

MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DES RÉSEAUX DE TRANSPORT : VERS UNE PLUS GRANDE PRÉCISION DE L'ACCESSIBILITÉ

Laurent Chapelon *

RÉSUMÉ. Afin d'étudier les répercussions spatiales d'un projet d'aménagement des transports un processus de modélisation multi-échelles a été développé dans le cadre du logiciel NOD. Outre une description fine de la chaîne complète de déplacement, intégrant les trajets terminaux, les connexions entre modes, les horaires des transports en commun..., ce processus permet de déterminer les interactions existant entre niveaux d'organisation, locaux, départementaux, régionaux, nationaux et internationaux.

ABSTRACT. A multi-scale modeling process has been devised within the NOD application program to study the spatial impact of a transport planning project. This process enables to do things : on the one hand, a thorough description of the full range of travelling means including final distances, inter-modal connections, public transport timetables, etc. On the other hand, such a process makes it possible to determine the existing interaction between local, departmental, regional, national and international levels of organizations.

ZUSAMMENFASSUNG. Zur Erforschung der räumlichen Auswirkungen eines Ausbauprojekts im Verkehrswesen ist im Rahmen des NOD Computerprogramms ein Modellablauf in verschiedenen Maßstäben entwickelt worden. Ausser einer genauen Beschreibung der gesamten Abfolge aller Strecken (Endstrecken mit einbezogen, außer den Verbindungen zwischen den verschiedenen Transportmitteln, den Fahrplänen der öffentlichen Verkehrsmittel) dient dieser Ablauf dazu, die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Organisationsstufen auf lokaler, departementaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene zu bestimmen.

• AMÉNAGEMENT DES TRANSPORTS •
RÉSEAUX • ESPACE • GRAPHES •
ÉCHELLES • ACCESSIBILITÉ • ZOOM •
HORAIRES

• ACCESSIBILITY • GRAPHS • NETWORKS •
SCALES • SPACE • TIMETABLES •
TRANSPORT PLANNING • ZOOM

• NEUORDNUNG • NETZE IM VERKEHRS-
WESEN • RAUM • GRAPHE • MASS-STÄBE •
ZUGÄNLICHKEIT • ZOOM • FAHRPLÄNE

La structure des réseaux de transport de personnes et la qualité de leur fonctionnement crée une hétérogénéité spatiale qui se traduit directement par les plus ou moins bonnes conditions d'accès en certains lieux. Valuer et comprendre cette hétérogénéité est un préalable indispensable pour apprécier convenablement les répercussions spatiales d'un projet d'aménagement infrastructurel ou plus simplement d'une modification fonctionnelle du système de transport tel un changement d'horaires pour les transports en commun.

Le processus de modélisation développé à cet effet au laboratoire du CESA intègre à la fois l'aspect analytique et la dimension prospective d'un tel problème. Il s'agit d'un

outil d'aide à la décision en aménagement de l'espace qui repose sur deux axes principaux :

- la représentation des réseaux de transport par des graphes valués,
- le calcul d'indicateurs spécifiques, sur les nœuds ou sur les arcs, basés sur les concepts de nodalité, d'accessibilité, de centralité ou encore de circuité.

Se doter d'un moyen performant de description de l'espace adapté aux besoins de l'utilisateur du modèle couplé avec un processus de modélisation des réseaux qui soit le plus précis possible, notamment en ce qui concerne les temps d'attente liés aux correspondances entre transports en

* Centre d'Études Supérieures d'Aménagement - Groupe «Transports», Parc Grandmont - 37200 Tours - Tél. : 47 36 70 47
Fax : 47 36 70 23, Courrier électronique : chapelon@univ-tours.fr

commun, est une condition sine qua non au regard de l'évolution récente du système de transport.

En effet, le transport de personnes, considéré dans une conception large de porte à porte, se caractérise actuellement par trois aspects : d'abord la multimodalité, puis les gains d'efficacité substantiels dans les transports interurbains en termes de durée ou de coût, et enfin et consécutivement l'importance croissante, relative et absolue, que prennent les phénomènes de connexion.

Si effectivement l'on constate des gains importants en termes de vitesse pour pratiquement tous les déplacements interurbains, et principalement avec le TGV, par contre et en conséquence la durée et le coût des connexions deviennent de plus en plus importants, allant parfois, lorsqu'elles sont mal organisées, jusqu'à annuler les gains obtenus sur les transports interurbains.

Le même constat peut être observé avec les trajets terminaux, généralement intra-urbains, grands consommateurs de temps et par là même nécessairement coûteux. C'est donc le problème de la modélisation de l'intégralité de la chaîne de déplacement qui est ici posé. Problème d'autant plus important que nombre de modèles existants ne traitent du porte à porte qu'à l'aide d'assimilations rapides de type temps moyens de fins de parcours ou de traversées des nœuds, quand il ne s'agit pas simplement d'une déclaration d'intention.

Étudier les répercussions spatiales engendrées par toute modification du système de transport, tant au niveau des infrastructures qu'au niveau des dessertes, fréquences et horaires pour les transports en commun, nécessite d'offrir à l'utilisateur du modèle la possibilité de combiner les échelles spatiales et temporelles afin d'adapter le graphe multimodal de synthèse à la modification qu'il souhaite simuler.

C'est pourquoi, dans l'axe de recherche consacré à la structure du modèle, deux thèmes principaux ont été développés : la modélisation multi-échelles que nous aborderons dans une première partie et le calcul d'une accessibilité instantanée intégrant les horaires de circulation des transports en commun qui sera présenté dans une seconde partie.

Modélisation multi-échelles

Le transport de personnes considéré réellement de «porte à porte» est de nature multimodale et ce, même en voiture

particulière, car, dans les grandes villes, on ne peut plus négliger le temps et le coût de parcage et de reprise du véhicule ainsi que les trajets terminaux effectués à pied. Il est donc indispensable de prendre en compte l'intégralité de la chaîne de transport, dans une optique de type «chaîne logistique».

On entre ici dans le cadre d'une problématique qui constitue actuellement l'un des enjeux majeurs de l'analyse spatiale des effets de l'offre de transport, à savoir la représentation simultanée de réseaux localisés à des échelles géographiques différentes. Chacune de ces échelles renvoyant à un niveau d'organisation spatiale spécifique.

Méthode des zooms nodaux

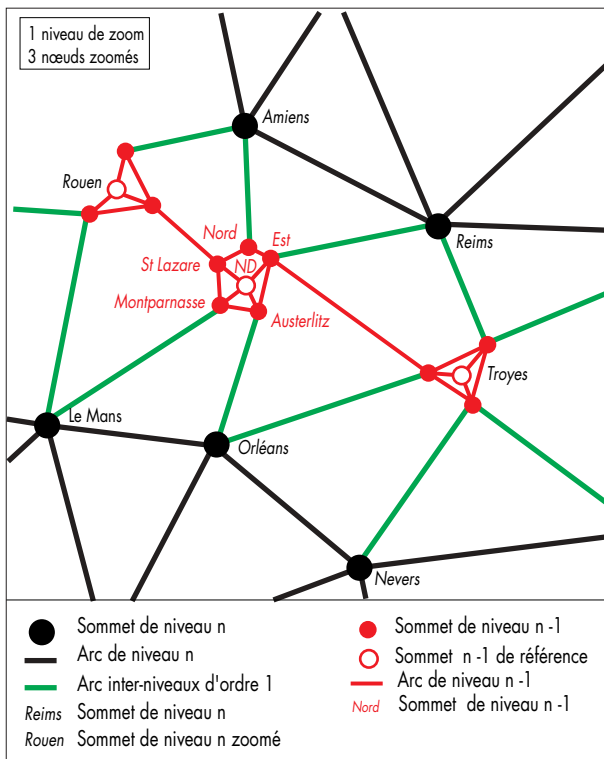
Fondements théoriques : la méthode des zooms nodaux (1) permet la modélisation informatisée (2) de réseaux de transport de niveaux différents localisés à des échelles géographiques de plus en plus fines.

Cette méthode repose sur l'extension du graphe de référence au sein même des sommets qui le constituent. En effet, les sommets d'un graphe, renvoyant à de simples points au sens de la théorie des graphes, sont souvent inadaptés pour étudier convenablement la complexité des nœuds de transport qu'ils représentent. Ces nœuds sont actifs, ils «proccesent» quelque chose de par leur fonctionnement interne, leur organisation. Il est donc nécessaire de les considérer comme autant d'entités distinctes dotées d'un fonctionnement spécifique, gisement possible de gains d'efficacité.

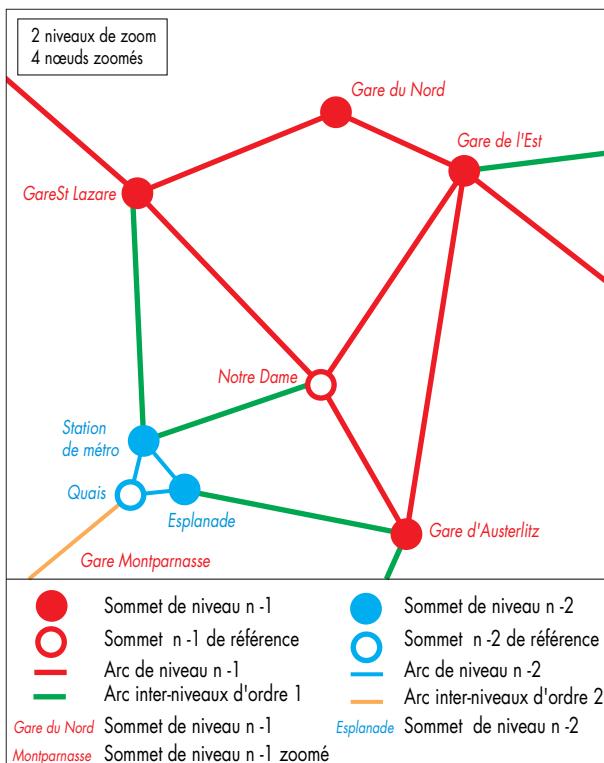
Ce fonctionnement interne, cette organisation traduisent l'existence d'un ou de plusieurs réseaux au sein même de ces nœuds. Réseaux qui se trouvent donc être localisés à des échelles géographiques plus fines et dont le fonctionnement renvoie à des échelles temporelles différentes, même si, dans certains cas particuliers (congestion routière, connexion ferroviaire...), les temps de traversée des nœuds peuvent être égaux ou supérieurs aux temps de cheminement entre les nœuds.

C'est cette imbrication de niveaux d'organisation que la méthode des zooms nodaux décrit dans la mesure où chaque niveau se trouve relié, dans le graphe de synthèse, aux niveaux supérieurs et inférieurs.

Ainsi, chaque sommet du graphe interurbain (niveau n), pourra être substitué par un graphe de niveau inférieur (n -1)



1. Zooms nodaux de niveau n – 1



2. Représentation quasi-fractale — Extension du zoom au niveau n-2 (gare Montparnasse)

composé d'arcs et de nœuds représentatifs des réseaux intra-urbains (réseaux de bus, de métro, de tramway, réseaux routiers urbains...) et ce, sans se désolidariser du niveau de modélisation interurbain (fig. 1). Ce processus permet de conserver les propriétés de la théorie des graphes et la validité des algorithmes qui lui sont associés.

De plus, par nécessité de cohérence des valeurs kilométriques, de concordance des représentations cartographiques et afin de faciliter les comparaisons entre les différents niveaux, un processus de conservation systématique de la localisation géographique de chacun des nœuds après substitution a été élaboré. Par exemple, les coordonnées géographiques du sommet «Notre-Dame» (niveau n-1) correspondent précisément à celles du sommet «Paris» du niveau supérieur. Notre-Dame devenant le sommet de référence de Paris (fig. 1).

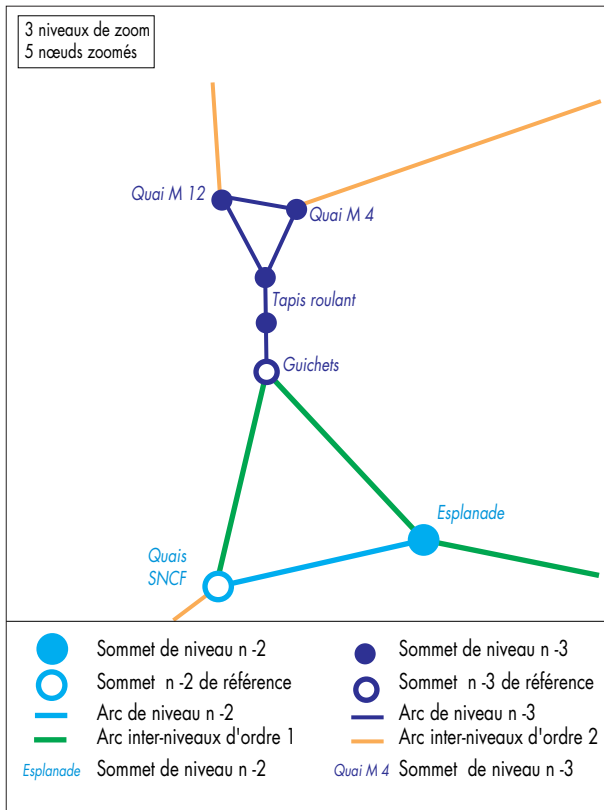
Représentation «quasi-fractale»: la méthode des zooms nodaux décrite précédemment recouvre 2 niveaux de représentation :

- le niveau n comprenant un extrait du «graphe français simplifié» défini par un ensemble de villes reliées par de grandes infrastructures de transport,
- le niveau n – 1 renvoyant par exemple au «graphe parisien simplifié» défini par les gares et échangeurs routiers parisiens mis en relation par les voies routières intra-urbaines ou les transports en commun de type métro, bus ou tramway.

Or, la même méthode peut à son tour être appliquée aux nœuds constitutifs des réseaux intra-urbains (niveau n-2) afin de modéliser les déplacements hectométriques pédestres ou assistés (escalators, tapis roulants...) au sein même des nœuds de niveau n-1 comme les trajets à l'intérieur d'une gare (fig. 2).

Ces déplacements hectométriques sont de grands consommateurs de temps et leur estimation par l'utilisateur peut conduire à des marges de sécurité temporelles bien supérieures à la valeur réelle du déplacement comme cela est le cas à Paris pour les connexions intergares.

Un tel procédé ouvre ainsi la voie à une représentation de type «quasi-fractal» dont le mode de déplacement le plus fin est matérialisé, pour le domaine du transport de personnes, par la marche. En effet, on peut par exemple imaginer de représenter les déplacements au sein même d'une



3. Représentation quasi-fractale - Extension du zoom au niveau n -3 (métro Montparnasse-Bienvenue)

station de métro (niveau n -3) comme celle de la gare Montparnasse (fig. 3).

Il est ainsi possible de zoomer de plus en plus finement, afin de modéliser le processus de connexion à des niveaux de précision permettant de rendre compte réellement de leur importance dans un cheminement général de type interurbain.

Zooms nodaux inverses : de plus, la nécessité d'offrir à l'utilisateur du modèle toute liberté dans le choix des échelles nous a conduit à compléter la méthode des zooms nodaux par un processus inverse permettant de «remonter» d'un ou de plusieurs niveaux. Dans ce cas, le zoom ne renvoie plus à une désagrégation nodale mais à une agrégation d'un ensemble de nœuds en un nœud unique de niveau supérieur.

Méthode des zooms multi-nodaux

Fondements théoriques : dans certains cas, par exemple lors de l'étude de réseaux de transport régionaux, il peut

être intéressant d'analyser la qualité des relations qu'entretient cette région avec le territoire national et international environnant. Pour ce faire, l'utilisateur du modèle doit pouvoir zoomer, non plus sur un nœud en particulier, mais sur la région qu'il désire étudier afin de posséder localement une description encore plus fine de l'espace des transports et donc d'accroître la précision des calculs de cheminements sur cet espace. La méthode de zoom, nécessairement multi-nodale, conçue à cet effet, permet d'enrichir un ou plusieurs sous-graphes d'un graphe de transport.

Il ne s'agit pas nécessairement d'une simple adjonction de nœuds et d'arcs, car le nouveau graphe (niveau n -1 : graphe régional dans notre exemple) se substitue automatiquement aux arcs et nœuds de la partie zoomée (niveau n) et ce, sans se désolidariser du graphe de référence.

Une plus grande finesse de description de «l'espace - réseau» sera ainsi obtenue et, suivant le choix de l'utilisateur du modèle, une série de zooms successifs pourra être effectuée jusqu'au niveau n -m. L'automatisation de ce processus permettant toute combinaison de zooms multi-nodaux et ce, pour chaque niveau étudié (3).

Application à un projet d'achèvement du boulevard périphérique de Tours : nous avons pu ainsi imbriquer, dans un même graphe de synthèse, les graphes représentatifs de la France (508 nœuds), du département d'Indre-et-Loire (311 nœuds), de l'agglomération de Tours (184 nœuds) et de la ville de Tours (603 nœuds). Les cartes 4 et 5 illustrent ces processus successifs de zooms multi-nodaux, lesquels reposent sur l'insertion du graphe d'Indre-et-Loire au sein du graphe français (carte 4) (4), du graphe de l'agglomération tourangelle dans le département (carte 5) et du graphe de Tours au sein de son agglomération (carte 5).

L'intérêt de ce processus étant, dans le cas de Tours, d'observer les modifications temporelles de l'accessibilité routière et autoroutière suite à un projet d'achèvement du boulevard périphérique (carte 5) et ce, sur chacun des niveaux d'organisation modélisés.

Les temps de parcours sont calculés (5) par application d'une vitesse moyenne à la valeur kilométrique affectée à chacun des arcs du graphe. Cette vitesse moyenne est déterminée par les caractéristiques techniques des infrastructures



Liaison par :

- Autoroute 110 km/h
- Voie expresse 90 km/h
- Route 70 km/h
- Route 60 km/h
- Route 50 km/h

Conception et réalisation :
L. Chapelon, A. L'Hostis, Ph. Mathis
avec la collaboration de :
H. Baptiste, S. Larribe, M. Mayaud, K. Serrhini.

© Laboratoire du Centres d'Études Supérieures d'Aménagement CESA - Tours, 1996

4. Zoom multinodal d'Indre-et-Loire : imbrication du niveau d'organisation national (508 nœuds) et départemental (311 nœuds)

routières et autoroutières empruntées (nombre de voies, largeur des voies, aménagement des bas côtés...) et par les réglementations actuellement en vigueur.

Huit classes de voies ont été utilisées dans l'exemple présenté ici : autoroute 110 km/h, voie express 90 km/h, route 70 km/h, route 60 km/h, route 50 km/h, rocade urbaine 70 km/h, boulevard urbain 35 km/h et voie urbaine 25 km/h.

Couplé avec les processus de zooms présentés ci-dessus, ce type de représentation, adaptée aux réseaux ne possédant pas d'horaires prédéfinis, permet une description fine de la chaîne de déplacement ainsi qu'une meilleure précision lors du calcul des accessibilités temporelles.

Les résultats des cartes 6, 7 et 8 (6) sont obtenus par différence absolue entre les temps de trajet actuels calculés au départ ou à destination de Cholet et les temps de trajet calculés après achèvement du périphérique de Tours. Pour

chacun des niveaux d'organisation représentés ces résultats permettent :

- de localiser les nœuds pour lesquels le trajet minimal au départ ou à destination de Cholet empruntera la nouvelle infrastructure (valeurs non nulles),
- de quantifier précisément les gains de temps procurés par cette infrastructure (7).

À partir d'un indicateur simple, l'accessibilité temporelle routière et autoroutière, nous sommes ainsi en mesure d'appréhender les répercussions d'un aménagement local sur le niveau national (carte 6), départemental (carte 7) et sur l'agglomération tourangelle (8) (carte 8).

Le même exercice peut être réalisé avec d'autres indicateurs, d'autres nœuds origine ou destination ou encore de tout nœud à tout autre. Nous disposons ainsi d'un ensemble de résultats complémentaires permettant de répondre à l'objectif d'aide à la décision en aménagement de l'espace qui a guidé le développement du logiciel NOD.

Liaison par

Autoroute 130 km/h

Route 70 km/h

Route 60 km/h

Route 50 km/h

Road urbaine

actuelle 70 km/h

Road urbaine

projetée 70 km/h

Boulevard urbain

35 km/h

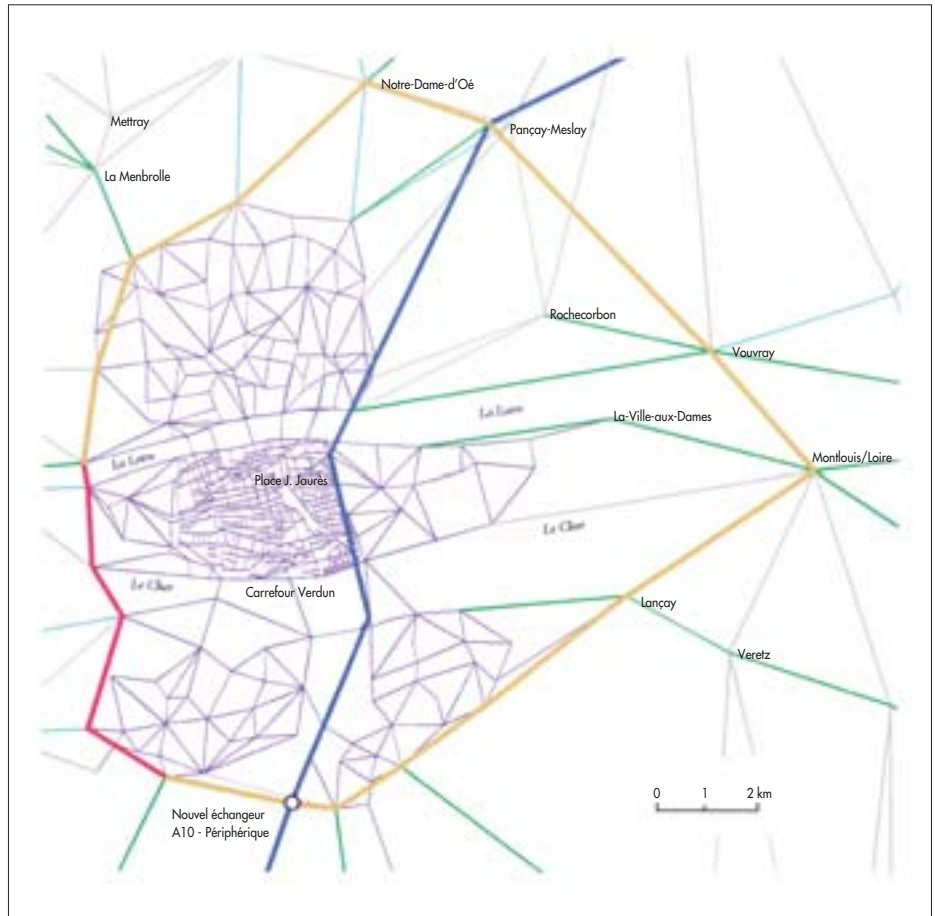
Voie urbaine

25 km/h



Echangeur à créer

5. Simulation d'un projet d'achèvement du périphérique de Tours : imbrication des graphes de Tours (603 nœuds) et de son agglomération (184 nœuds) connectés au département d'Indre-et-Loire (311 nœuds)



Zooms multi-nodaux inverses : afin que le choix des échelles soit complet, il a été nécessaire de créer un module supplémentaire de zoom multi-nodal inverse. Ce module assure le passage de descriptions spatiales fines à des descriptions plus globales (agrégées) associées à des niveaux d'organisation supérieurs.

Un graphe peut ainsi faire l'objet d'un zoom multi-nodal sur l'un de ses sous-graphes et du processus inverse sur un autre de ses sous-graphes.

De même, les zooms nodaux et multi-nodaux, agrégés ou désagrégés, peuvent être utilisés simultanément. L'utilisateur du modèle est dès lors totalement libre d'adapter le graphe de synthèse au phénomène qu'il souhaite simuler, et peut ainsi repérer les changements d'accessibilités qui s'opèrent aux différents niveaux du système spatial lorsque des aménagements sont réalisés sur une ou plusieurs de ses relations. Ces aménagements peuvent concerner l'infrastructure proprement dite (création d'un axe TGV, recalibrage de voies

routières, percement d'un tunnel...) ou la fonctionnalité même des réseaux telle la mise en place d'un nouveau schéma de desserte pour les transports en commun (modification d'horaires, accroissement des fréquences...).

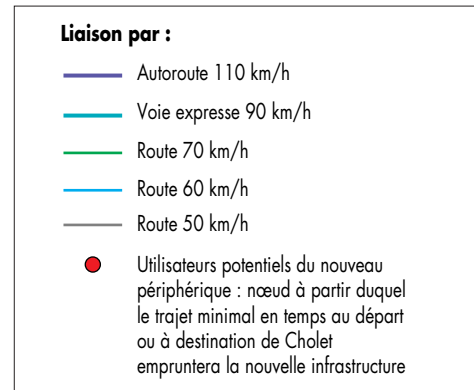
L'accessibilité à l'instant t

Du point de vue du calcul des cheminements minimaux, les zooms nodaux et multi-nodaux permettent d'accroître la précision des résultats obtenus en affinant la description des réseaux de transport et donc en précisant la valeur de chacun des arcs. Cependant, la valuation des arcs ne concerne que la fonction transit du déplacement, c'est-à-dire les phases de mouvement.

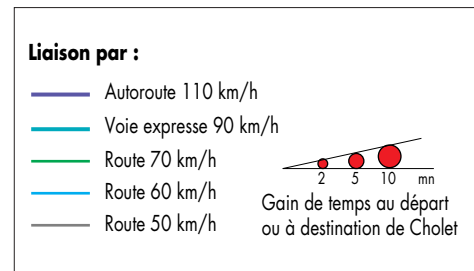
Or, si pour les réseaux routier et autoroutier le transit est prépondérant, compte tenu de la permanence de l'accès aux infrastructures, il en est tout autrement dans le cas des transports en commun, pour lesquels l'accès aux services est temporaire et fonction d'horaires prédéfinis.



6. Achèvement du périphérique de Tours : nœuds concernés par un gain de temps au départ ou à destination de Cholet

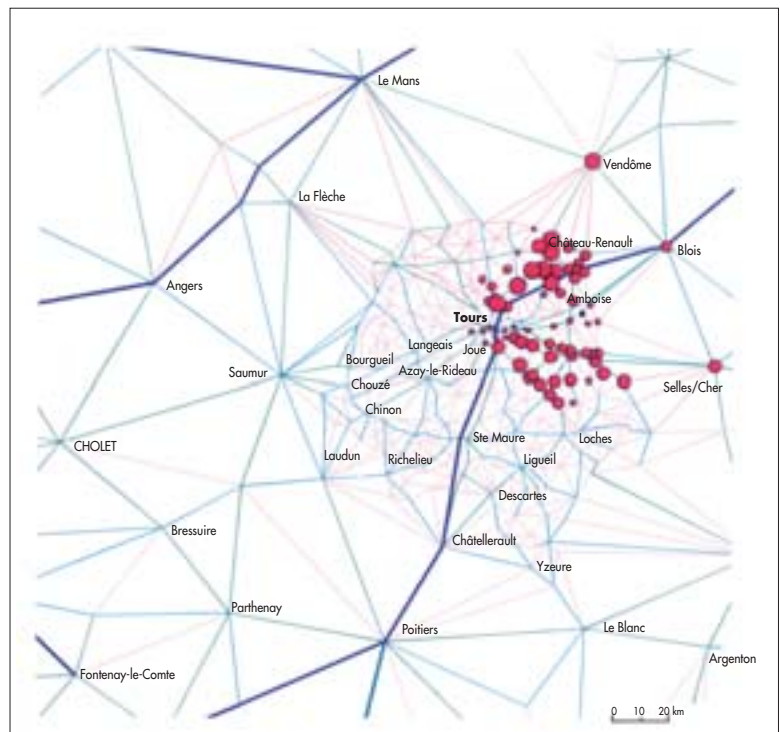


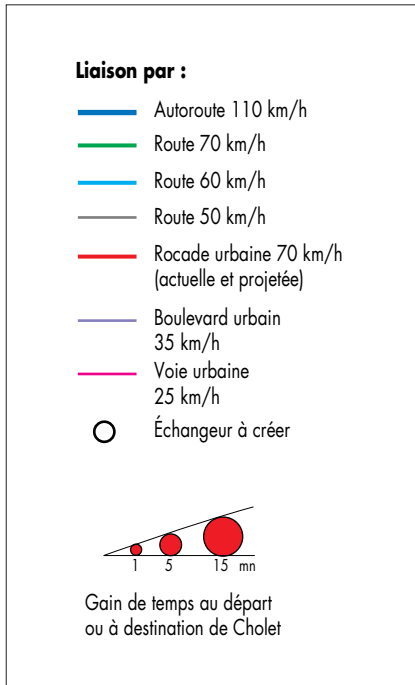
7. Achèvement du périphérique de Tours : répercussions sur le département d'Indre-et-Loire des gains de temps au départ ou à destination de Cholet



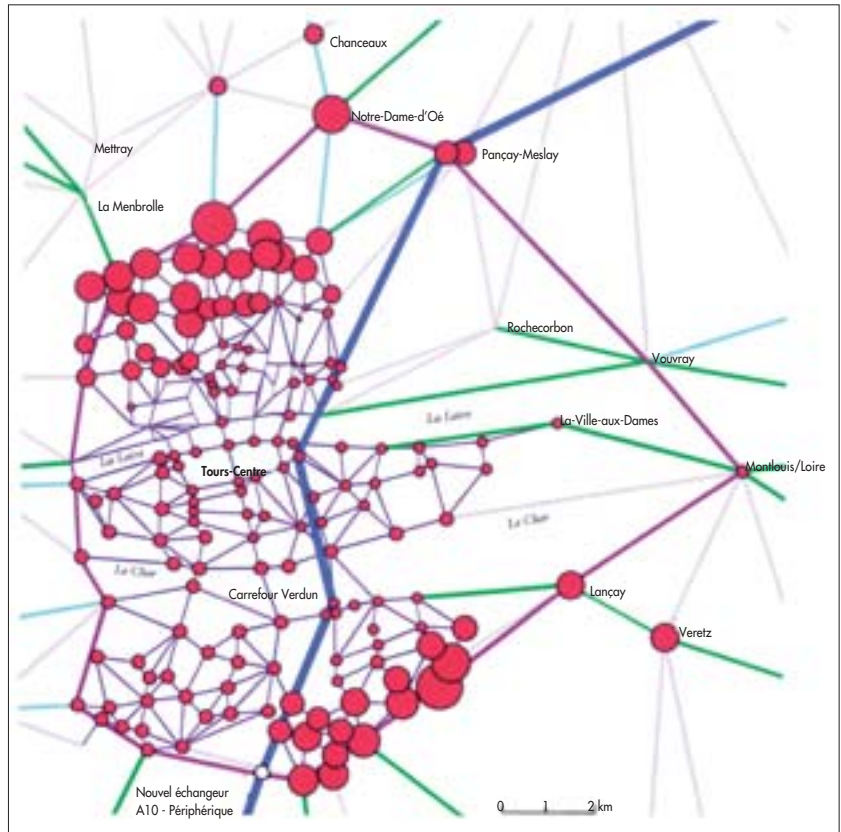
Il convient donc, dans ce dernier cas, de prendre en compte, parallèlement au transit, les phases statiques du déplacement c'est-à-dire les problèmes d'attentes aux nœuds. Pour ce faire, un module de gestion des horaires a été développé.

Ce volet de la recherche, axé sur l'accroissement de l'épaisseur du graphe, repose sur la conception et l'application d'un nouvel algorithme de calcul des cheminements minimaux susceptible de prendre en considération simultanément l'ensemble des réseaux de transport représentés (routier, autoroutier, ferroviaire classique et à grande vitesse, aérien...) et donc de gérer l'ensemble des horaires inhérents aux réseaux de transport en commun. La détermination du plus court chemin s'effectue alors sous contrainte d'un jour et d'une heure de départ ou d'arrivée spécifiés par l'utilisateur du modèle.





8. Achèvement du périphérique de Tours : répercussions sur l'agglomération tourangelle des gains de temps au départ ou à destination de Cholet.



Ce schéma de type p-graphe prend en compte les temps exacts de connexion entre deux réseaux ou axes d'un même réseau de transport en commun (9).

Le nouvel algorithme de calcul intègre donc autant d'arcs qu'il y a de réseaux de transport entre deux villes et pour les réseaux de transport en commun, autant d'arcs qu'il y a de dessertes (heure de départ et heure d'arrivée différentes). Ces arcs ont une existence purement fonctionnelle donc limitée dans le temps. Ils sont temporellement discrets, car la liaison existe à l'instant t de départ et $t + i$ d'arrivée mais ni avant ni après.

Il est ainsi possible, dans une logique multimodale, de définir une accessibilité à l'instant t variable suivant les jours et heures de départ ou d'arrivée souhaités par l'utilisateur du modèle. Cette accessibilité à l'instant t constitue en effet un complément indispensable à l'accessibilité «générale» qui présente l'inconvénient de favoriser des nœuds situés sur un réseau de transport en commun mais dont la desserte n'est assurée qu'occasionnellement. L'algorithme utilisé ici permet par exemple une comparaison immédiate entre la route et le fer dans la mesure où une

mauvaise connexion ferroviaire peut favoriser l'utilisation de la voiture et, inversement, une relation ferroviaire directe entre deux villes à fréquences journalières élevées peut rendre la voiture moins avantageuse que le train.

Conclusion

La prise en compte simultanée mais non automatique de réseaux localisés à différentes échelles couplée à la gestion des horaires des transports en commun permet d'éviter les grossières approximations de type fréquences moyennes, temps moyens de correspondance ferroviaire ou de traversée des villes... et offre ainsi une plus grande précision lors du calcul de cheminements qui sont réellement de «porte à porte». Les mesures, notamment les indicateurs d'accessibilité, sur lesquelles s'appuient en partie bon nombre de décisions de modification de l'offre de transport sont donc d'autant plus fiables.

De plus, la méthode de zooms élaborée ici permet de développer la «verticalité» de l'analyse spatiale c'est-à-dire la possibilité d'étudier les conséquences de phénomènes présents à des échelles géographiques fines sur le

fonctionnement de systèmes spatiaux appartenant à des échelles géographiques plus importantes.

Le logiciel NOD permet non seulement une recherche de l'optimum par comparaison des différents enchaînements de transport, mais aussi et peut-être surtout la mise en évidence et l'analyse prospective des conséquences spatiales de décisions en matière de transport comme la réalisation d'infrastructures nouvelles, l'optimisation et la localisation des connexions et ce, quelles que soient les échelles géographiques retenues. La modification du système de transport peut, en effet, être infrastructurelle ou fonctionnelle comme par exemple lors de la réalisation d'un nouveau schéma de dessertes pour lequel toute modification d'horaires peut être simulée.

Le couplage zooms - horaires est à ce titre fondamental pour étudier l'importance que peut prendre un dysfonctionnement des transports urbains d'une grande ville sur des déplacements de longue distance. Par exemple, lors d'un changement de gare au sein d'une même ville, le temps de connexion entre la gare d'arrivée et la gare de départ peut être systématiquement altéré par des horaires de transports urbains inadaptés, ou encore les gains de temps offerts par le TGV peuvent être considérablement réduits, voire annulés, par l'attente d'un bus nécessaire à l'accomplissement du trajet terminal. La mise en évidence et la résolution de ce type de problèmes sont indispensables pour permettre aux transports en commun de se développer face à une automobile offrant une plus grande souplesse dans les trajets terminaux mais dont le nombre sans cesse croissant conduit à une asphyxie progressive des grandes agglomérations urbaines.

- (1) Cf. CHAPELON L., L'HOSTIS A., MATHIS Ph., «Modélisation nodale du transport de personnes : fondements théoriques et imagerie».
- (2) Logiciel NOD, conception : L. Chapelon, Ph. Mathis, Laboratoire du CESA, 1993-1996.
- (3) Cf. CHAPELON L., L'HOSTIS A., MATHIS Ph., «Transport et espace : l'interaction des échelles spatiales et temporelles».
- (4) Les cartes présentées ici ont été réalisées à partir du logiciel MAP conçu par Alain L'Hostis et Philippe Mathis, Laboratoire du CESA, 1993-1996.
- (5) L'algorithme de recherche des cheminements minimaux retenu est celui de Floyd - Warshall.
- (6) Pour des raisons de lisibilité des résultats les 4 niveaux d'organisation énoncés ci-dessus ne peuvent être représentés simultanément

sur une même carte. Les cartes 6 à 8 correspondent donc chacune à un niveau spécifique. Il convient cependant d'avoir toujours à l'esprit que les calculs et donc les résultats affichés, reposent sur l'imbrication des 4 graphes.

- (7) Les valeurs proportionnelles n'ont volontairement pas été représentées sur la carte 6 compte tenu de la faiblesse du gain relativement au temps de trajet total. L'intérêt de cette carte résulte principalement dans la localisation des utilisateurs potentiels du périphérique à l'échelle nationale.
- (8) Les 4 niveaux d'organisation étant imbriqués, nous aurions pu réaliser le même type de carte avec la ville de Tours pour laquelle la quasi totalité des noeuds sont concernés par l'utilisation du périphérique au départ ou à destination de Cholet.
- (9) En effet, le schéma classique (algorithme de Floyd - Warshall) utilisé pour les calculs faisant intervenir les seuls temps, distances ou coûts de déplacement (obtention d'indicateurs généraux), et non pas les horaires de départ et d'arrivée des transports en commun (obtention d'indicateurs spécifiques des jours et heures souhaités), ne retient que l'arc du réseau le plus performant entre deux villes (obtention d'un 1- graphe).

Références bibliographiques

- AUREY J.-P., MATHIS Ph., «Analyse spatiale et théorie des graphes», p. 81-91 in : *Encyclopédie d'Économie spatiale : concepts, comportements, organisations*, dir. Jean-Paul Aurey, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot, Paris, Economica, 1994. (Association de Science régionale de Langue française, Bibliothèque de science régionale.)
- BERGE C., 1983, *Graphes*, 3^e éd., Paris, Gauthier-Villars (Collection μ .)
- CATTAN N., PUMAIN D., ROZENBLAT C., SAINT-JULIEN Th., 1994, *Le Système des villes européennes*, Paris, Anthropos.
- CAUVIN C., REYMOND H., SCHAUB G., 1989, *Accessibilité, temps de séjour et hiérarchie urbaine : l'exemple du réseau aérien pour 53 villes d'Europe de l'Ouest*, Naples, Guida.
- CAUVIN C., 1992, «Une accessibilité renouvelée», p. 93-127 in : *Destins atlantiques : entre mémoire et mobilité*, dir. Jacques Beauchard, Paris, DATAR éditions de l'Aube.
- CHAPELON L., L'HOSTIS A., MATHIS Ph., «Transport et espace : l'interaction des échelles spatiales et temporelles» - communication aux journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés : «Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement». Paris, CNRS, 15-17 janvier 1996.
- CHAPELON L., L'HOSTIS A., MATHIS Ph., «Modélisation nodale du transport de personnes : fondements théoriques et imagerie», Communication au colloque international «Grandes infrastructures de transport et territoires», Lille, INRETS-TRACES, 8-9 juin 1995.
- DUPUY G., 1985, *Systèmes, réseaux et territoires : principes de réputation territoriale*, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.