturels existante dans un buffer de 1000 m autour de la tâche urbaine.

Dans les simulations précédentes, nous avons pris comme densité urbaine, la moyenne des habitants par pixel de 4 ha (fichier carroyage de l'INSEE). Si cette méthode de calcul faisait baisser fortement les densités, elle prenait, par contre, en compte le phénomène du mitage rural existant dans la région. Nous montrions ainsi qu'en continuant le mitage rural nous consommerions l'ensemble des réserves foncières en 2040.

Les densités urbaines pour cette série de simulations sont calculées par le rapport de la population sur la surface de la tache urbaine. Pour exemple, nous avons respectivement à Nice et Marseille 75 et 64 habitants à l'hectare en moyenne.

Par conséquent, les communes qui ne possèdent pas de surface de tache urbaine (449 sur les 1215 de notre graphe) ne pourront pas accueillir de surfaces urbanisables supplémentaires. On tient ainsi compte de manière implicite que les petites communes rurales possèdent des restrictions imposées par la loi montagne et littoral et que la croissance démographique de ces communes (en moyenne de 11%) peut être absorbée par le tissu rural existant.

Trois bases de données ont été utilisées. Les surfaces sont données par la base de données Corine Land Cover de 2006 (CLC-2006) et sont exprimées en hectare. Les données sur les populations (exprimées en milliers), RGP de l'INSEE de 2006. Les réserves foncières (Sri) sont données par la surface des espaces naturels et agricoles existantes dans un buffer de 1000m.

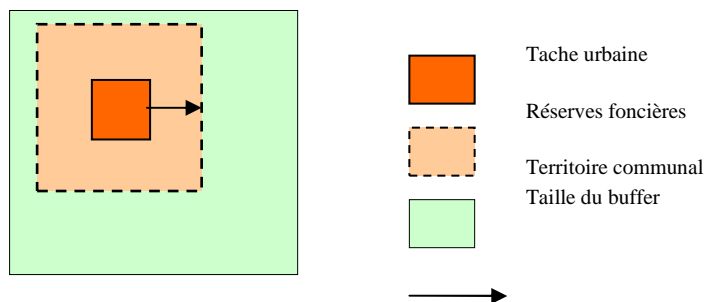


Figure 102 Réserves foncières calculées sur la base d'un buffer

Etant donné que la consommation par habitant des espaces naturels et agricoles est d'autant plus importante en milieu rural dans le moyen et haut pays, la mise en place d'une politique de densification passe aussi par la réduction des accessibilités afin de polariser les localisations des ménages sur les zones déjà urbanisées. En limitant l'accessibilité (en augmentant le poids de la distance et en diminuant les temps de déplacements maximum), on pose l'hypothèse que les centres urbains seront plus attractifs et les zones rurales moins.

Les calculs de calibrage précédents avaient donné un poids de la distance faible ($\alpha = 0.325$) qui induisait une forte baisse du poids de la distance dans le calcul des interactions et entraînait une pression croissante sur les territoires ruraux de l'arrière-pays.

La question que nous nous posons est la suivante : une baisse de l'accessibilité combinée avec une densification peut-elle faire décroître drastiquement les pressions urbaines ?

Conditions initiales des simulations :

	<i>Situation en 2006</i>	<i>Prospective 2040</i>
<i>accessibilité</i>	<i>Distance max = 71</i>	<i>Distance max = 50</i>
	<i>Alpha = 0.325</i>	<i>Alpha = 1</i>
<i>Densité des zones urbanisées dans les buffers.</i>	<i>Densité = 2006 (Population/surface bâties)</i>	<i>Densité = 150 hab/ha</i>
<i>Surface des réserves foncières</i>	<i>Surface buffer</i>	<i>Surface buffer restante après urbanisation</i>

Figure 103 Conditions initiales des simulations

Les résultats, ci-dessous, rendent compte de l'impact d'une politique de densification des espaces urbanisables sur la consommation des espaces. Pour une augmentation de 820 000 habitants¹⁶, le rapport est de 1 à 6 entre les deux scénarios. La surface totale des buffers est de 160 537 ha et la densité moyenne sur toute la région est de 23 habitants par hectare de tache urbaine.

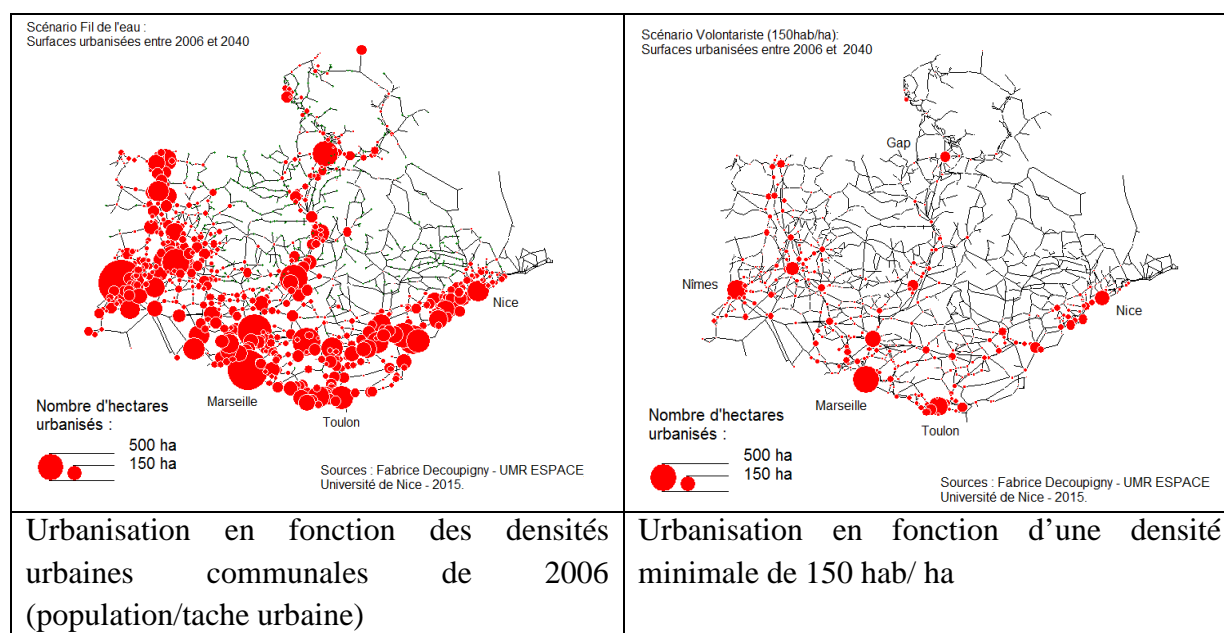


Figure 104 Consommation des réserves foncières en 2040

	<i>Scenario Fil de l'eau</i>	<i>Scenario volontariste</i>
<i>Densité</i>	<i>2006 (pop/tache urbaine)</i>	<i>150 habitants à l'hectare</i>
<i>Réserves foncières en 2040</i>	<i>124 177 ha</i>	<i>154 714 ha</i>
<i>Consommation d'espaces</i>	<i>36 360 ha</i>	<i>5 823 ha</i>

Figure 105 Différences des consommations des espaces naturels et agricoles entre les deux scénarios

¹⁶ Le chiffre de croissance démographique est supérieur aux précédentes simulations car nous avons intégré au graphe routier des communes des départements limitrophes afin de réduire les phénomènes de bords.

Faisons remarquer que les calculs de la consommation d'espaces avec les conditions initiales du scénario Fil de l'eau sont largement sous-estimés, car nous prenons en compte la densité moyenne de la tache urbaine (23hab/ha) et non la densité moyenne du tissu urbain discontinu et diffus souvent inférieure à 10 hab/ha.

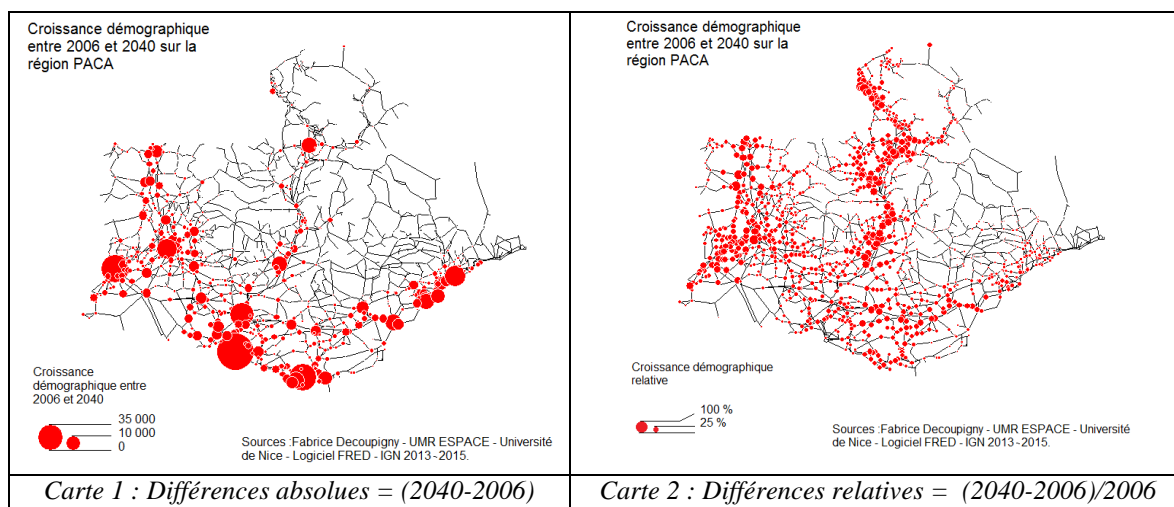
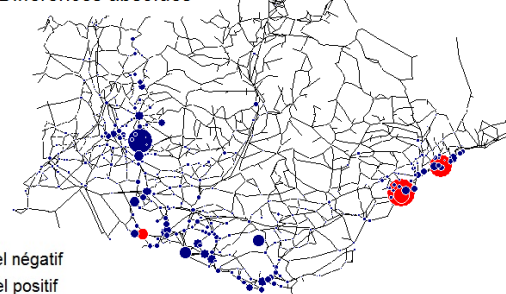
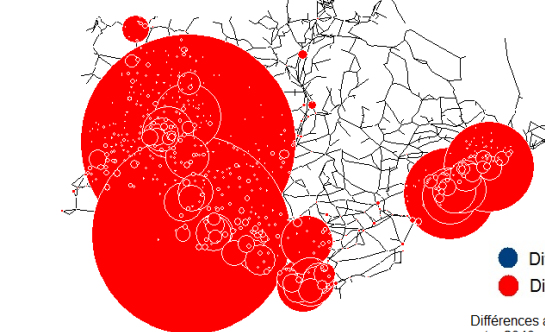


Figure 106 Projection des populations 2040

Différentiel des pressions urbaines entre 2040 et 2006

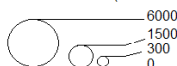
Scénario Fil de l'eau
Différences absolues

Scénario Volontariste
Différences absolues



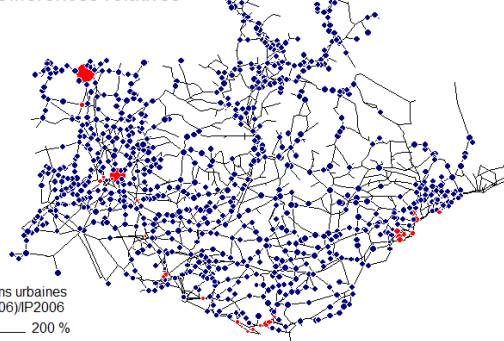
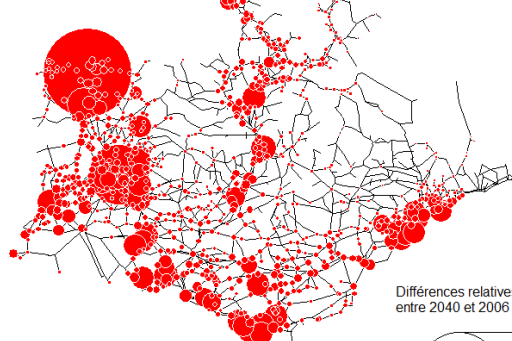
● Différentiel négatif
● Différentiel positif

Différences absolues des pressions urbaines entre 2040 et 2006 (IP2040-IP2006) :

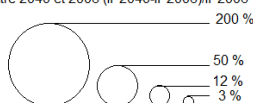


Scénario Fil de l'eau
Différences relatives

Scénario Volontariste
Différences relatives



Différences relatives des pressions urbaines entre 2040 et 2006 (IP2040/IP2006)



Sources : Fabrice Decoupigny - UMR ESPACE - Université de Nice - Logiciel FRED - IGN 2013-2015.

Figure 107 Evolutions es indices de pressions entre 2006 et 2040.

Les résultats concernant les simulations montrent que le scénario volontariste implique une baisse drastique des pressions urbaines sur l'ensemble de la région, à l'exception de cinq communes (quatre des Alpes Maritimes et une des Bouches-du-Rhône) qui voient leur pression augmenter : Cannes, Le Cannet, Beaulieu sur Mer, St Laurent du Var et Martigues.

5.3.3. Impacts du contournement routier de Nice

Dans cette simulation, il s'agit de calculer les effets de la transformation du réseau sur les pressions urbaines. La question est de savoir, dans le cas d'un projet de contournement routier de Nice, où se localisent les différentiels de pressions.

On reprend les conditions initiales des simulations précédentes (temps de déplacements = 71 minutes et $\alpha = 0.325$, et les surfaces des réserves foncières des communes = buffer 1000m). Le différentiel de pressions se fait à population constante. On ne prend en compte que la transformation du graphe afin de localiser les effets induits sur les pressions urbaines indépendamment de la croissance démographique.

L'idée générale est de localiser sur le territoire et dans les conditions actuelles, les communes les plus vulnérables à la pression urbaine afin d'avoir une photographie probable des zones pouvant connaître un risque de consommation des espaces naturels et agricoles.

Une grande part de la consommation d'espaces agricoles et naturels en périphérie des grandes villes est le fait d'un étalement urbain engendré par les zones commerciales aux entrées de ville et le développement de l'habitat individuel.

Le territoire des Alpes Maritimes possède la caractéristique d'être un des territoires les moins dotés en grandes surfaces commerciales et un des plus touchés par un étalement de l'habitat individuel avec des COS relativement faible. Pendant des années, les COS de 0.1, dans les communes rurales et périurbaines, étaient souvent de règle, accompagnés par des surfaces minimums de constructibilité égales à 2500 m².

Si depuis peu, les PLU tentent de limiter l'étalement urbain, il n'en est pas de même pour le développement des grandes surfaces.

Depuis 2008, date à partir de laquelle, on a remplacé les CDEC (commissions départementales d'équipement commercial) par les CDAC (commissions départementales d'aménagement commercial), on assiste à un rattrapage du développement des grandes surfaces. Ainsi, nous avons 430 000 m² d'équipements commerciaux qui sont en projet, d'ici 2020, sur le département (rappelons que Nice est la seule grande ville française voire européenne dans laquelle IKEA n'est pas implanté).



Figure 108 Projets de centres commerciaux sur le département des Alpes Maritimes (carte publiée : Nice Matin – 21 novembre 2014).

On peut ainsi constater que les projets se concentrent sur l'espace littoral et sur deux secteurs bien distincts : le premier sur l'agglomération niçoise et le second sur l'agglomération de Cannes. Ces deux secteurs n'ont pas été choisis au hasard, en effet ce sont ceux qui possèdent les plus grosses accessibilités voiture et se trouvent au centre de vastes zones de chalandise.

Depuis, un certain nombre d'années, il est question de créer un contournement routier de la métropole azurienne. Si ce projet prend différents noms, en fonction de la période (autoroute A8 bis, contournement routier de Nice...), il consiste essentiellement à doubler l'autoroute A8 existante dans sa partie la plus chargée (Antibes -Nice Est) en créant un échangeur pour desservir le parc technologique de Sophia Antipolis.

En utilisant un modèle gravitaire d'accessibilité, on peut ainsi aisément calculer les différences d'attractivités engendrées par une transformation majeure du réseau de transport et calculer les gains et pertes d'attractivité des communes sur la métropole azurienne (Decoupigny 2010¹⁷).

Le contournement routier permet de renforcer les accessibilités des communes qui composent le parc technologique de Sophia Antipolis. Mais il permet aussi à des communes du haut et moyen pays d'être connecté au réseau à la métropole.

¹⁷ DECOUPIGNY (Fabrice), 2010, Impacts d'une Infrastructure autoroutière sur un réseau de villes d'une métropole : le contournement routier de Nice, RTS (*Recherche, Transports Sécurité*), n° 102, pp 5-22.

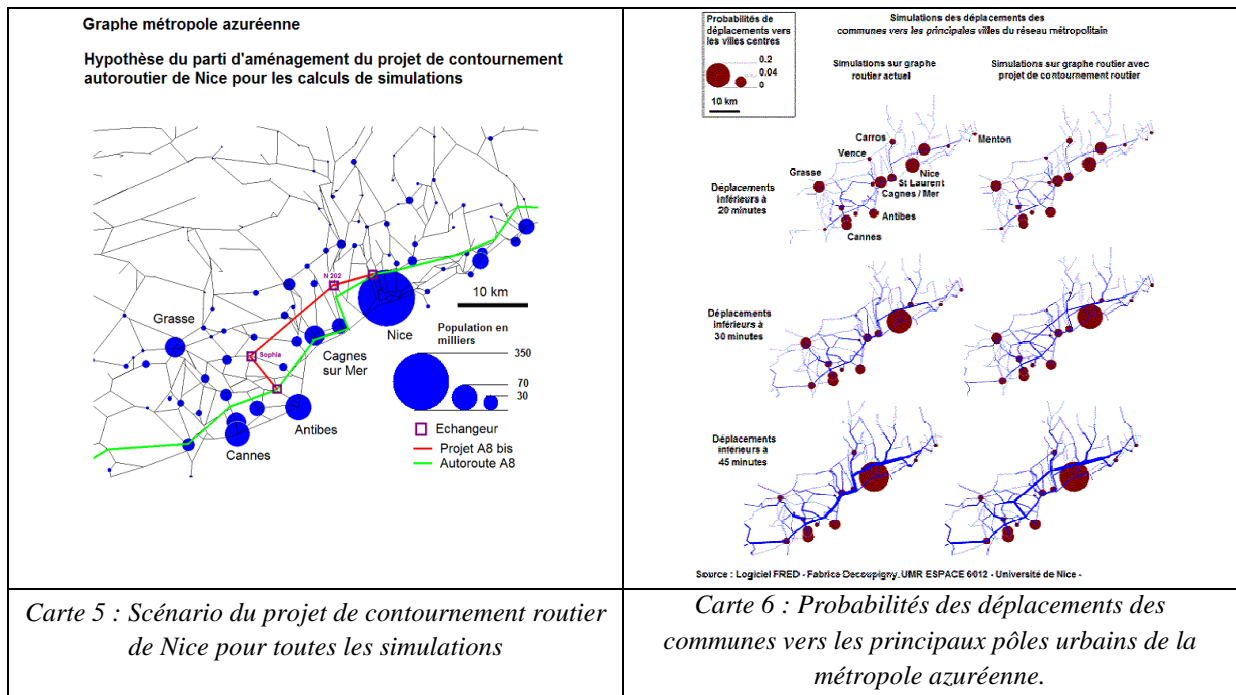


Figure 109 Accessibilités des communes de la métropole azurélienne avant et après le projet de contournement autoroutier de Nice

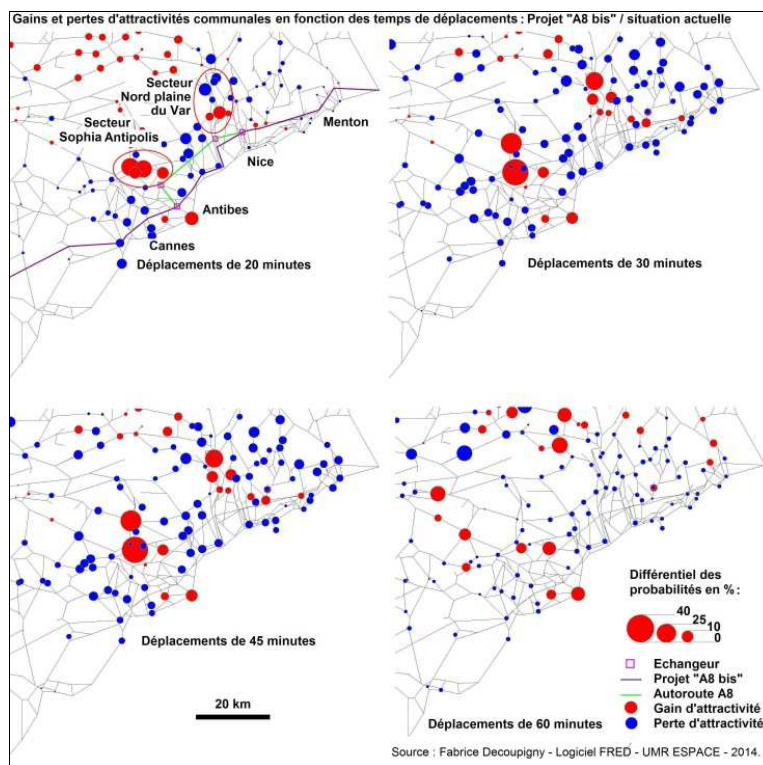


Figure 110 Impacts du contournement routier sur les attractivités communales de la métropole azurélienne

Les espaces urbains les plus touchés par une augmentation des pressions urbaines engendrées par contournement autoroutier restent les agglomérations de Nice et Cannes. Le contournement autoroutier bénéficie en premier lieu aux agglomérations les plus importantes de la métropole azurélienne.

5.4. Conclusion

Les résultats sur les scénarios de prospective permettent d'obtenir des tendances de développement urbain sur la région PACA en concluant sur le fait que la croissance urbaine passe par une politique d'urbanisme de densification des tissus urbains existants. Les simulations mettent bien en évidence un manque de réserves foncières disponibles puisque si on continue l'étalement urbain sur le même rythme, en 2040, il faudra urbaniser 100 % des surfaces naturelles et agricoles des unités urbaines pour accueillir les nouveaux habitants

Il ne suffit pas de baisser les accessibilités dans un réseau de villes pour limiter son extension. En effet, si on polarise le développement sans intervenir sur les densités urbaines, on risque de consommer rapidement les réserves foncières et d'arriver à une saturation rapide. Dans ces conditions, le réseau de villes continuera son extension en allant chercher dans les communes périphériques des espaces libres.

Les simulations montrent l'importance des politiques publiques en matière de réglementation des sols. Si le modèle californien continue à être le modèle dominant dans la région, les villes devront consacrer, à terme, de forts et coûteux investissements dans des opérations de densification du tissu urbain existant afin de garder un niveau d'attractivité suffisant.

Bilan :

En posant l'hypothèse que la pression urbaine, s'exerçant sur les réserves foncières, était engendrée par deux variables spatiales (disponibilité des sols et les accessibilités), il est possible de déterminer les sensibilités des territoires aux effets de la croissance urbaine en tenant compte des processus multi échelles des croissances sur un réseau de villes.

La modélisation de l'indice de pression et le calibrage de l'accessibilité entre 1999 et 2006 ont montré :

- une extension des réseaux de villes métropolitains avec une croissance des accessibilités (passant de 50 à 71 minutes) et vient corroborer le solde positif des migrations résidentielles sur les franges métropolitaines

- Le poids de la distance reste faible ($\alpha = 0.325$), ceci montre que les distances de déplacements ne sont pas discriminantes sur le territoire et permet à la région de posséder une accessibilité relativement homogène. Le fait que cet indice ne change pas entre 1999 et 2006 montre que le réseau de transport n'a pas connu de changement structurel.

- Si la pression urbaine se concentre sur les pôles urbains métropolitains, on constate toutefois une croissance des pressions urbaines dans les zones péri-métropolitaine car l'augmentation des temps de déplacement permet à ces zones d'être connectées aux espaces métropolitains.

Les simulations des scénarios d'aménagement ont montré que le principal vecteur de la pression urbaine était la hausse des accessibilités qui implique une forte hausse des pressions sur les franges métropolitaines. De plus la hausse des densités urbaines n'est pas suffisante pour faire baisser la pression, c'est en la combinant avec une baisse de l'accessibilité que l'on voit une baisse des pressions urbaines.

- Pour le scénario « Fil de l'eau », la principale tendance est de voir apparaître une saturation des réserves foncières si on continue à sous-densifier les espaces urbanisés. Nous ne sommes pas loin d'un scénario catastrophe en voyant pour 2040 l'ensemble du territoire colonisé par un habitat discontinu ou diffus.

- Pour le scénario « Volontariste », en simulant une densification (150 hab/ha) des zones urbanisables, on montre que l'on sauvegarde les réserves foncières. Le fait de limiter les accessibilités n'engendre pas pour autant une hausse des pressions sur les pôles urbains. C'est la baisse des accessibilités couplée avec une densification qui fait baisser drastiquement les pressions urbaines sur les réseaux de villes des métropoles provençales.

- Les simulations des impacts du contournement routier de Nice montrent que les pressions urbaines se trouvent renforcées sur les principaux pôles urbains de la métropole azurienne. Bien que certaines communes de l'arrière-pays connaîtront une hausse des pressions urbaines, car elles se retrouvent connectées au réseau métropolitain, ces augmentations restent à la marge. Ce résultat est dû au fait que le contournement routier ne vient que doubler l'actuelle autoroute et ne fait relier des pôles urbains entre eux (Nice /Antibes) et n'implique pas un changement structurel des déplacements sur la métropole qui restent orientés est – ouest. Il en aurait été tout autrement si l'autoroute avait été orienté Nord/sud.

5.5. Bibliographie

Antoni J.-Ph., 2006, "Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort ", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 347, mis en ligne le 19 juillet 2006.

Barattucci C., 2006, *L'urbanisations dispersées. Interprétations / actions, France et Italie 1950-200*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, Espace et Territoire.

Berroir S., Mathian H., Saint-Julien Th. et Sanders L., 2004, *Mobilités et polarisations : vers des métropoles polycentriques. Le cas des métropoles francilienne et méditerranéenne*, PUCA, Pôle Sociétés urbaines, Habitat et Territoires.

Bonnafous A, Bussière Y. 1993, "Transport et étalement urbain : les enjeux", *Les chemins de la Recherche*, No. 13, INRS – Urbanisation, LET.

Cattan N., Saint-Julien Th., 1998, "Modèles de l'intégration spatiale et réseau des villes en Europe occidentale", *L'Espace géographique*, No.1, 1-10.

Chapelon L., 1996, "Modélisation multi échelle des réseaux : vers une plus grande précision de l'accessibilité", *Mappemonde*, No.3, 28-36.

Decoupigny F., Fusco G., 2009, "Mobilités potentielles et émergence de structures réticulaires en région Provence Alpes Côte d'Azur", *L'Espace géographique*, Tome 38, No.3, 267-282.

Decoupigny F., 2007, "Métropolisation des espaces naturels et indicateurs de localisation résidentielle en Région Provence Alpes Côte d'Azur", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, No.4, 589-608.

Djellouli Y., Emeliano C., Ben Nasr A. et Chevalier J., 2010, *L'étalement urbain*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.

- Gomez-Navarro T., Garcia-Melón M., Acuña-Dutra S., Díaz-Martín D., 2009, "An environmental pressure index proposal for urban development planning based on the analytic network process", *Environmental Impact Assessment Review*, No.29, 319–329.
- Hasse J.E., Lathrop R., 2003, "Land resource and indicators of urban sprawl", *Applied Geography*, No.23, 159-175.
- Herold M., Goldstein N. C., Clarke K. C., 2003, "The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling", *Martin Remote Sensing of Environment*, No.288-86, 286-302.
- Hansen W.G., 1959. "How accessibility shapes land use", *Journal of the American Institute of Planners*, No.25, 73-76.
- Huff J.L., 1962, *Determination of intra-urban retail trade areas*, Los Angeles, University of California, Real Estate Research Program.
- Kipnis B., 1985, "Graph Analysis of Metropolitan Residential Mobility: Methodology and Theoretical Implications", *Urban Studies*, No.22, 179-187.
- Koenig G., 1974, "Théorie économique de l'accessibilité urbaine", *Revue économique*, Vol. 25, No.2, 275-297.
- Laroche B., Thorette J., Lacassin J.-Cl., 2006, "L'artificialisation des sols : pressions urbaines et inventaire des sols", *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 13, No.3, 223-235.
- Ode A., Fry G., 2006, "A Model for Quantifying and Predicting Urban Pressure on Woodland", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 77, 17-27.
- Paulus F., Pumain D., 2002, "Répartition de la croissance dans le système des villes françaises", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, No.1, 35-48.
- Pumain D., 1994, *La modélisation des réseaux urbains*, Rapport pour le PIR Villes, Paris, 15 p.
- Pumain D., 1997, "Pour une théorie évolutive des villes", *L'Espace géographique*, Tome 26, No.2, 119-134.
- Rabino G., Occelli S., 1997, "Understanding spatial structure from network data: theoretical considerations and applications", *Cybergeo* : <http://cybergeo.revues.org>, No.29, 26 juin 1997.
- LEI Wageningen UR, 2006, "Rural areas under urban pressure ; Case studies of rural-urban relationships across Europe", *Overbeek, M.M.M. and I.J. Terluin (eds.)*, The Hague, Agricultural Economics Research Institute (LEI). Report 7.06.01, 249 p.
- Sudhiraa H.S., Ramachandraa T.V., Jagadish K.S., 2004, "Urban sprawl, metrics, dynamics and modelling using GIS", *International Journal of Applied Earth Observation*, No.5, 29-39.

6. Conclusion

En étudiant les effets de la structure des réseaux routiers sur les dynamiques de localisation et les pratiques de mobilité liées, le projet DAMA a permis :

1. De montrer que les réseaux routiers n'étaient pas que de simples supports passifs des déplacements mais qu'au contraire il avait une influence majeure :

- sur les localisations des aménités (les logiques des localisations commerciales en lien avec la structure des réseaux ont particulièrement été explorées)

- sur les pratiques de mobilité, et les externalités qui y sont liées (comme les émissions de polluants), ces pratiques étant elles-mêmes liées aux localisations dans une perspective systémique. Ainsi, les réseaux aux vitesses plus faibles, plus homogènes et à la connectivité forte apparaissent comme intrinsèquement plus favorables à une partage modal moins en faveur de l'automobile.

Pour une construction de territoire plus durables, les réseaux routiers doivent donc être envisagés globalement par les décideurs qui doivent en connaître les externalités en fonction de leurs caractéristiques morpho-fonctionnelles, et non pas seulement à l'échelle de l'infrastructure projetée, qu'elle qu'en soit l'échelle, ou à l'échelle à laquelle s'exerce la compétence administrative sur les réseaux.

2. Qu'il était possible de produire de bons niveaux d'accessibilité sans recourir à la vitesse en jouant sur les localisations des aménités. La démonstration a été faite avec le cas de la rocade rapide de l'Anneau des Sciences du Grand Lyon pour laquelle nous avons pu montrer que l'amélioration de l'accessibilité à l'emploi qu'apporterait cette infrastructure prévue pour 2028 pouvait être assez aisément obtenue en (re)localisant de façon optimale un nombre relativement réduit d'emplois. L'important est ici d'illustrer que l'accessibilité est faite à la fois de localisations et de vitesse et que de ce fait politiques de transport et d'aménagement doivent être définies simultanément.

3. De démontrer l'importance de la structure des réseaux routiers sur les localisations commerciales à travers l'étude du cas de la métropole niçoise. Des réseaux plus connectifs apparaissent là encore plus propices à une diffusion du potentiel commercial permettant à termes d'éviter les grandes concentrations commerciales périphériques liées à la voiture et les mobilités mécanisées afférentes. Une structure du réseau routier adéquate est donc un élément majeur pour créer les conditions de possibilité pour des mobilités de proximité (ici liées aux commerces), et in fine une mobilité plus durable, qui ne se décrète pas mais que l'on doit favoriser à travers les structures territoriales.

4. De montrer qu'une ville lente, avec une accessibilité moins automobile et qui satisfasse les individus est possible sans pour autant investir massivement dans l'offre de transport public. Le couplage d'un système multi-agents et de méthodes de localisation optimale appliqué à l'agglomération zurichoise, a en effet permis de montrer qu'en limitant les vitesses automobiles et en agissant simultanément sur les localisations, qu'il était possible d'obtenir des programmes d'activités quotidiens pour les individus qui soient davantage basés sur la

proximité et par conséquent moins dépendant de l'automobile et qui apportent pour autant satisfaction à l'échelle individuelle.

Bien entendu ces démonstrations, comme celle sur l'Anneau des sciences, ont un but heuristique : montrer qu'une mobilité plus durable et possible et que si l'offre de transport public en est une composante nécessaire elle n'est pas pour autant suffisante. La difficulté pratique tient ici au fait qu'agir conjointement sur le système de transport et le système de localisation fait appel à de nombreux acteurs, aux intérêts parfois divergents, dont la coordination est difficile, ce qui explique sans doute que la solution de « facilité » qui est celle de l'investissement (routier ou en transport public) soit souvent privilégiée même si elle n'est pas nécessairement optimale.

5. De montrer que la configuration des réseaux routiers déterminait aussi en partie les dynamiques à l'échelle des systèmes de villes à travers les différentiels d'accessibilité, et in fine d'attractivité, qu'elle génère. Un indicateur de pression urbaine sur les espaces non construits qui indique où la ville « risque » de s'étendre a été créé en utilisant notamment les deux variables que sont la disponibilité des terrains et les accessibilités. Cet indicateur a été calculé à l'échelle de la région PACA pour différents scénarios d'aménagement et de transport. On a pu alors voir que si une baisse des vitesses ne suffit pas à limiter le développement urbain à l'échelle du réseau de ville, elle conditionne en revanche partiellement l'intensité et la répartition de la croissance urbaine, en définissant en particulier jusqu'où (dans quelles franges) elle s'exerce. Limiter la pression urbaine sur les espaces libres apparaît ici devoir passer par une action conjointe visant à une diminution des niveaux d'accessibilité (notamment à longue portée) et par une augmentation des densités locales.

Outre des résultats thématiques, le projet DAMA a permis de produire plusieurs méthodes et outils innovants, à utiliser notamment dans une logique exploratoire :

- un logiciel permettant de faire de l'accessibility planning et pouvant être mobilisé pour de l'évaluation d'infrastructure. Ce logiciel, pour une situation donnée, permet en effet de donner l'ampleur des relocalisations à opérer pour obtenir un niveau d'accessibilité donné (par exemple celui qu'on aurait avec une nouvelle infrastructure. Il dit donc à quelle condition on peut se passer de l'infrastructure !) ou encore de trouver le moyen de maximiser ces niveaux d'accessibilité.
- Une méthode de définition du potentiel commercial local ainsi qu'une application informatique à base de règles modifiant les réseaux routiers pour augmenter localement ce potentiel et en limiter la concentration locale. Cet outil sera notamment mis à disposition des Chambres de Commerces et d'Industrie pour savoir où localiser les commerces pour maximiser leur chance de survie, ou encore comment modifier le réseau pour que les commerces implantés vivent mieux.
- Un simulateur couplant le système multiagents Matsim, déjà appliqué en milieu professionnel depuis quelques années, et des méthodes de (re)localisation optimale. Cette plateforme offre les moyens de travailler de façon simultanée et coordonnée sur la politique de transport et sur la politique d'aménagement pour mettre en place une mobilité plus durable.

- Un outil permettant de définir de façon prospective les espaces soumis à la pression urbaine à l'échelle des réseaux de villes, et permettant d'explorer les effets de différents leviers visant à réduire cette pression, qu'ils relèvent de la politique de transport (travail sur les vitesses) ou de la politique d'aménagement (hausse des densités urbaines).

Une part importante des connaissances et des outils produits dans DAMA vont être réemployés et développés dans le cadre d'un projet européen de coopération subsaharienne H2020, notamment pour travailler sur l'aménagement à moyen et long terme de la métropole de DAKAR.

Table des figures

figure 1	la demarche stress test du projet dama	8
figure 2	le projet d'anneau des sciences	16
figure 3	evolution de l'accessibilite gravitaire a l'iris avec l'anneau des sciences	17
figure 4	accessibilite a l'emploi pour differents scenarios	21
figure 5	evolution de l'accessibilite a l'iris consecutive au processus de relocalisation des emplois	22
figure 6	atteindre un niveau d'accessibilite donne en minimisant le nombre d'emplois a relocaliser	23
figure 7	relocalisation et evolution de l'accessibilite selon son mode de calcul	25
figure 8	relocalisation de l'emploi 2030 en maximisant le niveau d'accessibilite pour chaque metre carre du territoire	26
figure 9	vitesse et accessibilite	27
figure 10	relocalisation et accessibilite	27
figure 11	demarche generale de la recherche.	34
figure 12	l'aire d'etude	35
figure 13	reseau viaire et reseau exclusivement routier dans l'aire d'etude.	36
figure 14	repartition des commerces de pied d'immeuble dans l'aire d'etude.	38
figure 15	representation graphique de l'indice de centralite de reach.	39
figure 16	representation graphique de l'indice de centralite de proximite (closeness).	40
figure 17	representation graphique de l'indice d'accessibilite rectiligneaire (straightness).	41
figure 18	representation graphique de l'indice de centralite d'intermediarite (betweenness).	42
figure 19	les deplacements vers les petits et moyens commerces dans l'aire d'etude (source: emd 2008)	44
figure 20	recapitulatif des indicateurs de mca et de leurs rayons de calcul.	46
figure 21	impact de la definition des points batis sur le calcul des interpolations idw.	49
figure 22	les problemes du couplage una/sanet : a gauche, le manque de rayon maximal dans la recherche de valeurs a interpoler ; a droite, la non-prise en compte des distances-temps.	50
figure 23	recherche de ly avec bandwidth h sur le reseau $n=(v,l)$ (source : okabe et al. 2006)	51
figure 24	typologie de fonctions de kernel : (a) centre de la fonction coïncidant avec le point modal ; (b) centre non coïncidant ; (c) fonction discontinue aux nœuds (source : okabe et al. 2006)	51
figure 25	representation graphique de la fonction de kernel selon le critere continuous equal split at point (source : okabe et al. 2006)	52
figure 26	representation graphique de la fonction de kernel selon le critere discontinuous equal split at point (source : okabe et al. 2006)	52
figure 27	representation en 2d (haut) et en 3d (bas) des resultats de l'application de la kde de sanet sur un point isole avec les deux differents criteres de traitement des valeurs aux noeuds.	52

figure 28	la structure d'un reseau bayesien simple constitue de 5 variables.	55
figure 29	table des probabilites conditionnelles de la variable b connaissant a.	56
figure 30	vitesses routieres dans l'aire d'etude et identification des axes principaux	61
figure 31	zonage de reference pour les commentaires dans le texte.	62
figure 32	comparaison de la centralite d'accessibilite simplifiee pietonne a 300 metres calculee sur le reseau (haut) ou en considerant un espace isotrope et des distances euclidiennes (bas)	64
figure 33	comparaison de la centralite d'accessibilite simplifiee pietonne a 300 metres calculee a partir des points batis (haut) et des points reseau (bas)	65
figure 34	comparaison de la centralite d'accessibilite simplifiee pietonne a differentes echelles.	67
figure 35	comparaison de la centralite d'accessibilite simplifiee automobile a differentes echelles	68
figure 36	comparaison des metriques de la centralite d'accessibilite pietonne a 1200 metres.	70
figure 37	comparaison de l'indice de circuité des parcours piétons à différentes échelles.	73
figure 38	la straightness normalisée : comparaison des logiques piétonnes et automobiles	74
figure 39	la centralité d'intermédiarité piétonne à 1200 mètres.	76
figure 40	comparaison entre les valeurs absolues et relatives de la centralité d'intermédiarité piétonne à 1200 mètres.	77
figure 41	comparaison entre intermédiarité [a], intermédiarité relative [b] et distance [c], par rapport aux grandes surfaces commerciales.	79
figure 42	repartition des tronçons viaires par classe de densité commerciale dans l'aire d'etude restreinte.	81
figure 43	les densités commerciales (kde) dans l'aire d'étude restreinte.	82
figure 44	synthese des modeles bayesiens produits et des tableaux afferents.	83
figure 45	variables et performance des modeles 1 a 8	87
figure 46	la selection des variables pour le modele n° 3 : descripteurs intrinseques du tronçon (en marron), indicateurs configurationnels pietons (en vert), configurationnels routiers (en bleue) et configurationnels lies aux locomotives commerciales (en orange). la variable cible est la densite commerciale de petites et moyennes surfaces.	88
figure 47	impact probabiliste des variables du modèle n°3 (ceteris paribus) sur les classes de densité commerciale (distribution de probabilité dans les diagrammes avec fond rose) : [a] impact de la reach 300 mètres ; [b] impact de la normalized straightness 5 minutes ; [c] impact de la betweenness relative aux locomotives commerciales.	90
figure 48	densites commerciales inferees par le modele n° 3, selon l'approche de la valeur la plus probable.	91
figure 49	écarts entre previsions du modele n° 3 et realite, selon l'approche de la valeur la plus probable.	92

figure 50	performance de trois strategies d'exploitation du modele n 3 : [a] approche de l'esperance mathematique ; [b] approche de la solution la plus probable ; [c] approche mixte, integrant l'incertitude.	94
figure 51	densites commerciales inferrees par le modele n° 3, selon l'approche prenant en compte l'incertitude des previsions.	96
figure 52	écarts entre previsions du modele n° 3 et realite, selon l'approche prenant en compte l'incertitude des previsions.	97
figure 53	comparaison des scenarios d'augmentation de la connectivite (regle 1) et de la croissance arborescente (regle 5) avec le reseau viaire actuel.	100
figure 54	comparaison des scenarios de reduction du reseau a un arbre minimal (regle 3) et de diminution de la densite du maillage (regle 4) avec le reseau viaire actuel.	101
figure 55	modification des indicateurs configurationnels dans les scenarios : l'accessibilite a pied a 300 m pour les reseaux modifies regles 3 (en haut) et 4 (en bas)	103
figure 56	modification des indicateurs configurationnels dans les scenarios : la performance des reseaux routiers a 5 minutes dans les reseaux modifies selon les regles 1 (en haut) et 5 (en bas).	104
figure 57	modification des indicateurs configurationnels dans les scenarios : l'intermediarite par rapport aux grandes surfaces commerciales dans les reseaux modifies selon les regles 3 (en haut) et 4 (en bas).	107
figure 58	synthese de l'impact des differents scenarios de modification des reseaux sur le potentiel commercial des tronçons.	108
figure 59	distributions des classes de densite commerciale potentielle dans le scenario n° 1	110
figure 60	distributions des classes de densite commerciale potentielle dans le scenario n° 2	111
figure 61	distributions des classes de densite commerciale potentielle dans le scenario n° 3.	112
figure 62	distributions des classes de densite commerciale potentielle dans le scenario n° 4.	113
figure 63	distributions des classes de densite commerciale potentielle dans le scenario n° 5	114
figure 64	distributions des classes de densite commerciale potentielle dans le scenario n° 6	115
figure 65	évolution des classes de densite commerciale potentielle dans le cadre du scenario 6	116
figure 66	un exemple de programme d'activite dans matsim avec les lieux, les horaires et les modes de transport	127
figure 67	exemple de replanning pour un programme d'activites : en changeant les routes, les modes, les horaires	129
figure 68	le workflow de matsim avec ou sans replanning	130
figure 69	vue generale et une vue detaillee du reseau routier du grand zurich	133
figure 70	metrique de differents reseaux metropolitains	134
figure 71	les modifications de vitesse testees	135
figure 72	partage modal suite a des changements de vitesses sur le reseau routier	136
figure 73	distance moyenne par mode pour aller aux magasins	137

figure 74	distance moyenne par mode (en m) pour tous les déplacements	137
figure 75	temps de transport moyen pour tous les trajets et tous les modes	137
figure 76	temps de transport moyen pour tous les trajets lies au commerce	137
figure 77	statistiques sur les plans des individus suite aux changements de vitesse	138
figure 78	partage modal scenario 10%	140
figure 79	distance et temps moyens des trajets scenario 10%	141
figure 80	scores des plans avec et sans choix de localisations – scenario 10%	141
figure 81	partage modal, distances, temps et score moyens pour les actifs et non actifs (scenario 10%)	142
figure 82	partage modal, distances, temps et score moyens en cas de multiplication de la desutilite de la voiture par deux	144
figure 83	scores des plans pour differents scenarios de relocalisation et de vitesse	146
figure 84	partage modal pour differents scenarios de relocalisation et de vitesse	146
figure 85	temps de transport (en secondes) pour differents scenarios de relocalisation et de vitesse	146
figure 86	dynamiques des migrations residentiellles sur les grandes aires urbaines françaises	152
figure 87	migrations residentiellles en france	152
figure 88	migrations residentiellles sur l'espace mediterraneen.	153
figure 89	les densites urbaines sur la region paca (fichier insee - carroyage -2012)	153
figure 90	tailles en population et surfaces densifiees des communes en region paca (sources : insee 2006 – clc 2006)	158
figure 91	evolution des variables du modele entre 1999 et 2006	160
figure 92	combinaisons des variables du calibrage	161
figure 93	resultats du parametrage	161
figure 94	part de la pression contenue dans la ville centre	162
figure 95	variations relatives des pressions urbaines communales entre 1999 et 2006 (δ ip 06-99 en % par rapport a 1999)	163
figure 96	variations absolues des pressions urbaines communales entre 1999 et 2006 (δ ip 06-99 en % par rapport a 1999)	163
figure 97	algorithme des simulations prospectives	165
figure 98	calcul des surfaces urbanisees dans le modele	166
figure 99	estimation, en milliers, des populations pouvant etre accueillies sur les communes de la region paca	167
figure 100	conditions initiales des simulations des cartes « variations relatives des pressions urbaines communales entre 1999 et 2006 »	167
figure 101	simulations de la pression urbaine en 2040	168
figure 102	reserves foncieres calculees sur la base d'un buffer	170
figure 103	conditions initiales des simulations	171
figure 104	consommation des reserves foncieres en 2040	171
figure 105	differences des consommations des espaces naturels et agricoles entre les deux scenarios	171
figure 106	projection des populations 2040	172

figure 107	evolutions es indices de pressions entre 2006 et 2040.	172
figure 108	projets de centres commerciaux sur le departement des alpes maritimes (carte publiee : nice matin - 21 novembre 2014).	174
figure 109	accessibilites des communes de la metropole azureenne avant et apres le projet de contournement autoroutier de nice	175
figure 110	impacts du contournement routier sur les attractivites communales de la metropole azureenne	175