APPORTS DE LA GÉOMATIQUE ET DE LA CARTOGRAPHIE DANS L'ÉVALUATION DES AIRES D'ATTRACTION DES GARES TGV

Application aux gares de Béziers et Narbonne

par Laurent Chapelon

Professeur d'Aménagement de l'espace et Urbanisme
UMR GRED Université Paul-Valéry Montpellier 3/IRD
Route de Mende 34199 Montpellier cedex 5
laurent.chapelon@univ-montp3.fr

L'accessibilité est un facteur essentiel de prise de décision lors des choix d'implantation des gares TGV. Le maître d'ouvrage s'interroge en particulier sur la délimitation des aires d'attraction potentielle de ces équipements et sur les volumes d'habitants concernés par chacune d'elles à l'horizon de la mise en service. Cet article a pour ambition de montrer les apports de la géomatique et de la cartographie dans cet exercice de délimitation et d'évaluation des bénéficiaires potentiels. L'application des avancées méthodologiques à la localisation de la ou des futures gares de Béziers et Narbonne, a permis de valider la démarche. L'exercice est rendu délicat par la proximité des gares, qui influence leurs limites d'attraction respectives, et par la variation de la forme des aires selon le sens du déplacement opéré en TGV (vers le nord ou vers le sud dans les cas de Béziers et Narbonne). Cet article présente des solutions permettant de dépasser ces difficultés. Ces solutions, développées dans le logiciel MAPNOD, consistent à combiner dans un même algorithme les temps de rabattement routier vers les gares et les temps de parcours TGV entre les gares, puis à représenter les limites d'attraction au moyen de cartes en arcs colorés. L'affectation de chaque commune à l'aire d'attraction de telle ou telle gare s'opère par minimisation du temps total de parcours (routier + ferroviaire). Il devient dès lors possible de quantifier et de cartographier le phénomène d'inversion spatiale décrit par W. Bunge ; certains habitants ayant intérêt à commencer leur trajet dans une direction opposée à celle de leur destination finale pour gagner du temps. Une fois les aires d'attraction délimitées, les arbitrages entre les scénarios d'implantation nécessitent de confronter le niveau d'offre routière à la demande potentielle de transport à l'horizon de la mise en service de l'équipement. L'indicateur calculé consiste à déterminer la quantité de population de l'aire d'attraction de la gare en fonction du temps de trajet routier nécessaire pour s'y rendre. On connaît ainsi, minute par minute, le volume de population potentiellement attiré par chaque gare.

Introduction

Le Languedoc-Roussillon se caractérise par une croissance démographique exceptionnelle en France. Cela tend à accroître le volume des circulations sur le réseau ferré et pose des problèmes de capacité en de nombreux points. Outre le trafic voyageurs (grandes lignes et TER), l'axe principal du réseau entre Perpignan et Nîmes supporte le trafic fret de transit entre l'Espagne et le reste de l'Europe. Il en résulte une saturation progressive de cet axe structurant, qui nuit au développement du mode ferroviaire dans un contexte politique (Chapulut *et al.* 2011) pourtant de plus en plus favorable aux solutions alternatives au transport routier (Grenelle de l'environnement).

À ce jour, deux projets sont de nature à fortement modifier l'accessibilité ferroviaire entre Nîmes et Perpignan :

- le contournement de Nîmes et de Montpellier à grande vitesse mis en service en 2017. Cette ligne nouvelle mixte (fret et voyageurs) permettra de soulager la ligne classique d'une part substantielle de ses trafics et de restructurer l'offre TER qui bénéficiera ainsi de sillons supplémentaires libérés sur la ligne classique.
- le projet de ligne nouvelle entre Montpellier et Perpignan dont le débat public s'est tenu en 2009.

Ces deux projets, qui ont pour objectif d'accroître la performance (vitesse et capacité) du réseau ferré en

Languedoc-Roussillon, participent à l'amélioration d'un maillon essentiel du réseau transeuropéen à grande vitesse (Troin 1995). Les travaux présentés ici s'inscrivent dans le cadre des études postérieures au débat public sur la ligne nouvelle Montpellier-Perpignan.

Les conclusions du débat public issues des pré-études fonctionnelles ont permis à Réseau Ferré de France de décider :

- d'inscrire ce projet dans une vision évolutive du réseau qui permette, via un doublet de lignes, le développement de la grande vitesse, du transport régional de voyageurs et du fret ;

- de poursuivre les études sur la base d'un projet de ligne nouvelle de Montpellier à Perpignan :
  - qui s'inscrit dans le couloir de passage dit « plaine littorale » entre Montpellier et Narbonne, et dans le couloir « Corbières littorales » proposé entre Narbonne et Perpignan,
  - apte à la grande vitesse ferroviaire sur l'intégralité de son linéaire,
  - en capacité d'accueillir des circulations mixtes de Montpellier à Perpignan sur les sections les plus fréquentées, en tenant compte des enjeux d'insertion environnementale et d'économie globale du projet ;

- de conduire ce projet en cohérence avec la réalisation du Contournement de Nîmes et de Montpellier et l'avancée des études sur l'axe Toulouse - Narbonne;
- de poursuivre les études sur les gares et dessertes régionales
  - en permettant la desserte de l'agglomération de Montpellier par une gare nouvelle dès la mise en service du Contournement de Nîmes et de Montpellier,
  - en engageant les études et concertations nécessaires à la construction d'une nouvelle gare pour l'agglomération de Nîmes sur la commune de Manduel,
  - en examinant l'opportunité de gares nouvelles pour la desserte de Béziers et Narbonne et, le cas échéant, leur localisation et leur horizon de réalisation, complémentairement aux aménagements en gares existantes,
  - en privilégiant la desserte de Perpignan par la gare actuelle.

Cette décision valide la poursuite des études sur la desserte régionale, en particulier au niveau des agglomérations au sein d'un périmètre incluant les aires urbaines d'Agde, Pézenas, Béziers, Narbonne, Lézignan-Corbières, Carcassonne et Port la Nouvelle.

Ainsi, les travaux présentés dans cet article ont pour objet de fournir des éléments factuels de comparaison de cinq scénarios d'implantation de la ou des futures gares TGV de Béziers/Narbonne. Plus précisément, les conditions d'accès des populations aux différentes gares envisagées à l'horizon 2020 seront évaluées et analysées. Il s'agit de déterminer quels seront les principaux bénéficiaires de chacune des gares potentielles.

Les méthodes et résultats sont issus de l'étude « Accessibilité des agglomérations de Béziers et Narbonne - étude des gares actuelles et des sites potentiels de gares nouvelles » commanditée par Réseau Ferré de France (Délégation Régionale Languedoc-Roussillon) dans le cadre du projet de ligne nouvelle Montpellier-Perpignan. Ils s'inscrivent donc à l'interface de la recherche théorique et de la recherche appliquée. Les résultats obtenus n'engagent que l'auteur de cet article, la décision finale concernant la localisation des gares revenant aux cofinanceurs du projet.

La numérisation des données et la cartographie des résultats ont été réalisées à l'aide du logiciel MAPNOD (Chapelon, L'Hostis, 1993-2017) qui intègre l'ensemble des méthodes et algorithmes présentés dans cet article. Ce logiciel est disponible sur http://mapnod.free.fr

Les cinq scénarios retenus sont les suivants :

Scénario 1 « gares centrales » : le statu quo (fig. 1)

Ce scénario est proche de la situation actuelle. Les TGV en provenance du nord quitteraient la ligne nouvelle (LN) à hauteur de Béziers, emprunteraient la ligne classique pour desservir les gares centrales de Béziers et Narbonne puis rejoindraient la LN au sud-ouest de Narbonne. La même séquence est empruntée dans le sens inverse pour les trains en provenance du sud. Ce scénario exclut toute possibilité de connexion à la LN entre Béziers et Narbonne par les trains s'arrêtant dans l'une des deux gares centrales de Béziers ou Narbonne.

Scénario 2 « Gare Nouvelle Béziers-Narbonne TGV » (fig. 2)

Le scénario « Gare nouvelle Béziers-Narbonne TGV» consiste à créer une gare nouvelle entre Béziers et Narbonne. Cette gare serait localisée sur la commune de Nissan comme cela était prévu dans le projet de LGV Languedoc-Roussillon en 1995. La desserte de Béziers centre et de Narbonne centre serait ainsi assurée par

navettes ferroviaires dont les départs et arrivées à la gare nouvelle seraient calés sur les horaires des TGV. La configuration des voies implique la réalisation d'une gare à plat sur des voies TER et TGV parallèles. La correspondance TGV-navette pourra se faire de quai à quai ou via une passerelle pour traverser les voies.

Dans les sens nord-sud et sud-nord, après arrêt à la gare nouvelle Béziers-Narbonne TGV, les TGV resteraient sur la ligne nouvelle sans possibilité de la quitter entre Béziers et Narbonne. Ainsi, seul l'arrêt à la gare Béziers-Narbonne TGV est envisageable dans ce scénario.

Scénario 3 « Gare Nouvelle Béziers Est TGV » (fig. 3)

Le scénario « Gare nouvelle Béziers est TGV » consiste à créer une gare nouvelle à l'est de Béziers sur la commune de Villeneuve-lès-Béziers. La desserte de Béziers centre et de Narbonne centre serait, là aussi, assurée par navettes ferroviaires dont les départs et arrivées à la gare nouvelle seraient calés sur les horaires des TGV. La configuration des voies implique la réalisation d'une gare sur deux niveaux. La correspondance TGV-navette ne pourra pas se faire de quai à quai, il sera nécessaire d'effectuer un changement de niveau (escalators).

Dans les sens nord-sud et sud-nord, après arrêt à la gare nouvelle Béziers est TGV, les TGV resteraient sur la ligne nouvelle sans possibilité de la quitter pour desservir Béziers centre ou Narbonne centre. Seul l'arrêt à cette gare nouvelle est donc envisageable dans ce scénario.

Scénario 4 « Gare Nouvelle Narbonne ouest TGV » (fig 4)

Le scénario « Gare nouvelle Narbonne ouest TGV » consiste à créer une gare nouvelle à l'ouest de Narbonne sur la commune de Montredon-des-Corbières. La desserte de Narbonne centre et, au-delà, de Béziers centre serait assurée par navettes ferroviaires dont les départs et arrivées à la gare nouvelle seraient calés sur les horaires des TGV. La configuration des voies implique la réalisation d'une gare sur deux niveaux. La correspondance TGV-navette ne pourra pas se faire de quai à quai, il sera nécessaire d'effectuer un changement de niveau (escalators).

Dans les sens nord-sud et sud-nord, après arrêt à Narbonne ouest TGV, les TGV resteraient sur la ligne nouvelle sans possibilité de desservir Narbonne centre ou Béziers centre. Seul l'arrêt à cette gare nouvelle est ainsi envisageable dans ce scénario.

Scénario 5 « Gares Nouvelles Béziers est TGV & Narbonne ouest TGV » (fig. 5)

Le scénario « Gares nouvelles Béziers-est TGV & Narbonne ouest TGV » consiste à créer une gare nouvelle à l'ouest de Narbonne sur la commune de Montredon-des-Corbières et une gare nouvelle à l'est de Béziers sur la commune de Villeneuve-lès-Béziers. La desserte de Narbonne centre serait ainsi assurée par navettes ferroviaires dont les départs et arrivées à la gare nouvelle Narbonne ouest TGV seraient calés sur les horaires des TGV. La configuration des voies implique la réalisation d'une gare sur deux niveaux. La correspondance TGV-navette ne pourra pas se faire de quai à quai, il sera nécessaire d'effectuer un changement de niveau (escalators). Dans les sens nord-sud et sud-nord, après arrêt à la gare nouvelle Narbonne ouest TGV, les TGV resteraient sur la ligne nouvelle sans possibilité de desserte de Narbonne centre et de Béziers centre.

La desserte de Béziers centre par navettes ferroviaires dont les départs et arrivées à la gare nouvelle Béziers est TGV seraient calés sur les horaires des TGV. La configuration des voies implique, là aussi, la réalisation d'une gare sur deux niveaux. La correspondance TGV-navette ne pourra pas se faire de quai à quai, il sera nécessaire d'effectuer un changement de niveau (escalators). Dans les sens nord-sud et sud-nord, après arrêt à la gare nouvelle Béziers est TGV, les TGV resteraient sur la ligne nouvelle.

Analyse des accessibilités TGV aux différentes gares

Les gains de temps TGV

La démarche présentée ici consiste à évaluer le différentiel d'accessibilité TGV existant entre la situation actuelle et chacun des scénarios étudiés (Bavoux et al., 2005). A ce stade, seuls les temps de parcours TGV sont pris en considération. Il s'agit, pour des trajets types vers le nord ou le sud, d'évaluer les gains de temps « gare à gare » liés à la réalisation d'une ligne à grande vitesse. On parlera de « temps TGV » pour éviter toute confusion. En d'autres termes, on cherchera à connaître, toutes choses égales par ailleurs, les écarts entre, par exemple, un trajet Narbonne (gare centrale)-Paris et un trajet Narbonne ouest TGV-Paris ou entre un Béziers (gare centrale)-Barcelone et un Béziers est TGV-Barcelone. Il en est de même pour les trajets entre les gares centrales de Béziers ou Narbonne et le même trajet à l'origine ou à destination de la gare nouvelle Béziers-Narbonne TGV (Nissan).

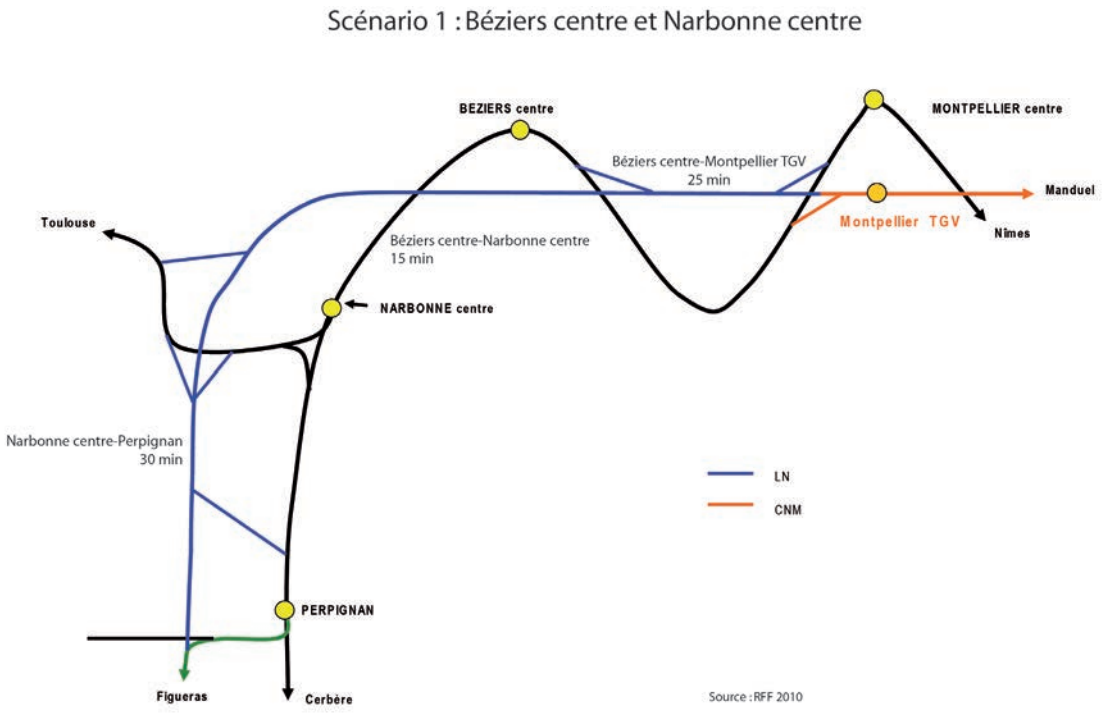


Figure 1 : Schéma fonctionnel du scénario 1

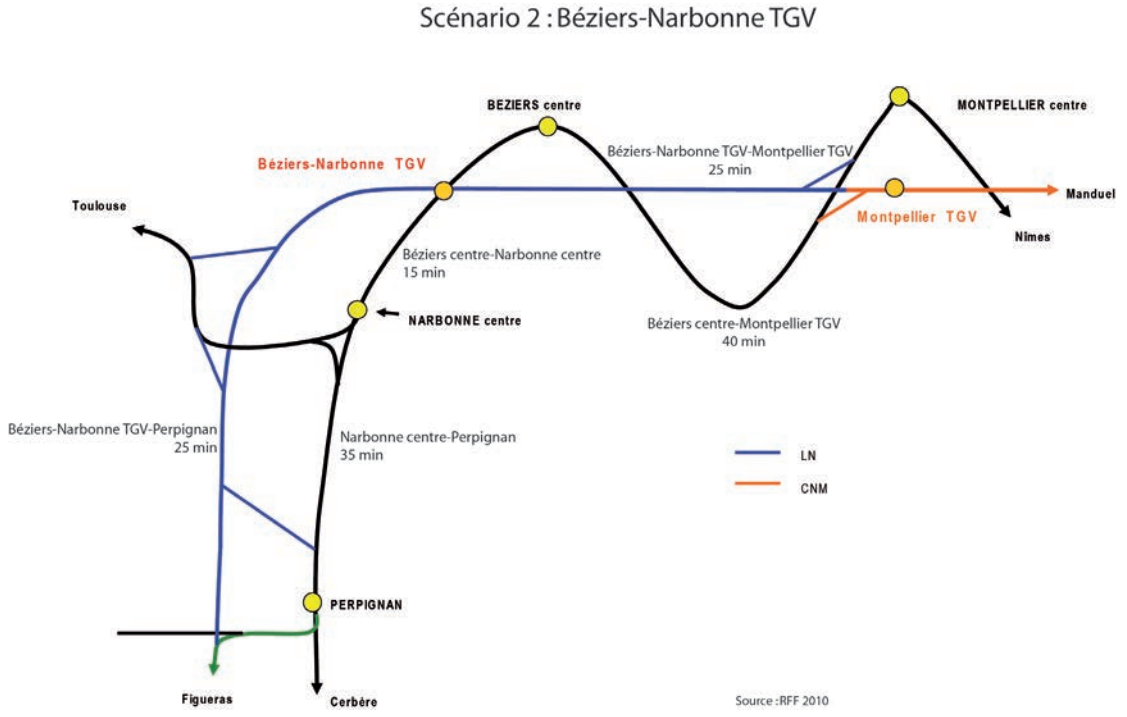


Figure 2 : Schéma fonctionnel du scénario 2

Le nombre de gares étudiées varie de quatre à six selon le scénario :

Scénario 1 :
Montpellier est (gare nouvelle)
Béziers centre
Narbonne centre
Perpignan centre

Scénario 2 :
Montpellier est (gare nouvelle)
Béziers centre
Narbonne centre
Perpignan centre
Béziers-Narbonne TGV (gare nouvelle)

Scénario 3 :
Montpellier est (gare nouvelle)
Béziers centre
Narbonne centre
Perpignan centre
Béziers-TGV (gare nouvelle)

Scénario 4 :
Montpellier est (gare nouvelle)
Béziers centre
Narbonne centre
Perpignan centre
Narbonne-TGV (gare nouvelle)

Scénario 5 :
Montpellier est (gare nouvelle)
Béziers centre
Narbonne centre
Perpignan centre
Béziers-TGV (gare nouvelle)
Narbonne-TGV (gare nouvelle)

Au départ de Narbonne vers Paris le gain de temps TGV est de 15 minutes avec le scénario 1 (via Narbonne centre), de 30 minutes avec le scénario 2 (via Béziers-Narbonne TGV), de 35 minutes avec le scénario 3 (via Béziers TGV), de 25 minutes avec le scénario 4 (via Narbonne TGV) et de 20 minutes avec le scénario 5 (via Narbonne TGV et Béziers TGV).

Depuis Perpignan vers Paris les gains de temps sont encore plus importants : 20 minutes avec le scénario 1 (via Narbonne centre et Béziers centre), 40 minutes avec le scénario 2 (via Béziers-Narbonne TGV), 42 minutes avec le scénario 3 (via Béziers TGV), 37 minutes avec le scénario 4 (via Narbonne TGV) et 32 minutes avec le scénario 5 (via Béziers TGV et Narbonne TGV).

Au départ de Béziers vers Paris on gagne 15 minutes avec le scénario 1 (via Béziers centre), 15 minutes avec le scénario 2 (via Béziers-Narbonne TGV), 20 minutes avec les scénarios 3 et 5 (via Béziers TGV) et seulement 10 minutes avec le scénario 4 (via Narbonne TGV).

Vers Barcelone, depuis Béziers on observe un gain de 5 minutes avec le scénario 1 (via Béziers centre et Narbonne centre), 25 minutes avec le scénario 2 (via Béziers-Narbonne TGV), 22 minutes avec le scénario 3 (via Béziers TGV), 27 minutes avec le scénario 4 (via Narbonne TGV) et 12 minutes avec le scénario 5 (via Béziers TGV et Narbonne TGV).

Sur des trajets Narbonne-Barcelone on économise 5 minutes avec le scénario 1 (via Narbonne centre), 10 minutes avec le scénario 2 (via Béziers-Narbonne TGV), 7 minutes avec le scénario 3 (via Béziers TGV) et 12 minutes avec les scénarios 4 et 5 (via Narbonne TGV).

Rappelons qu'il s'agit ici uniquement de temps TGV. L'analyse ne prend pour l'instant pas en compte l'accessibilité routière vers la gare TGV.

Différentiels de temps de parcours entre couples de gares

Afin de déterminer avec précision les limites d'attraction entre les gares selon le sens du déplacement TGV (vers le nord ou vers le sud), il est indispensable d'analyser finement les différentiels d'accessibilité TGV entre les couples de gares étudiés (données RFF). Cette analyse est un préalable indispensable pour la suite de l'étude dans la mesure où les résultats obtenus seront combinés avec les temps d'accès routiers aux différentes gares. Par exemple, un différentiel d'accès routier de 5 minutes favorable à une gare centrale peut être annulé par un gain de temps TGV de 10 minutes via l'une des gares nouvelles. À noter qu'un même scénario peut présenter un différentiel positif (gain de temps) dans un sens et négatif dans un autre. Cette différenciation selon le sens du déplacement est essentielle du fait de la localisation des gares nouvelles par rapport aux agglomérations qu'elles desservent.

La synthèse de ce travail est portée ci-dessous (Tableau 1, vers le nord et Tableau 2, vers le sud). Les couples sont présentés dans le même ordre que ceux figurant dans la légende des cartes nord et sud. Afin de faciliter la lecture des tableaux, les gains de temps entre couples de gares sont également portés sur les figures 1 à 5.

La lecture des tableaux s'opère de la manière suivante. Par exemple, pour calculer la limite d'égale attraction entre Narbonne centre et Béziers centre pour un déplacement vers le nord (Tableau 1, scénario 1, première ligne), les temps de parcours routiers vers Narbonne centre seront majorés de 15 minutes afin de tenir compte du temps supplémentaire passé dans le TGV entre Narbonne et Béziers sur la ligne classique

(LC). Ainsi, les habitants d'une commune située à 10 minutes en voiture (VP) de la gare de Narbonne centre et à 20 minutes en voiture de celle de Béziers centre auront intérêt à prendre le train à Béziers pour optimiser leur temps total de parcours (VP + TGV) vers le nord (20 min VP < 10 min VP + 15 min TGV). Cette majoration de 15 minutes permet d'affecter automatiquement ces habitants à l'aire d'attraction de Béziers centre.

La deuxième ligne du Tableau 1 est utilisée pour déterminer la limite d'attraction entre les gares de Béziers centre et Montpellier TGV (scénario 1, trajets vers le nord). Les temps VP vers Béziers centre sont majorés de 25 minutes par rapport aux rabattements VP sur Montpellier TGV pour tenir compte des 25 minutes supplémentaires passées dans le TGV entre les deux gares. Ainsi, les habitants d'une commune située à 10 minutes en voiture (VP) de la gare de Béziers centre et à 40 minutes en voiture de celle de Montpellier TGV auront intérêt à prendre le train à Béziers pour optimiser leur temps total de parcours (VP + TGV) vers le nord (10 min VP + 25 min TGV < 40 min VP).

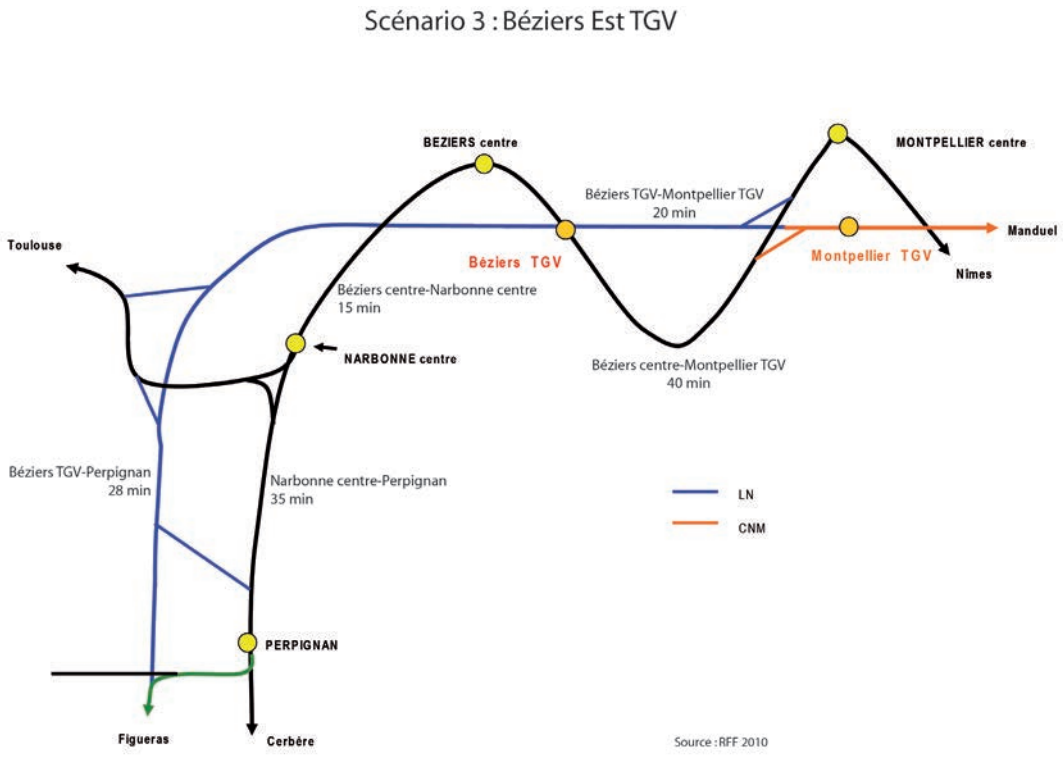


Figure 3 : Schéma fonctionnel du scénario 3

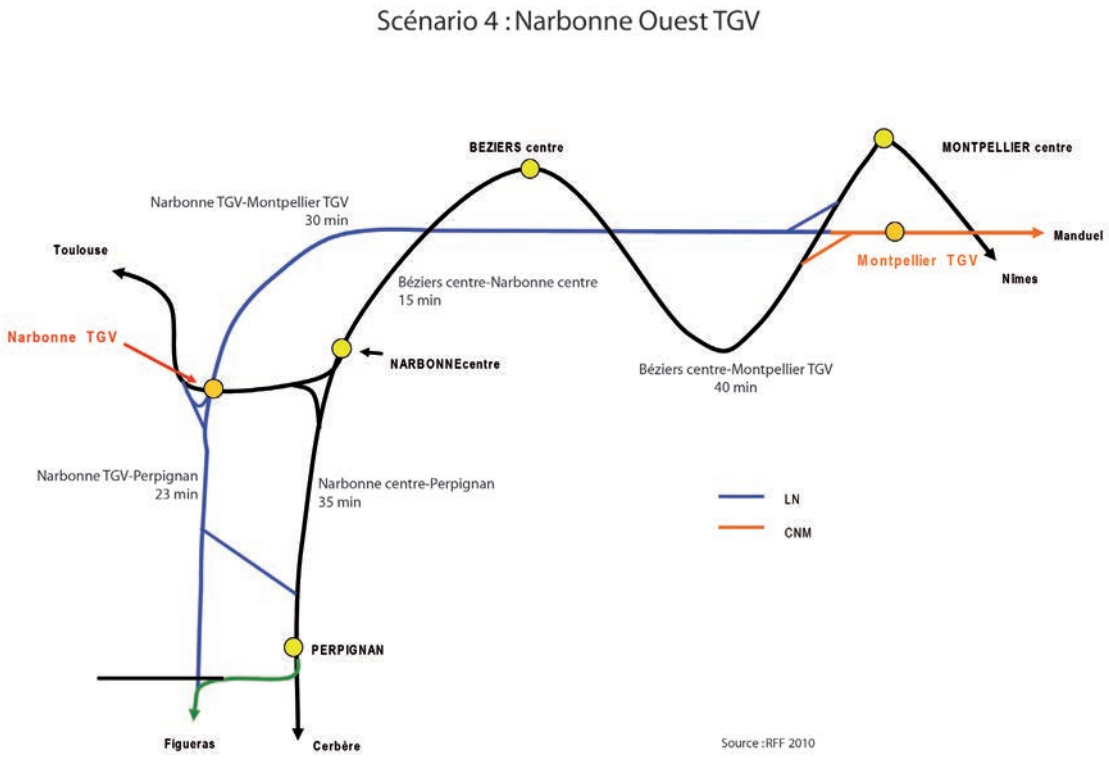


Figure 4 : Schéma fonctionnel du scénario 4

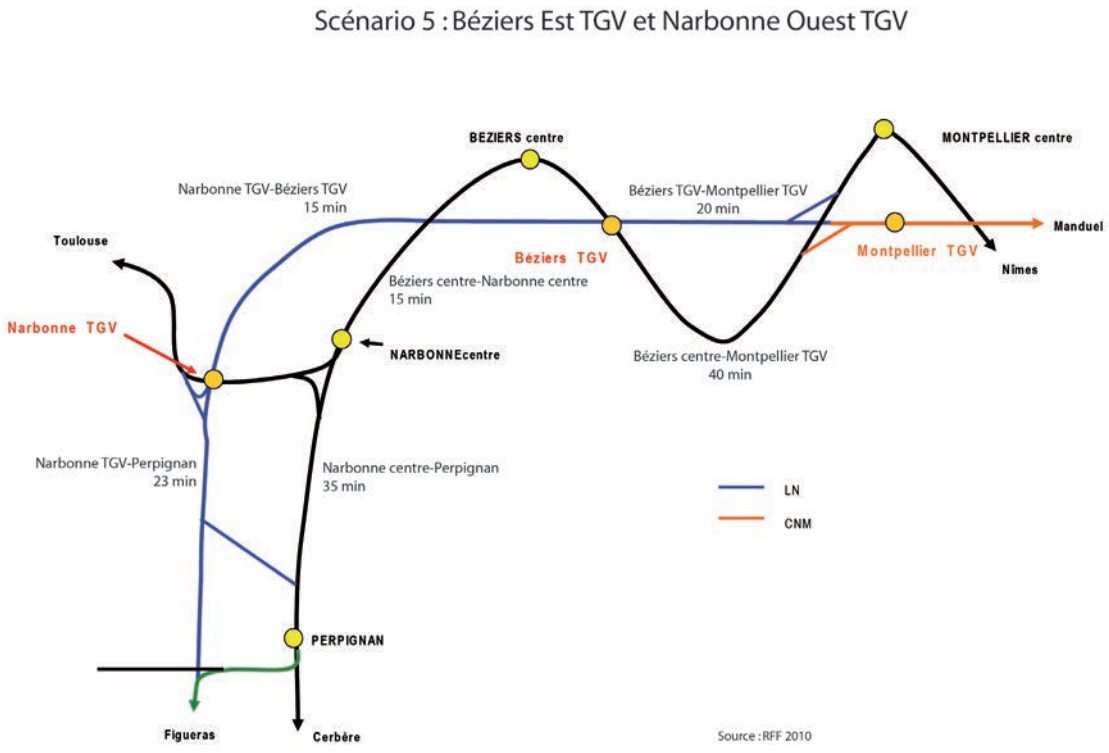


Figure 5 : Schéma fonctionnel du scénario 5

LC = ligne classique LN = ligne nouvelle	Béziers centre	Narbonne centre	Perpignan centre	Béziers Narbonne TGV	Béziers TGV	Narbonne TGV	Montpellier TGV
Scénario 1							
	0	+15' LC					
	+25' LN						0
		0	+30' LN				
Scénario 2							
	+40' LC						0
				+25' LN			0
	0	+15' LC					
			+25' LN	0			
		0	+35' LC				
	+40' LC			+25' LN			
		+55' LC		+25' LN			
Scénario 3							
	+40' LC						0
					+20' LN		0
	0	+15' LC					
			+28' LN		0		
		0	+35' LC				
		+55' LC			+20' LN		
	+40' LC				+20' LN		
Scénario 4							
	+40' LC						0
						+30' LN	0
	0	+15' LC					
			+23' LN			0	
		0	+35' LC				
	+40' LC					+30' LN	
		+55' LC				+30' LN	
Scénario 5							
	+40' LC						0
					0	+15' LN	
	0	+15' LC					
					+20' LN		0
		0	+35' LC				
			+23' LN			0	

Tableau 1 **: Différentiels de temps de parcours TGV entre couples de gares** / *trajets vers le nord*

LC = ligne classique LN = ligne nouvelle	Béziers centre	Narbonne centre	Perpignan centre	Béziers Narbonne TGV	Béziers TGV	Narbonne TGV	Montpellier TGV
Scénario 1							
	+15' LC	0					
	0						+25' LN
		+30' LN	0				
Scénario 2							
	0						+40' LC
				0			+25' LN
	+15' LC	0					
			0	+25' LN			
		+35' LC		+25' LN			
		+35' LC	0				
	+50' LC			+25' LN			
Scénario 3							
	0						+40' LC
					0		+20' LN
	+15' LC	0					
			0		+28' LN		
		+35' LC			+28' LN		
		+35' LC	0				
	+50' LC				+28' LN		
Scénario 4							
	0						+40' LC
						0	+30' LN
	+15' LC	0					
			0			+23' LN	
		+35' LC	0				
		+35' LC				+23' LN	
	+50' LC					+23' LN	
Scénario 5							
	0						+40' LC
					+15' LN	0	
	+15' LC	0					
					0		+20' LN
		+35' LC	0				
			0			+23' LN	

Tableau 2 **:** *Différentiels de temps de parcours TGV entre couples de gares / trajets vers le sud*

Analyse comparative des accessibilités routières aux gares TGV

Objectifs

Ce volet a pour objet de déterminer les temps d'accès routiers à l'horizon 2020 à partir des différentes communes du périmètre d'étude et à destination des gares TGV étudiées. Les aires d'attraction spatio-temporelles respectives de ces gares ont été cartographiées et analysées. Les résultats tiennent compte des projets d'amélioration du réseau routier au sein du périmètre d'étude. Les temps de parcours calculés intègrent le temps nécessaire au stationnement du véhicule et les trajets pédestres terminaux entre le parking et la gare. Ces temps de stationnement et de cheminement ont été évalués à 10 minutes pour toutes les gares étudiées. Ils reposent sur des relevés de terrain en gares centrales de Béziers et Narbonne et dans des gares nouvelles en service comme Avignon TGV ou Valence TGV.

Seront plus précisément calculés : les temps d'accès aux gares centrales de Béziers et Narbonne et les temps d'accès à chacune des gares nouvelles (Béziers-Narbonne TGV, Béziers-est TGV et Narbonne-ouest TGV), et les différentiels de temps entre les gares afin de déterminer leurs aires d'attraction potentielle respectives. En effet, le calcul des temps minimaux entre chacune des communes et les gares existantes ou projetées permettra d'affecter ces communes à l'aire d'attraction de la gare la plus pertinente pour l'usager en tenant compte du sens du déplacement (vers le nord ou vers le sud) et du gain de temps TGV, lequel varie selon le scénario évalué comme nous venons de le voir.

Connaissant les populations des communes de départ il sera possible d'apprécier la population desservie selon le temps d'accès aux différentes gares en tenant compte des limites des aires d'attraction. On pourra ainsi connaître la quantité de population captée par telle ou telle gare en un temps donné. Les analyses ont été menées à l'horizon 2020. Cela implique de disposer d'informations concernant l'évolution des réseaux routiers et des populations communales.

Fondements et principes de modélisation des réseaux

Les réseaux routier et autoroutier de l'aire d'étude ont été modélisés par un graphe valué (Bavoux & Chapelon, 2014) décrit sous forme alphanumérique. La théorie des graphes (Cogis & Robert, 2003) est l'un des moyens les plus efficaces pour modéliser les réseaux de transport (Mathis, 2007). Aux nœuds des réseaux sont associés les sommets du graphe et aux liens, les arcs. Couplé à un principe de description des graphes en machine (Chapelon 1997), ce type de modélisation permet de bénéficier directement de la puissance de calcul offerte par les ordinateurs.

Du réseau au graphe

Le choix des sommets est guidé par une double exigence :

- que l'ensemble des communes de l'aire d'étude soit modélisé par au moins un sommet localisé au centre-ville afin d'intégrer la totalité des habitants aux calculs d'accessibilité,
- que le graphe rende compte avec précision de la consistance et du fonctionnement du réseau routier à l'horizon 2020.

Cela implique que les nœuds stratégiques dans l'organisation et le fonctionnement du réseau routier (carrefours, échangeurs) soient pris en considération et que les changements de caractéristiques techniques des infrastructures linéaires soient modélisés (création d'arcs et de sommets distincts).
Nous considérons qu'un arc correspond à un tronçon de route présentant des caractéristiques techniques relativement homogènes sur toute sa longueur. Les arcs du graphe doivent retranscrire avec précision :

- les caractéristiques techniques des infrastructures routières : nombre, largeur, agencement, pente, sinuosité des voies, existence d'un séparateur central de chaussées, largeur des espacements latéraux…
- les caractéristiques fonctionnelles du réseau : sens uniques de circulation en milieu urbain, possibilités directionnelles aux carrefours …
- les variations de la nature de l'environnement spatial, urbain ou interurbain, dans lequel s'inscrivent les voies.

Ces éléments influencent directement la vitesse de circulation des automobilistes. Dans le cadre de cette étude, ils seront pris en considération sous la forme de 9 classes d'infrastructures numérotées de R1 à R9 (Tableau 3). Chaque tronçon de voie sera affecté à l'une de ces neuf classes.

Si le nombre de classes n'est pas limitatif, nous postulons que la discrimination opérée ici est suffisamment fine pour modéliser avec précision le réseau routier régional tant dans ses caractéristiques urbaines qu'interurbaines.

Classe	Caractéristiques techniques des infrastructures
R1	Autoroute
R2	Voie express interurbaine : double chaussée de type autoroutier et route de liaison principale ou régionale à chaussées séparées.
R3	Voie rapide urbaine : autoroute ou double chaussée de type autoroutier avec accotement réduit (< 60cm).
R4	Route de liaison principale ou régionale à 3 ou 4 voies ou à 2 voies larges, largeur :]7m-9m].
R5	Route de liaison principale ou régionale à 2 voies « standards », largeur :]5m-7m].
R6	Route de liaison principale ou régionale et route de desserte locale à 1 ou 2 voies étroites, largeur : 5m.
R7	Artère urbaine : pénétrante ou rocade structurante du réseau routier urbain.
R8	Boulevard urbain : voie de desserte urbaine principale.
R9	Rue : voie de desserte urbaine locale.

Tableau 3 : Les neuf classes d'infrastructures routières modélisées

L'affectation des tronçons de voies à telle ou telle classe sera réalisée à partir des informations techniques fournies notamment par les cartes routières au 1/150 000e (liaisons interurbaines) et au 1/12 000e (liaisons intra urbaines) et par nos propres relevés de terrain.

Le réseau modélisé tient compte des projets d'aménagements routiers en cours et ceux prévus à l'horizon 2020 et décrits dans les documents des schémas de cohérence territoriale (SCOT).

Du graphe à la machine

Le logiciel utilisé pour la conception du graphe, pour les calculs d'accessibilité et pour la cartographie des résultats est le logiciel MAPNOD (Chapelon, L'Hostis, 1993-2017). Deux types de fichiers d'entrée permettent la description alphanumérique du graphe en machine. Le fichier des sommets regroupe le nom, le code, la population et les coordonnées géographiques des nœuds. Le fichier des arcs rassemble le code du sommet d'origine, le code du sommet de destination, le code de la classe d'infrastructures à laquelle est rattaché l'arc, la longueur de l'arc en mètres et le temps moyen nécessaire pour le parcourir.

Le principe de modélisation permet de travailler simultanément sur des arcs orientés et non orientés. L'orientation s'applique aux classes d'infrastructures (R1, R2… R9). Les classes possédant au moins un arc orienté (sens unique de circulation) ont la totalité de leurs arcs qui sont orientés dans la base de données. Dans ce cas, une voie à sens unique est décrite par un arc (i, j) et une voie à double sens par deux arcs distincts (i, j) et (j, i). Les arcs des autres classes sont considérés automatiquement comme orientés dans les deux sens et n'ont donc pas à être doublés dans la base.

Calcul des temps moyens de parcours

À chaque classe d'infrastructures est associée une vitesse moyenne de circulation théorique (Appert & Chapelon 2007, Chapelon 2000 & 1997). Cette vitesse est donnée pour une automobile de cylindrée moyenne. Elle correspond à un fonctionnement fluide du réseau qui, sans être totalement idéal, permet des vitesses de circulation relativement proches de celles autorisées même si les dépassements peuvent parfois être délicats (Tableau 4). En d'autres termes, il s'agit d'un fonctionnement normal (hors congestion) du réseau.

Classe	Caractéristiques techniques des infrastructures	Vitesse moyenne
		France
R1	Autoroute	110 km/h
R2	Voie express interurbaine : double chaussée de type autoroutier et route de liaison principale ou régionale à chaussées séparées.	90 km/h
R3	Voie rapide urbaine : autoroute ou double chaussée de type autoroutier avec accotement réduit (< 60cm).	65 km/h
R4	Route de liaison principale ou régionale à 3 ou 4 voies ou à 2 voies larges, largeur :]7m-9m].	70 km/h
R5	Route de liaison principale ou régionale à 2 voies « standards », largeur :]5m-7m].	60 km/h
R6	Route de liaison principale ou régionale et route de desserte locale à 1 ou 2 voies étroites, largeur : 5m.	50 km/h
R7	Artère urbaine : pénétrante ou rocade structurante du réseau routier urbain.	50 km/h
R8	Boulevard urbain : voie de desserte urbaine principale.	35 km/h
R9	Rue : voie de desserte urbaine locale.	25 km/h

Tableau 4 : Vitesses moyennes retenues

Cette méthode repose sur un compromis entre la volonté d'approcher au plus près la réalité des déplacements et celle d'offrir un niveau satisfaisant de généralité dans l'interprétation des résultats de l'étude. Généralité impossible à obtenir avec une approche désagrégée basée sur le calcul des temps d'accès à l'instant t et tenant compte de l'encombrement des voies (Appert & Chapelon, 2007).

Deux arguments principaux permettent de justifier la préférence accordée à un fonctionnement non congestionné du réseau pour caractériser la situation de référence : d'une part, le caractère ponctuel et très aléatoire des phénomènes de congestion sur les liaisons interurbaines ; d'autre part, en milieu urbain, la relative concentration des pics de circulation au cours de la journée rendant les périodes de congestion très minoritaires.

Le temps de parcours (t) sur chaque arc (i, j) sera obtenu automatiquement en divisant sa longueur (l) par la vitesse (v) de la classe d'infrastructure à laquelle appartient le tronçon modélisé.

Une fois les temps de parcours calculés sur l'ensemble des arcs du graphe, on procède à la recherche des itinéraires optimaux. Les problèmes de cheminement sont des problèmes anciens de la théorie des graphes (Teghem, 2012). Il existe de nombreux algorithmes de recherche de plus courts chemins dans un graphe : algorithme de Ford (1956), algorithme de Bellman (1958), algorithme de Moore (1957) et Dijkstra (1959) et ses variantes Dantzig (1960), Whiting & Hillier (1960), algorithme de Floyd (1962). Ce dernier appartient à la famille des algorithmes matriciels, lesquels permettent de déterminer les plus courts chemins entre tous les couples de sommets du graphe (Minoux & Bartnik, 1986).

Sous sa forme originelle, l'algorithme de Floyd a été conçu pour s'appliquer à un 1-graphe, ce qui signifie qu'entre un couple i, j de sommets adjacents il ne peut pas exister plus d'un arc dans chaque sens (i, j et j, i). Pour chaque couple i, j de sommets du graphe, l'algorithme cherche, pour tout sommet k, s'il n'existe pas un chemin plus court que le chemin l(i, j) passant par k (Figure 6). Dès qu'il en trouve un, il modifie la valeur de l(i, j) dans la matrice des chemins et continue la recherche avec cette nouvelle valeur.

Ce type d'algorithme est particulièrement bien adapté pour le calcul des cheminements routiers et plus largement pour le calcul des itinéraires optimaux des modes de transport individuels.

Cartographie des résultats

Les résultats sont représentés sous forme de cartes en arcs colorés (Carte 1).

Le principe d'élaboration des cartes (L'Hostis, 1997) est décrit figure 7. Les temps de parcours routiers vers les différentes gares sont calculés pour chacun des sommets du graphe. La discrétisation des temps de parcours permet d'attribuer à chaque sommet une couleur correspondant à une classe de valeurs préalablement fixée : [0-20], [20-30[, [30-40] dans l'exemple de la Figure 7.

Lorsque les sommets situés à chaque extrémité d'un arc appartiennent à la même classe, l'arc est coloré entièrement de la même couleur (Figure 7). Lorsqu'ils appartiennent à deux classes successives ([0-20] et [20-30[), les arcs sont colorés de deux couleurs. Le point de changement de couleur est calculé en fonction des valeurs des deux extrémités et de l'écart avec la borne commune aux deux classes. Lorsqu'ils appartiennent à deux classes non successives ([0-20] et [30-40]), les arcs sont colorés par autant de couleurs que de classes concernées.

Six classes de valeurs ont été retenues pour l'élaboration des cartes d'accessibilité aux gares :

[0 ; 20]	couleur grise
[20 ; 30]	couleur verte
[30 ; 40]	couleur orange
[40 ; 50]	couleur rouge
[50 ; 60]	couleur marron
≥ 60	couleur noire

Rappelons que les 10 premières minutes correspondent au temps nécessaire au stationnement du véhicule et au cheminement pédestre pour se rendre sur le quai de la gare.

Dans le cas des scénarios 1 et 5 à deux gares TGV principales, nous avons combiné les arcs colorés de chacune des deux gares de manière à pouvoir visualiser sur une même carte l'accessibilité routière à la gare TGV la plus proche. Les cartes du scénario 1 combinent les temps d'accès routiers à Béziers centre et Narbonne centre et les cartes du scénario 5 les temps d'accès routiers à Béziers TGV et Narbonne TGV. Techniquement nous avons procédé à la superposition des cartes de chaque gare, à la dissociation des éléments colorés de chacune, à l'association des éléments colorés communs et à la gestion des priorités d'affichage des plans de manière à faire apparaître, au-dessus, les classes

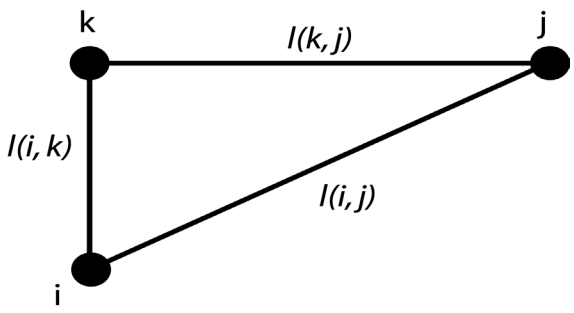
Pour k = 1, 2, ..., n

Pour i = 1, 2, ..., n et pour j = 1, 2, ..., n faire :

$z \leftarrow l(i, k) + l(k, j)$

si $z < l(i, j)$ faire :

$l(i, j) \leftarrow z$ FIN

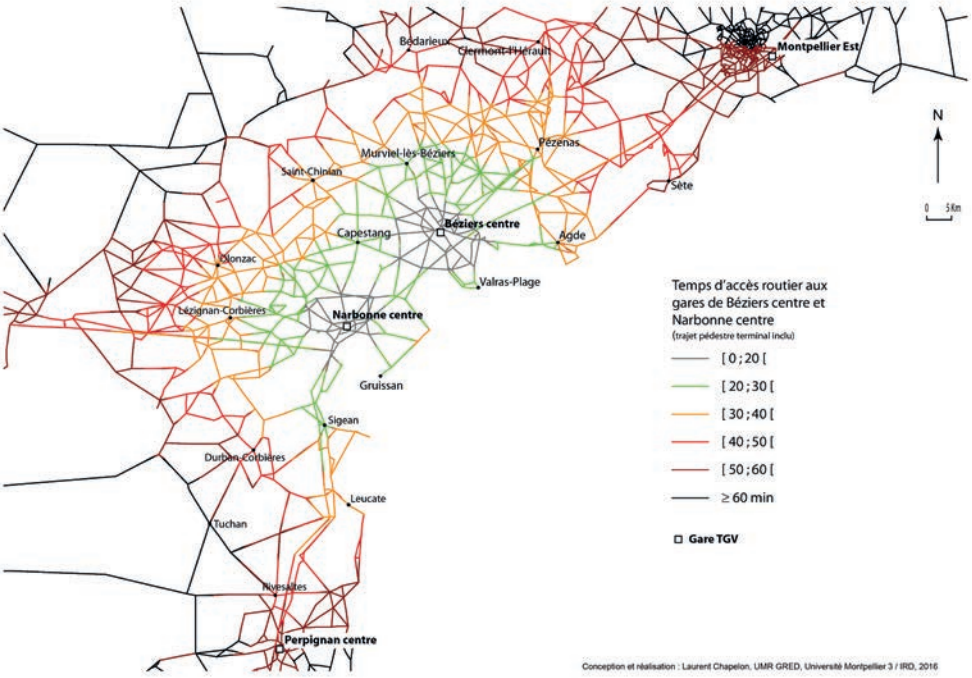


Conception et réalisation : Laurent Chapelon, UMR GRED, Université Montpellier 3 / IRD, 2016

Figure 6 : Principes généraux de l'algorithme de Floyd

Conception et réalisation : Laurent Chapelon, UMR GRED, Université Montpellier 3 / IRD, 2016

Figure 7 : Principes de cartographie en arcs colorés



Carte 1 : Accessibilité routière aux gares de Béziers centre et Narbonne centre

de couleurs du plus faible au plus fort. La carte 1 illustre ce procédé avec l'exemple des gares de Béziers centre et Narbonne centre (scénario 1).

Délimitation des aires d'attraction des gares TGV

Afin de délimiter l'attraction des gares TGV on procède dans un premier temps calcul des différences absolues des temps de parcours entre couples de gares. La limite est tracée sur les valeurs nulles des différences absolues. Les valeurs nulles correspondent aux lieux d'égale attraction entre les gares. Pour ce faire, il est nécessaire de cartographier les différences absolues sous forme d'arcs colorés (Carte 2) en distinguant les valeurs positives (couleur orange – temps de parcours favorables à Béziers centre) des valeurs négatives (couleur cyan – temps de parcours favorables à Narbonne centre). Cette méthode permet ainsi de repérer distinctement les changements de couleu sur les arcs.

La limite des aires d'attraction des deux gares est ensuite tracée en reliant entre eux les points de changement de couleur (Carte 3).

Cette limite est enfin portée sur la carte des temps d'accès routiers à la gare TGV (Carte 4).

La démarche adoptée ici matérialise, sur la carte, la concurrence entre les gares TGV. Deux cas de figure ont été étudiés.

1. Attraction indépendante du sens du trajet TGV : accessibilité monomodale VP seule

Dans ce cas, la limite est donnée directement par le temps d'accès routier à la gare la plus proche, quel que soit le niveau de service (temps TGV) qu'elle offre.

2. Attraction fonction du sens du trajet TGV : accessibilité multimodale VP + TGV

Dans ce cas, l'analyse doit intégrer les temps sur le réseau TGV en fonction du sens (vers le nord ou vers le sud) du trajet ferroviaire. Cet élément modifie en profondeur les limites d'attraction des gares. C'est la combinaison trajet routier + trajet TGV qui détermine l'affectation des populations communales à telle ou telle gare. Par exemple, dans le scénario 1 vers le nord, une commune comme Agde, proche de Béziers, entrera dans l'aire d'attraction de Montpellier TGV car le trajet routier vers cette dernière est plus rapide que le trajet VP + TGV via Béziers centre. Les 25 minutes de TGV entre Béziers centre et Montpellier TGV rendent le trajet monomodal routier plus intéressant pour l'usager.

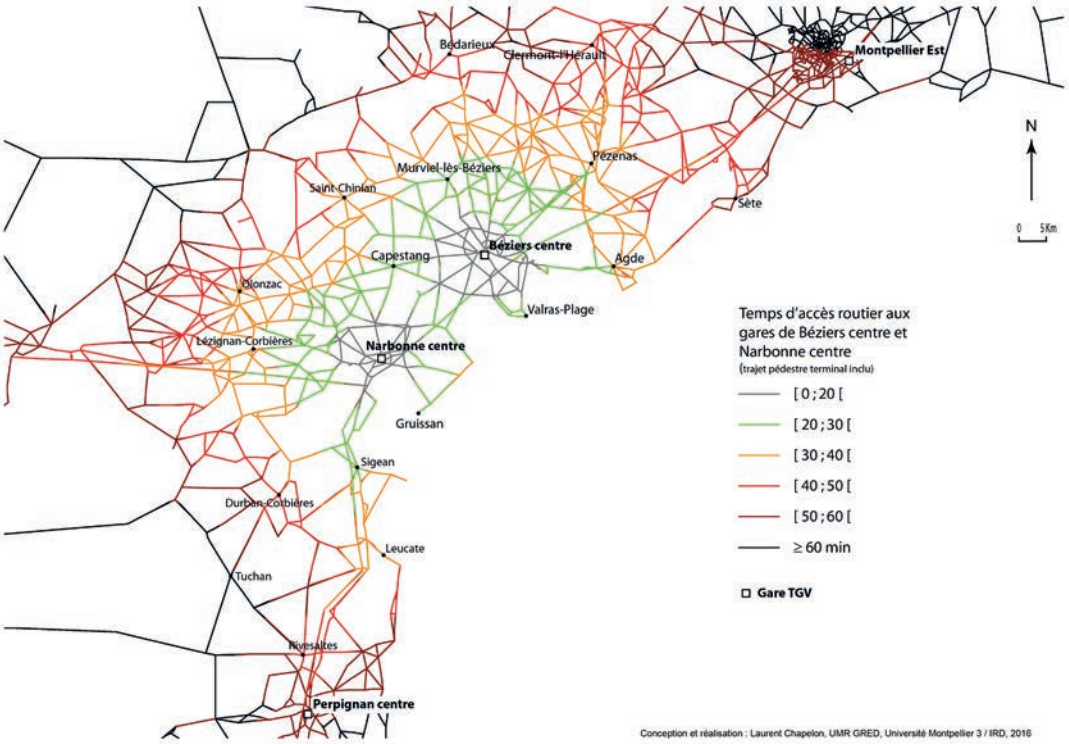
Techniquement, pour chacune des limites obtenues nous avons majoré les temps de parcours routiers vers la gare subissant l'allongement dû au trajet TGV (Béziers centre dans l'exemple ci-dessus). La majoration est égale à la valeur de cet allongement (+ 25 minutes entre Béziers centre et Montpellier TGV vers le nord dans le scénario 1). Rappelons que les majorations vers le nord sont portées dans le tableau 1 et celles vers le sud dans le tableau 2.

L'intérêt de cette approche, qui tient compte du sens du déplacement TGV (vers le nord ou le sud), réside dans l'ajustement des limites d'attraction des gares au comportement des usagers. Il s'agit donc de véritables limites fonctionnelles multimodales (VP+TGV) qui reflètent précisément le comportement d'usagers souhaitant minimiser leur temps total de parcours.

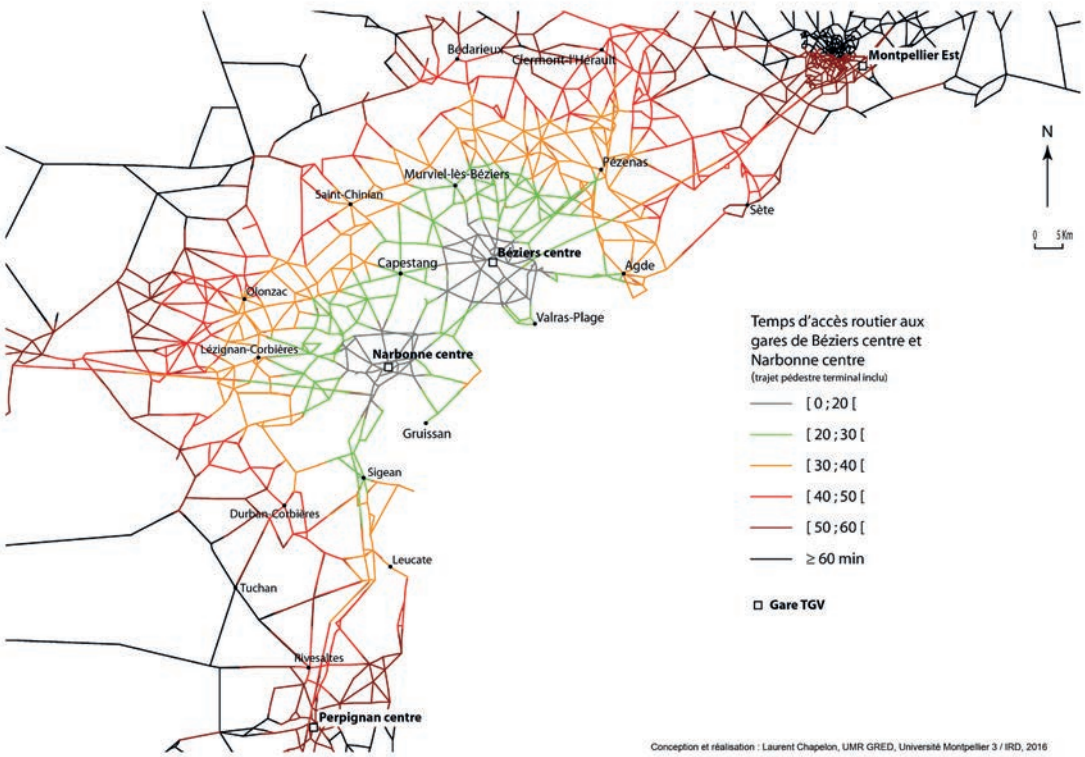
Pour certains habitants, il sera donc préférable de commencer trajet dans la direction opposée à celle de leur destination finale pour gagner du temps. Il s'agit du **phénomène d'inversion spatiale** (Bunge 1962, L'Hostis 2014, Bavoux & Chapelon 2014) que l'approche méthodologique présentée ici permet de modéliser et de cartographier.

Notre approche est uniquement basée sur la comparaison de temps de parcours mono et multimodaux (Chapelon 2016). Elle ne tient pas compte d'éventuels effets psychologiques conduisant parfois certains usagers à privilégier des trajets sous-optimaux leur permettant de minimiser le seul usage de la voiture. Par exemple, pour des trajets entre Sète et Perpignan ou l'Espagne, les résultats du scénario 1 montrent que la solution optimale, pour un usager souhaitant minimiser son temps total de parcours, est de prendre le train à Béziers centre (Carte 5). Or, il est fort probable que tous les sétois n'iront pas prendre le train à Béziers. Certains choisiront de se rendre à Montpellier TGV, plus proche en voiture, même si, au final, le temps VP+TGV est plus long par Montpellier. Nous supposons que cela ne concernera qu'un nombre limité d'indiv ans la mesure où ce type de trajet est fortement dissuasif : trajets VP vers Montpellier TGV au nord puis trajet TGV vers Perpignan au sud.

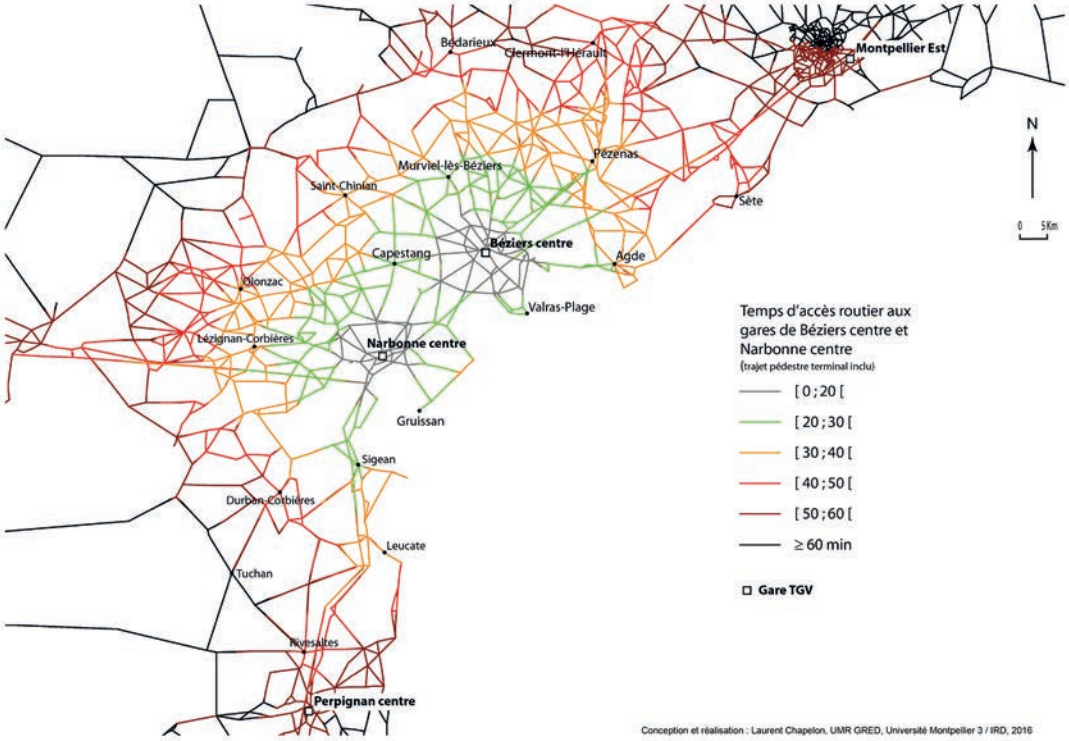
Ces effets psychologiques sont difficiles à ils varient très fortement dans l'espace, dans le temps et surtout d'un individu à l'autre. Leur modélisation, qui nécessite la réalisation de questionnaires et l'analyse de cartes mentales, constitue une perspective de recherche particulièrement intéressante. Elle dépasse le cadre de ce travail. Nous avons opté ici pour la modélisation de comportements rationnels considérant qu'ils concernent le plus grand nombre d'individus. En outre,



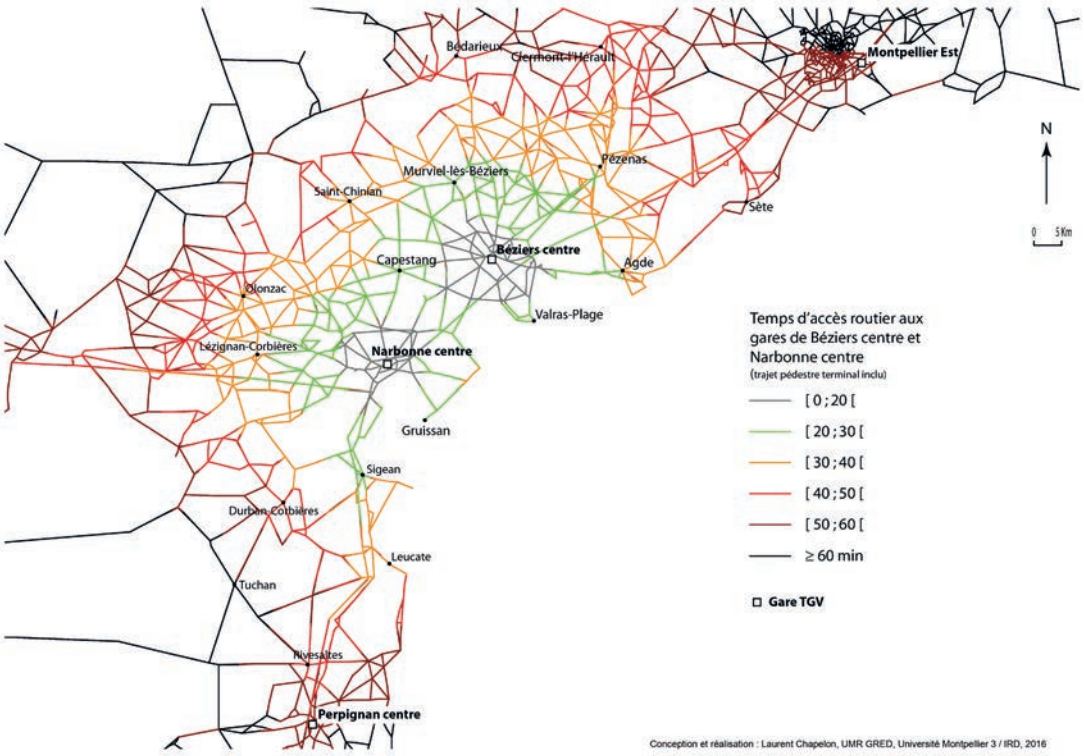
Carte 2 : Différences absolues des temps d'accès routiers à Béziers centre et Narbonne centre



Carte 3 : Limite d'égale attraction entre les gares de Béziers centre et Narbonne centre



Carte 4 : Transfert de la limite d'attraction sur la carte d'accessibilité routière aux gares



Carte 5 : Scénario 1 : Accessibilité routière aux gares de Béziers centre et Narbonne centre

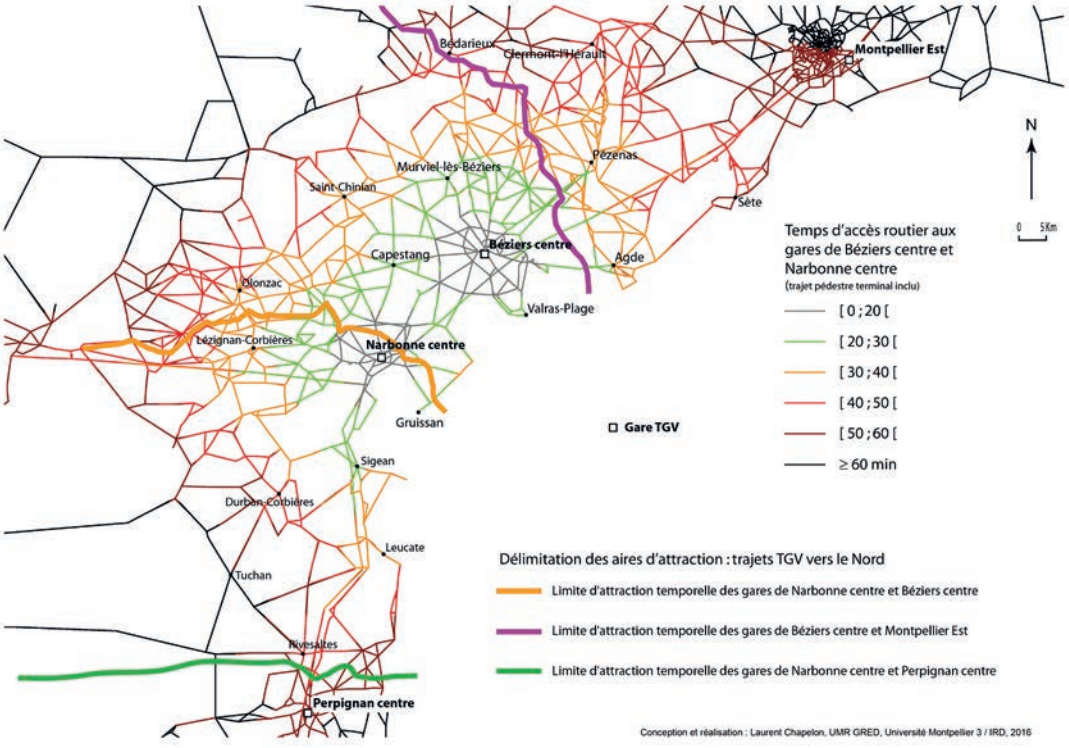
les comportements sous-optimaux sont susceptibles d'évoluer dans le temps vers des comportements plus rationnels visant à minimiser le temps total de parcours.

La limite obtenue entre les aires d'attraction des gares est une limite précise tracée au niveau du changement de couleur des arcs colorés sur des cartes de différences absolues de temps d'accès aux gares. Cette limite peut être considérée comme le point de basculement entre l'attraction des deux gares, mais également comme une ligne d'indécision pour les usagers. Plus on se rapproche de la limite, plus l'écart d'attraction entre les gares s'amenuise et plus les comportements sous-optimaux sont susceptibles de croître. Les limites peuvent ainsi être considérées comme des sortes de « frontières épaisses d'indécision » autour desquelles les comportements ne sont pas forcément tranchés. En revanche, plus on s'éloigne de la l'adoption d'un comportement sous-optimal devient pénalisante pour l'usager.

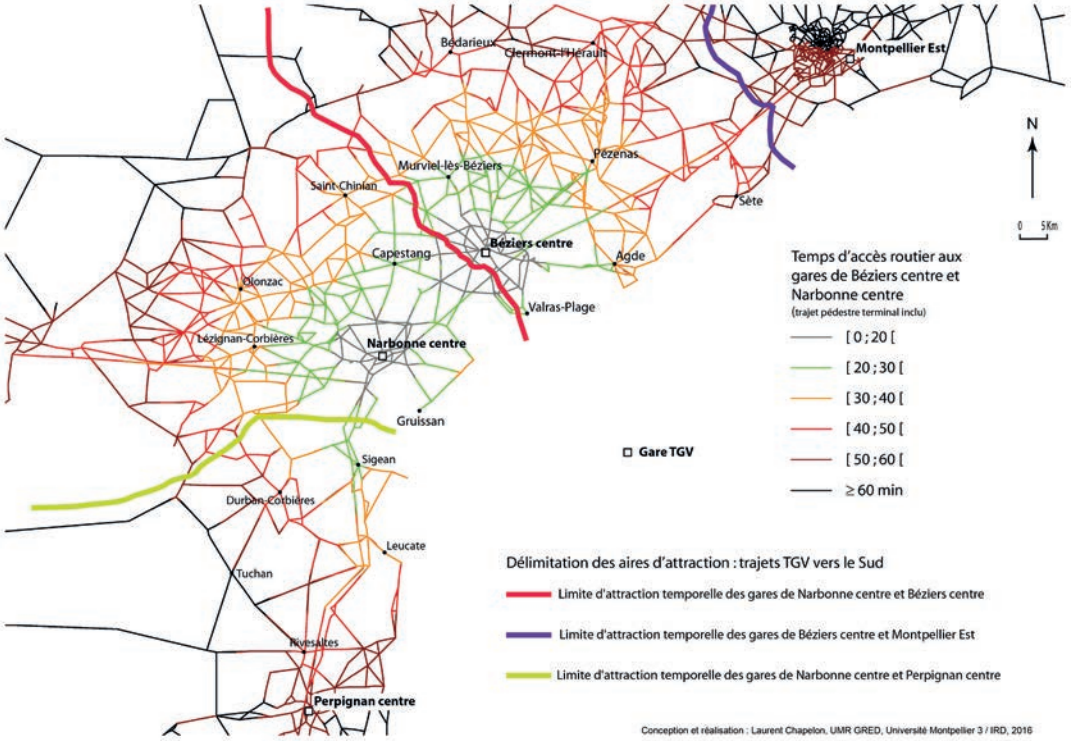
L'étude étant axée sur Béziers et Narbonne nous avons considéré que l'effet de la fréquence de desserte TGV des gares dans la délimitation des aires d'attraction n'était que très faiblement discriminant. L'intégration des fréquences TGV dans la délimitation des aires d'attraction aurait obligé à convertir les différentiels de fréquences en gains ou pertes de temps afin de déplacer les limites d'attraction. Cette conversion est toujours délicate et sujette à débats. En outre, cela aurait rendu beaucoup plus difficile la lecture des résultats. Pour toutes ces raisons, les fréquences de desserte TGV n'ont pas été retenues dans ce travail.

L'accessibilité aux gares est ici une accessibilité monomodale en voiture particulière. Les tests effectués, afin de prendre en considération la possibilité de trajets multimodaux VP+TER pour accéder aux gares TGV, n'ont pas été concluants. En effet, dans tous les cas, les trajets monomodaux routiers sont plus performants que les trajets multimodaux compte tenu de la faible performance de certaines liaisons TER et de la pénibilité de la double rupture de charge VP/TER et TER/TGV.

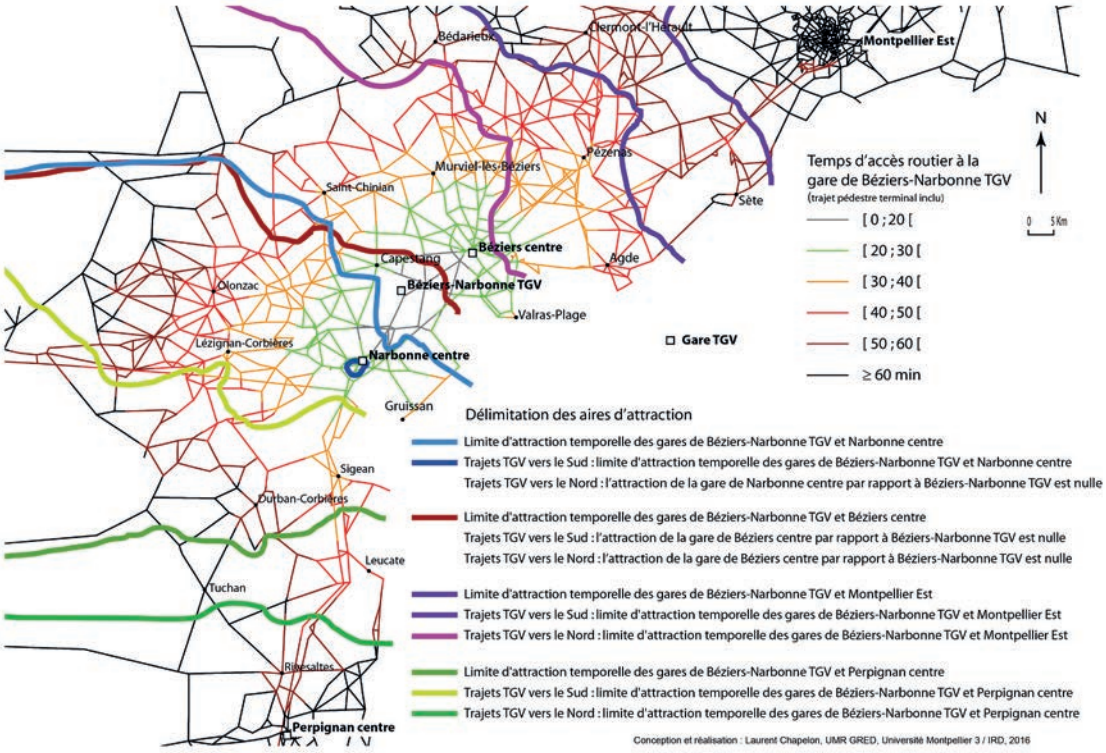
Pour chacun des cinq avons élaboré une carte de synthèse regroupant toutes les limites d'attraction, une carte spécifique aux trajets vers le nord et une carte spécifique aux trajets vers le sud (Cartes 5 à 19). A noter que dans certains cas, l'attraction d'une gare par rapport à une autre peut être nulle. Cette particularité est mentionnée directement dans la légende de la carte.



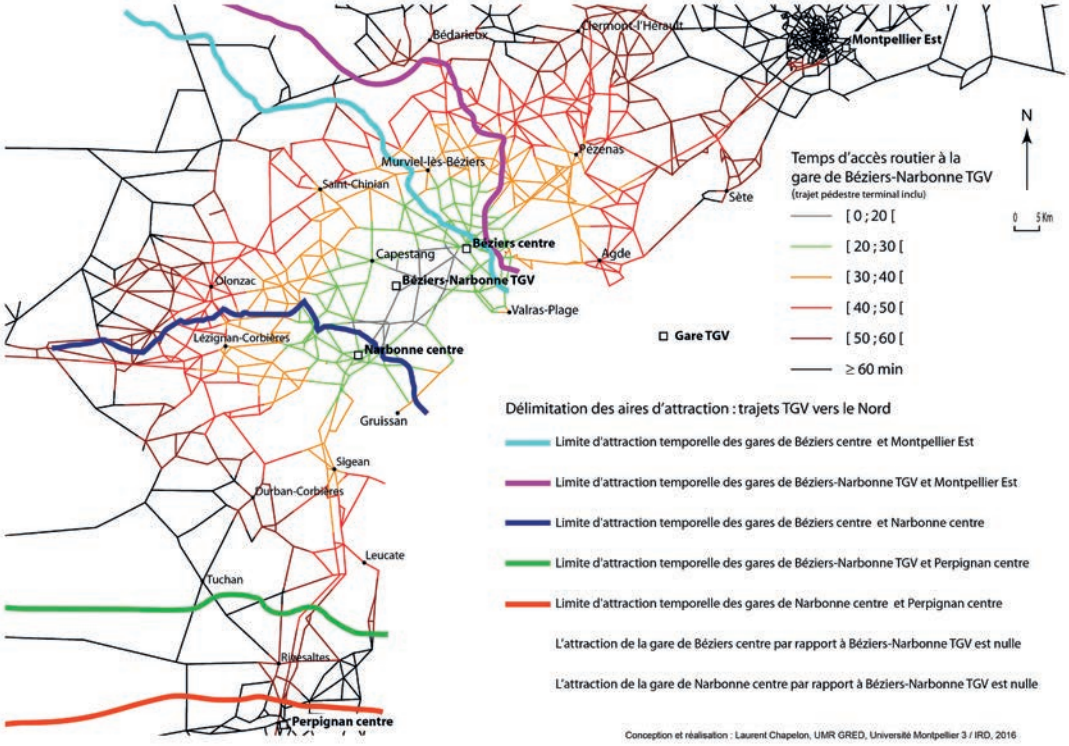
Carte 6 : Scénario 1 : Accessibilité routière aux gares de Béziers centre et Narbonne centre (vers le nord)



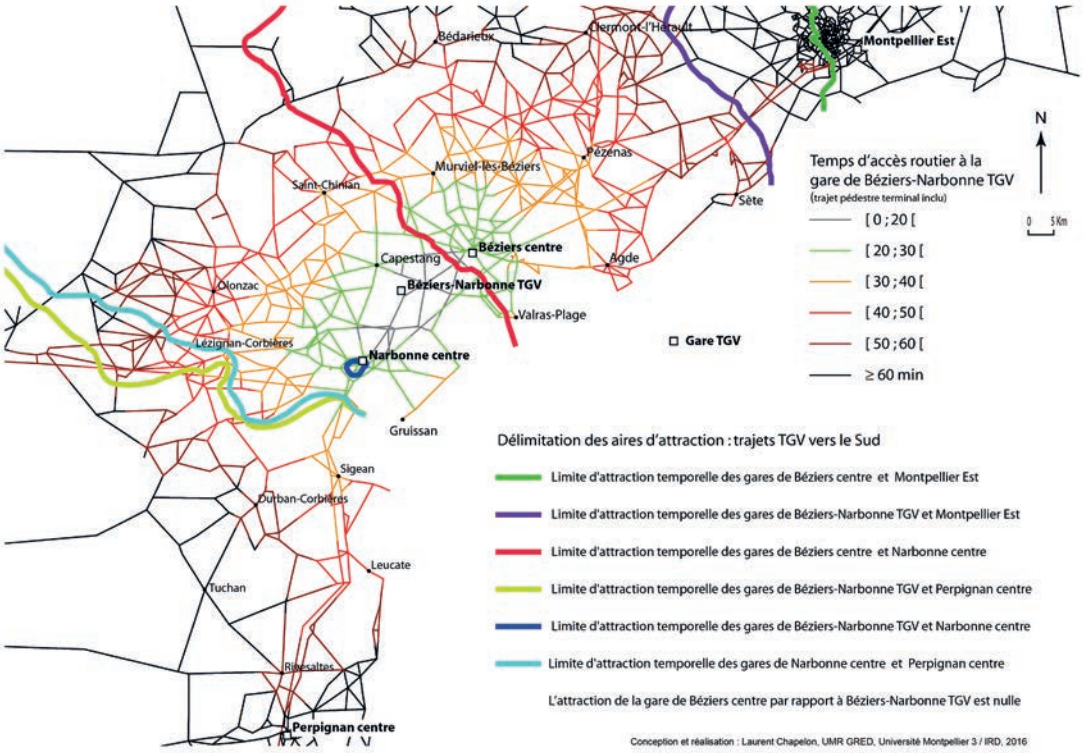
Carte 7 : Scénario 1 : Accessibilité routière aux gares de Béziers centre et Narbonne centre (vers le sud)



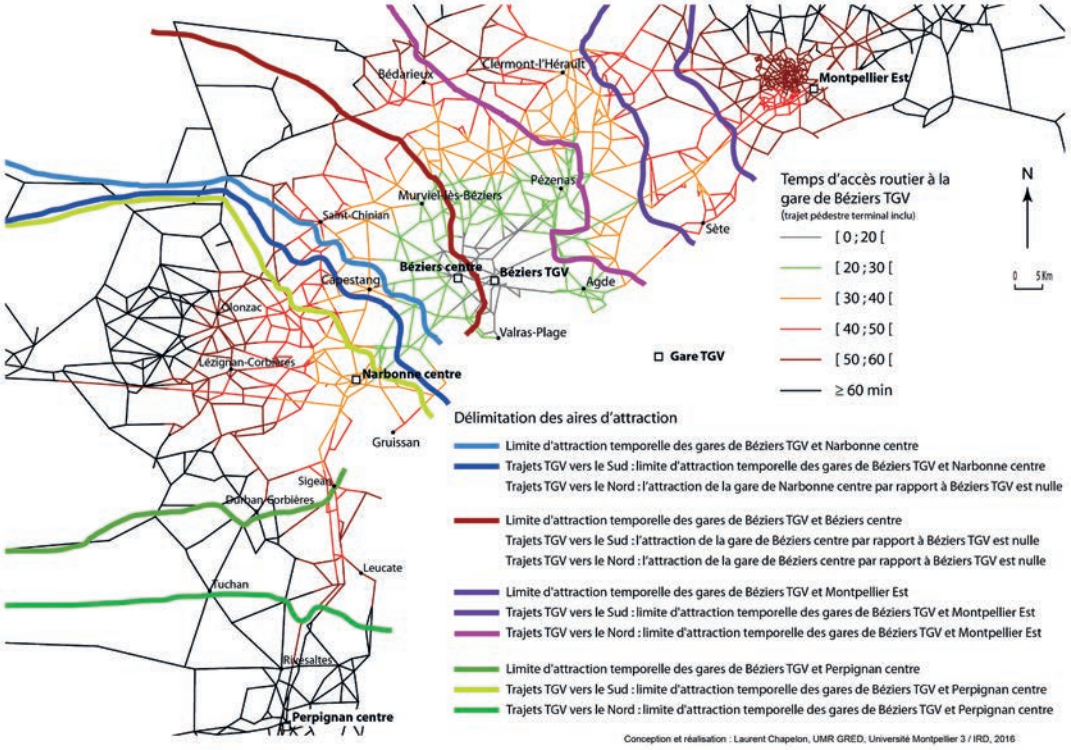
Carte 8 : Scénario 2 : Accessibilité routière à la gare de Béziers-Narbonne TGV



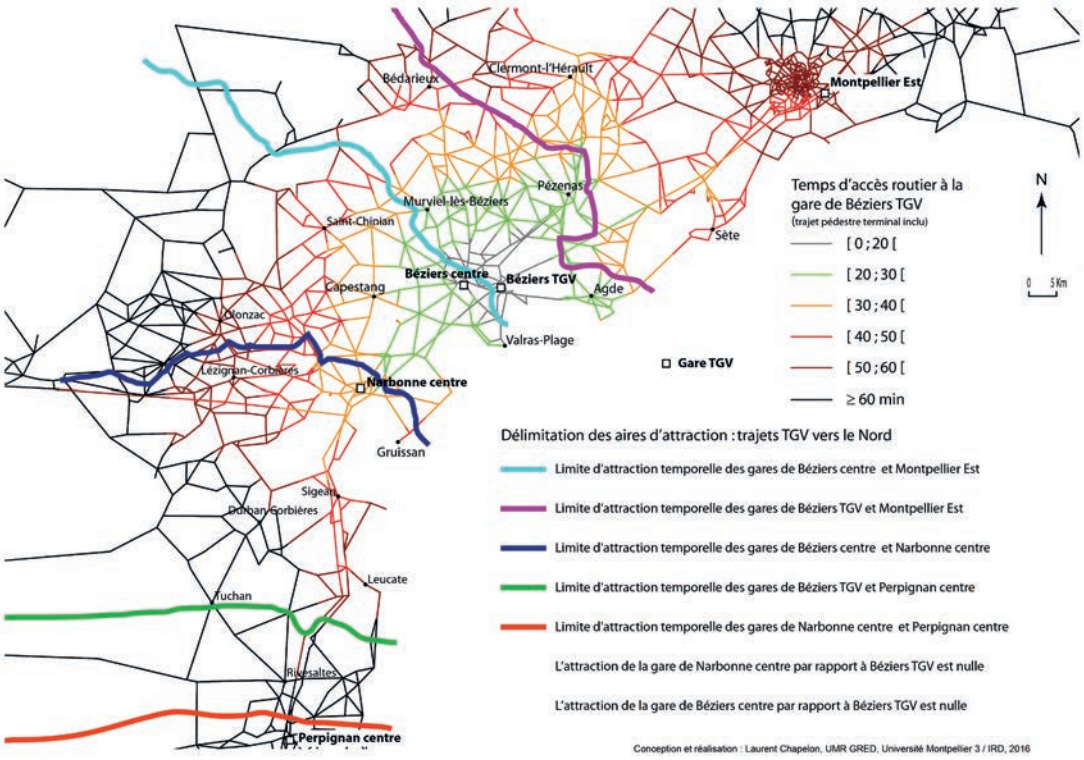
Carte 9 : Scénario 2 : Accessibilité routière à la gare de Béziers-Narbonne TGV (trajets vers le nord)



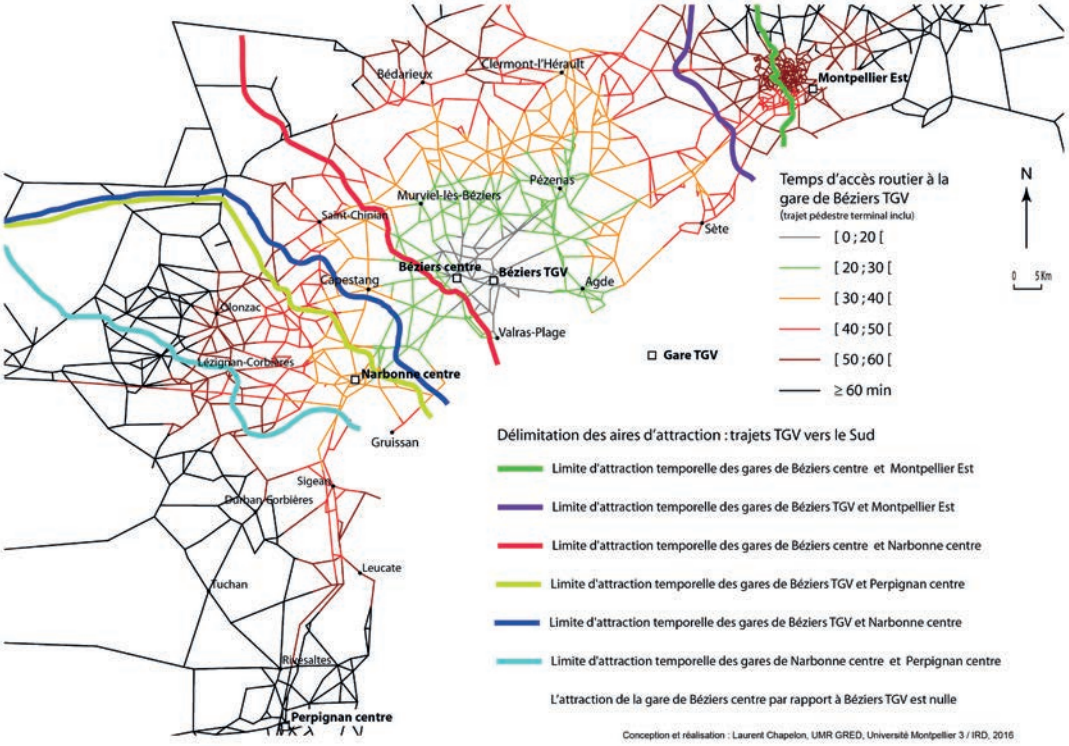
Carte 10 : Scénario 2 : Accessibilité routière à la gare de Béziers-Narbonne TGV (trajets vers le sud)



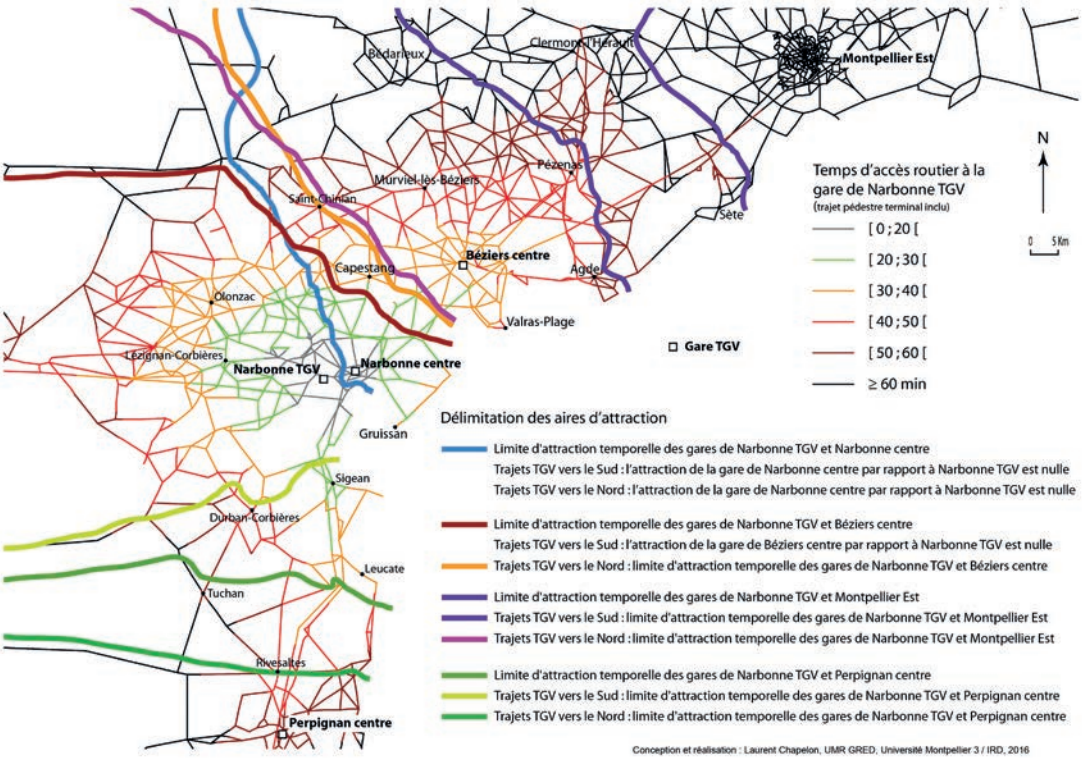
Carte 11 : Scénario 3 : Accessibilité routière à la gare de Béziers TGV



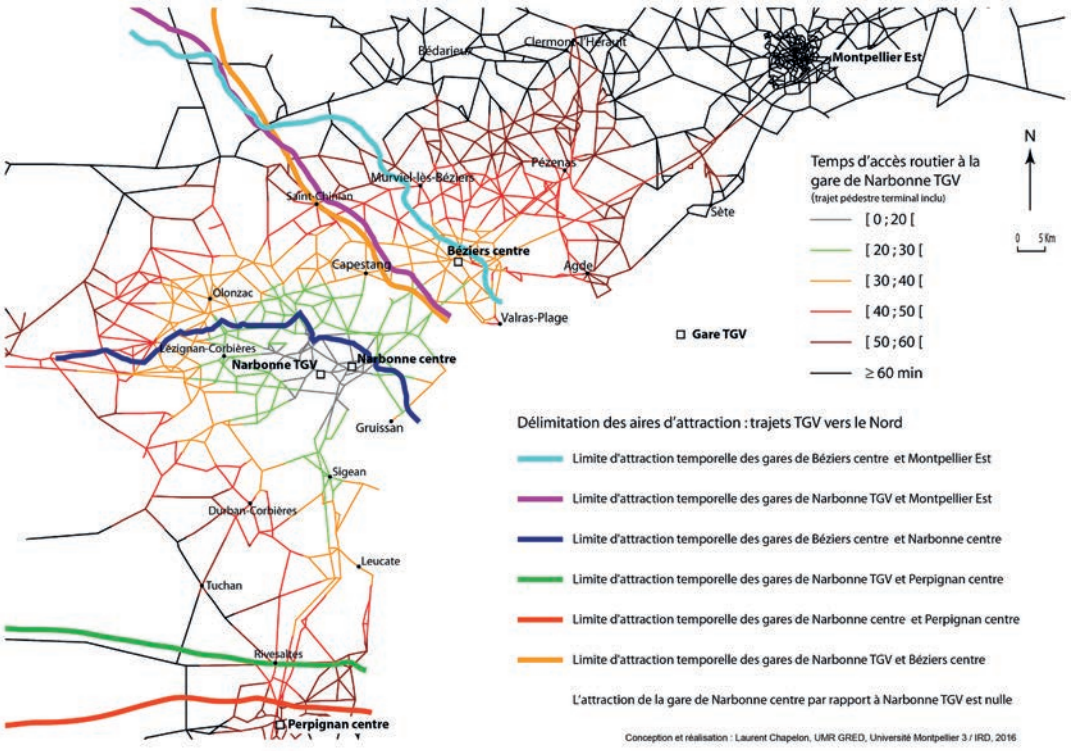
Carte 12 : Scénario 3 : Accessibilité routière à la gare de Béziers TGV (trajets vers le nord)



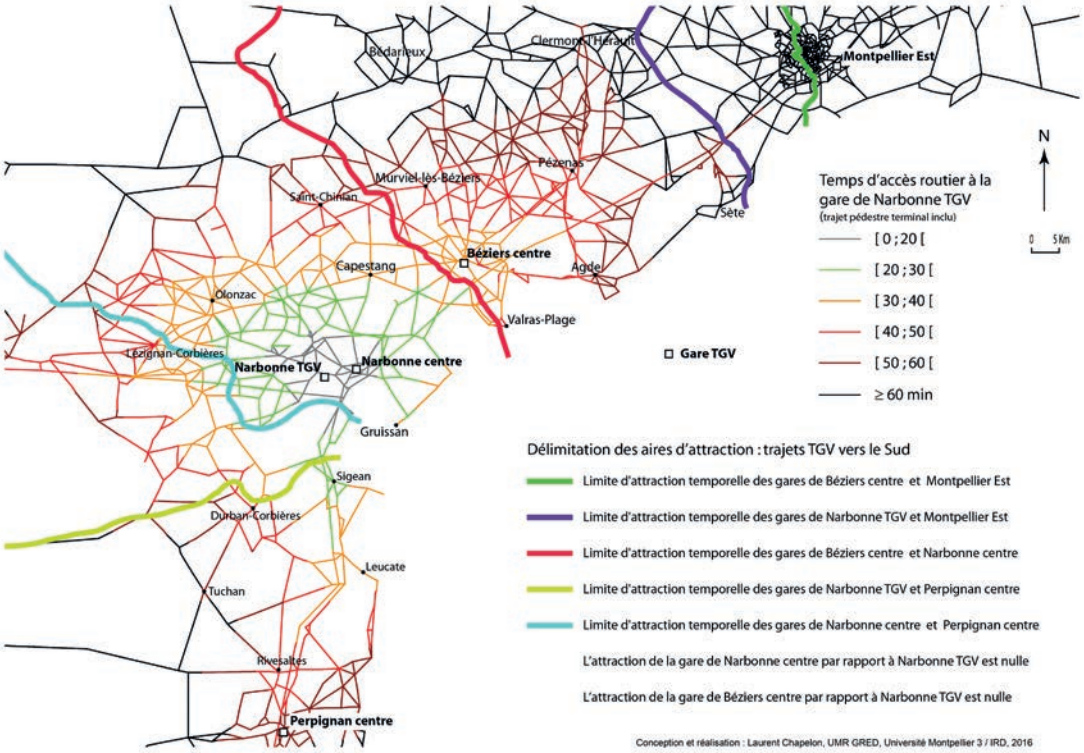
Carte 13 : Scénario 3 : Accessibilité routière à la gare de Béziers TGV (trajets vers le sud)



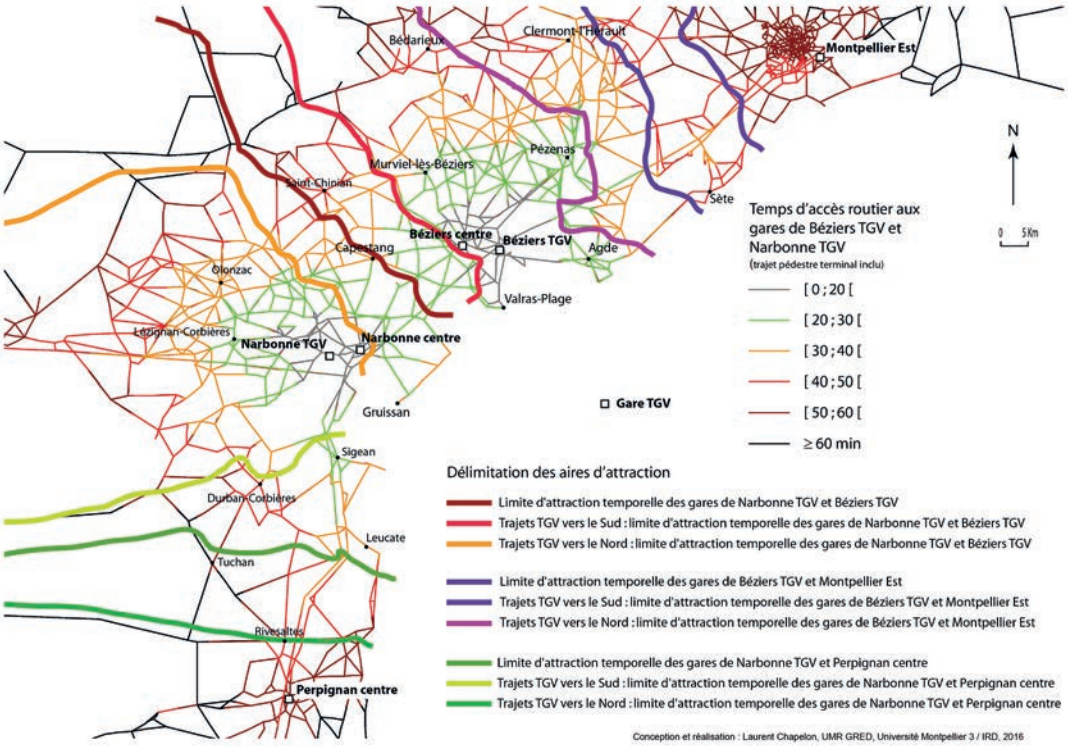
Carte 14 : Scénario 4 : Accessibilité routière à la gare de Narbonne TGV



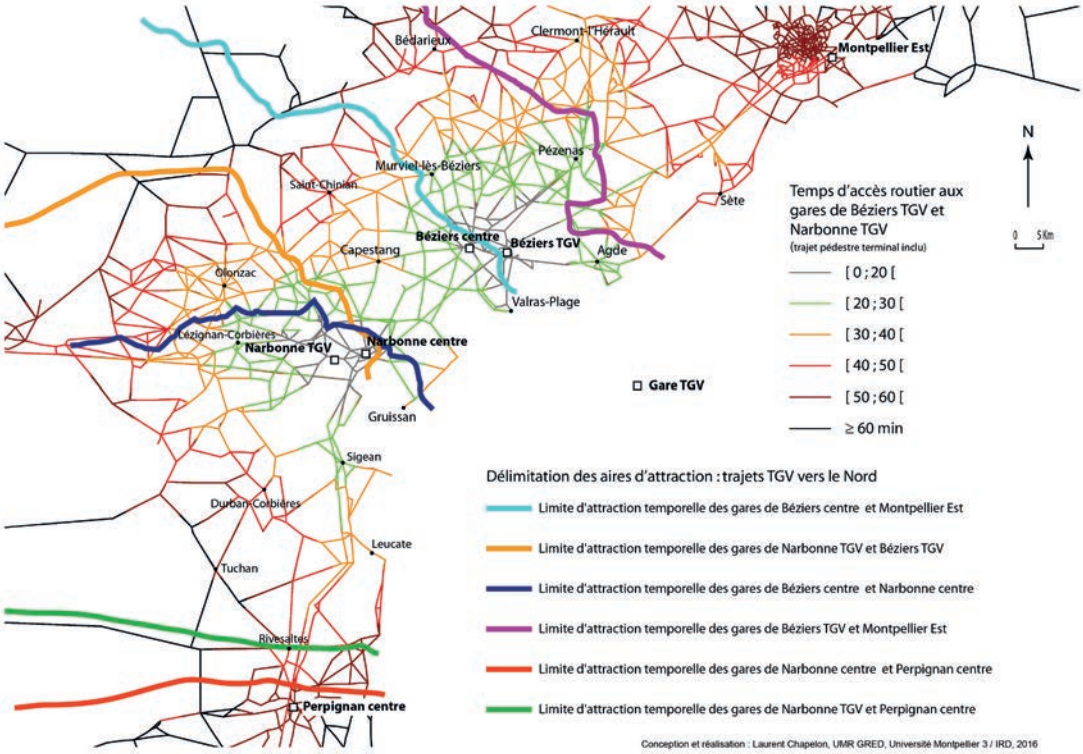
Carte 15 : Scénario 4 : Accessibilité routière à la gare de Narbonne TGV (trajets vers le nord)



Carte 16 : Scénario 4 : Accessibilité routière à la gare de Narbonne TGV (trajets vers le sud)



Carte 17 : Scénario 5 : Accessibilité routière aux gares de Béziers TGV et Narbonne TGV



Carte 18 : Scénario 5 : Accessibilité routière aux gares de Béziers TGV et Narbonne TGV (trajets vers le nord)

Analyse comparative des aires d'attraction des gares TGV

Limites fonction de l'accessibilité VP à la gare la plus proche

On observe que les aires d'attraction des différentes gares TGV sont fortement dépendantes de la localisation géographique des gares. Alors que Clermont-l'Hérault entre dans l'aire d'attraction de Béziers centre (scénario 1), elle est exclue de celle de Béziers-Narbonne TGV (scénario 2). Il est en effet plus rapide de se rendre à Montpellier TGV depuis Clermont-l'Hérault qu'à Béziers-Narbonne TGV. Il en est différemment avec une gare nouvelle localisée à l'est de Béziers (scénarios 3 et 5). La gare de Béziers TGV est celle qui offre le plus fort potentiel d'accessibilité à l'est. La limite englobe toute la vallée de l'Hérault et arrive aux portes de Sète.

Il en est différemment pour Narbonne TGV. En effet, les limites de Narbonne TGV et de Narbonne centre par rapport à Perpignan centre sont presque identiques avec un léger avantage pour Narbonne TGV. Le fait de créer une gare nouvelle à l'ouest de Narbonne ne semble pas être de nature à accroître de manière substantielle l'aire d'attraction vers Perpignan.

Limites d'attraction pour des trajets TGV vers le nord

Les limites d'aires d'attraction sont également fortement modifiées dès lors que l'on considère les trajets multimodaux VP + TGV. Vers le nord, l'aire d'attraction de Narbonne centre (scénario 1) arrive aux portes de Perpignan. Cette limite tend à se décaler vers le nord dans le cas de gares comme Narbonne TGV (scénarios 4 et 5) ou Béziers-Narbonne TGV (scénario 2). Cela s'explique par des temps de parcours TGV depuis Perpignan centre de 23 minutes vers Narbonne TGV et de 25 minutes vers Béziers-Narbonne TGV. Ces gains de performance rendent certains trajets multimodaux VP + TGV via Perpignan centre plus intéressants que les trajets monomodaux routiers vers Narbonne TGV ou Béziers-Narbonne TGV. D'où le déplacement de l'aire d'attraction de Perpignan vers le nord.

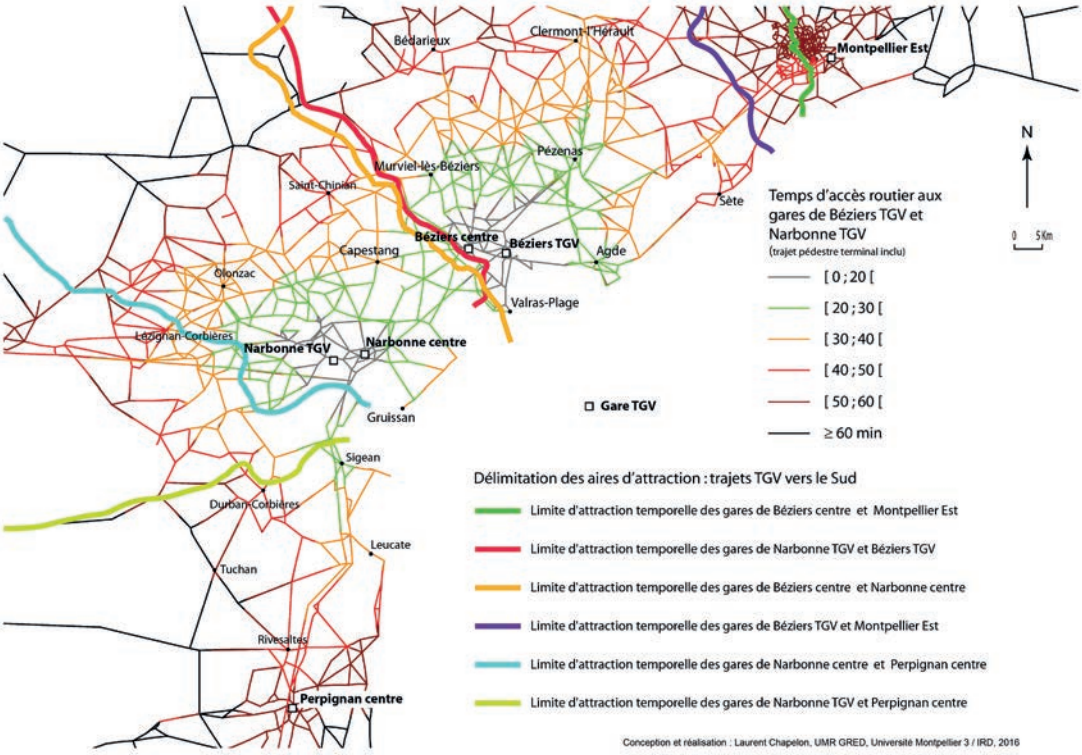
La limite avec Montpellier TGV varie d'un scénario à l'autre. Alors que Bédarieux, Pézenas ou Agde sont exclues de l'aire d'attraction de Béziers centre, elles entrent toutes dans celle de Béziers TGV. Inversement une gare localisée à Nissan (scénario 2) tendrait à accroître de manière importante l'aire d'attraction de Montpellier TGV laquelle arriverait aux portes de Béziers.

Pour le scénario 2, seule la gare de Béziers-Narbonne TGV est attractive (Tableau 5). Cela signifie qu'un usager souhaitant minimiser son temps total de parcours vers le nord ne prendra pas le train à Béziers centre ou Narbonne centre. Il en est de même dans le scénario 3. Seule la gare de Béziers TGV deviendrait véritablement attractive dans une perspective d'optimisation temporelle. Dans le scénario 4, seule Narbonne centre possède une attractivité nulle. Les trajets optimaux se font via Narbonne TGV ou Béziers centre. Cela explique que la combinaison des scénarios 3 et 4 dans le scénario 5 exclue Béziers centre et Narbonne centre de la liste des gares attractives. Avec le scénario 5, les usagers auront intérêt à se rendre dans l'une ou l'autre des deux gares nouvelles pour profiter pleinement de la performance des services TGV. Rappelons qu'aucune amélioration de la desserte des gares centrales n'est prévue dans les quatre derniers scénarios.

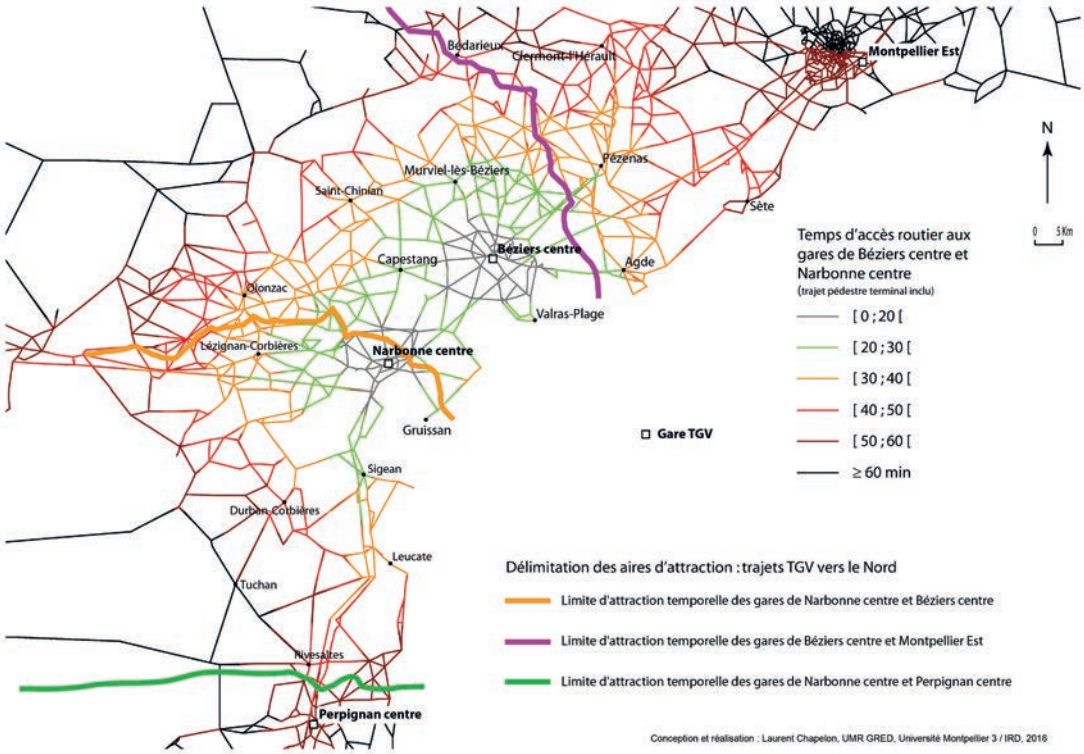
	Gares attractives	
Scénario 1	Béziers centre	Narbonne centre
Scénario 2	Béziers-Narbonne TGV	
Scénario 3	Béziers TGV	
Scénario 4	Narbonne TGV	Béziers centre
Scénario 5	Béziers TGV	Narbonne TGV

Tableau 5 **: Gares attractives pour des trajets vers le** *nord*

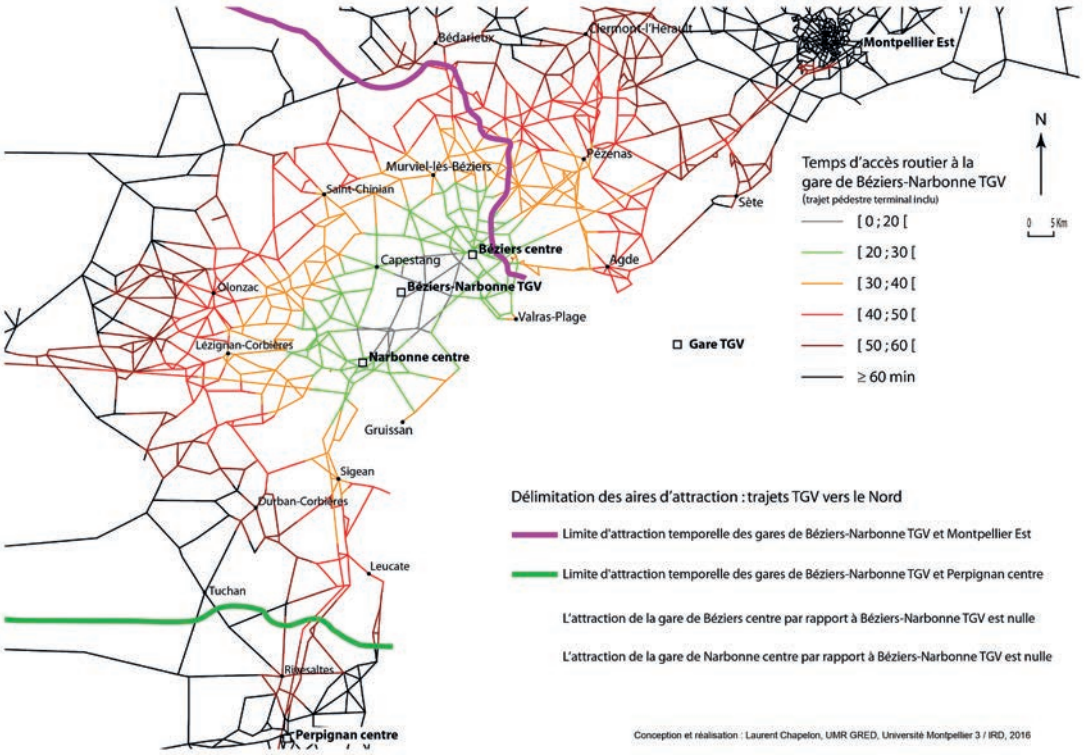
On peut dès lors en déduire les limites des aires d'attraction des gares de chaque scénario en excluant les gares non attractives (Cartes 20 à 24).



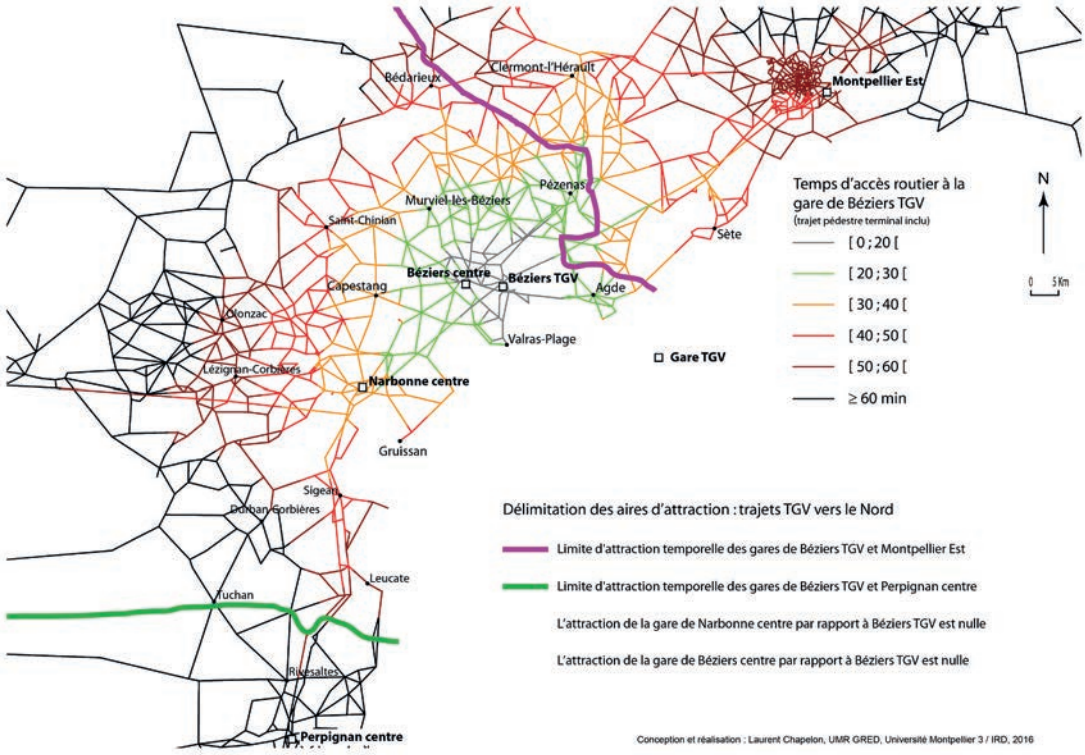
Carte 19 : Scénario 5 : Accessibilité routière aux gares de Béziers TGV et Narbonne TGV (trajets vers le sud)



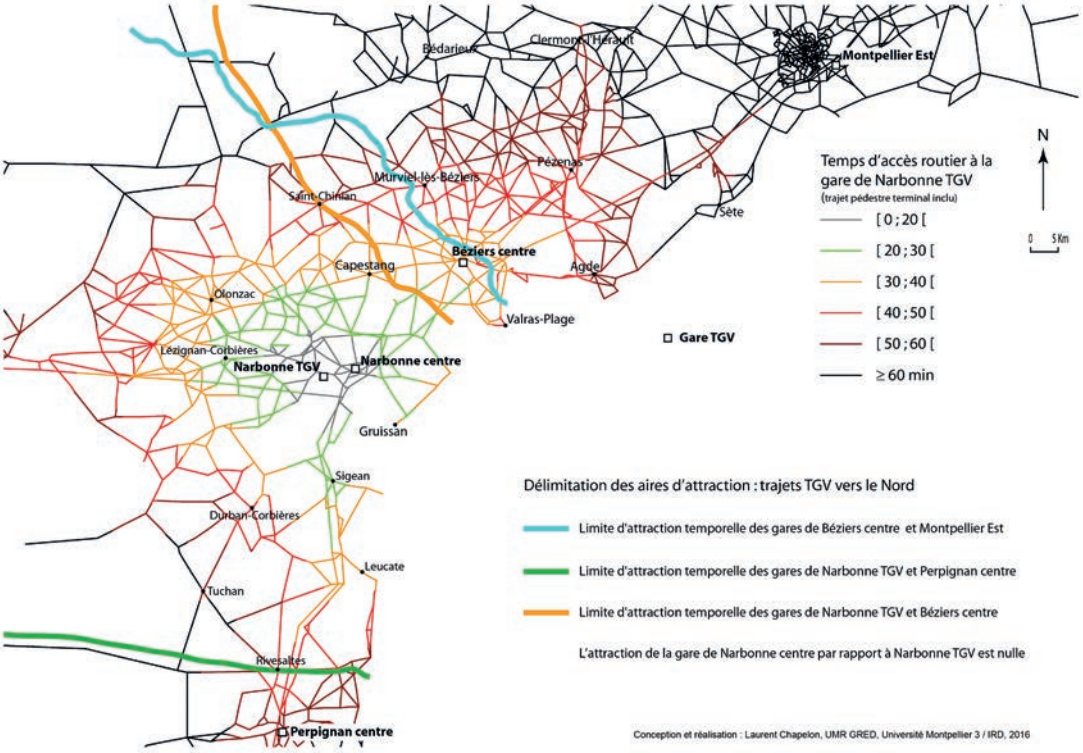
Carte 20 : Scénario 1 : Aire d'attraction de Béziers centre et Narbonne centre (trajets vers le nord)



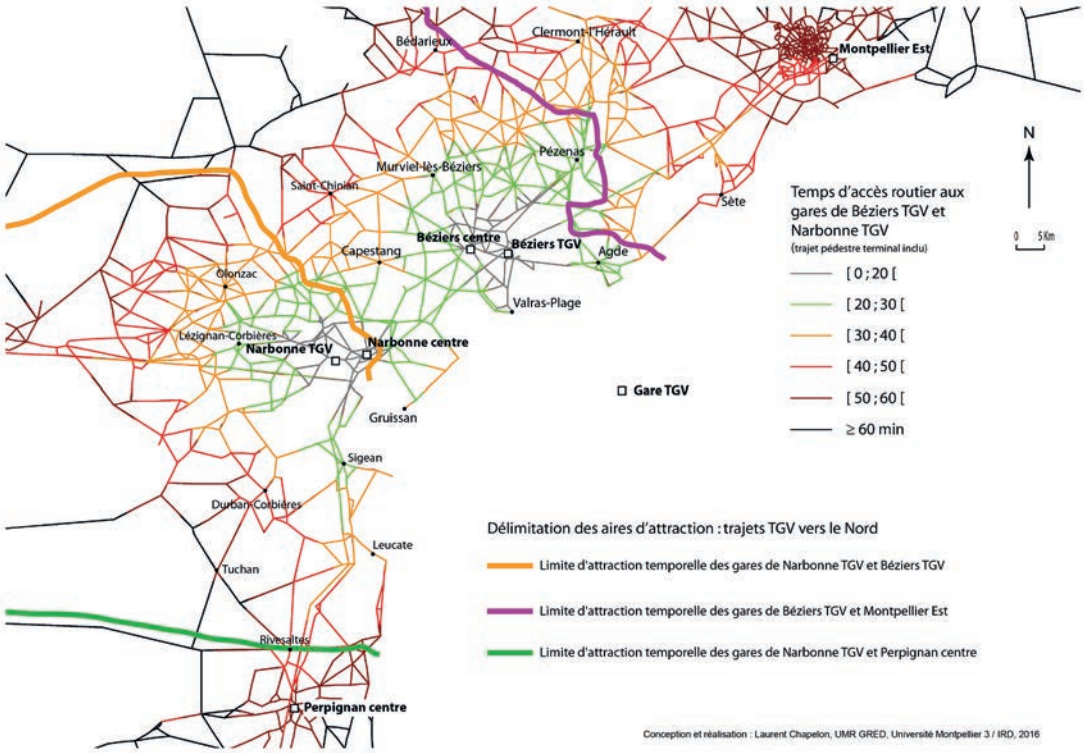
Carte 21 : Scénario 2 : Aire d'attraction de Béziers-Narbonne TGV (trajets vers le nord)



Carte 22 : Scénario 3 : Aire d'attraction de Béziers TGV (trajets vers le nord)



Carte 23 : Scénario 4 : Aire d'attraction de Narbonne TGV et Béziers centre (trajets vers le nord)



Carte 24 : Scénario 5 : Aire d'attraction de Béziers TGV et Narbonne TGV (trajets vers le nord)

Limites d'attraction pour les trajets TGV vers le sud

Les trajets TGV vers le sud se caractérisent par le déplacement plus au nord des limites avec Perpignan centre et Montpellier TGV par rapport aux trajets TGV en direction du nord. On observe que les limites de Béziers centre (scénario 1) et de Béziers TGV (scénario 3) comparativement à Montpellier TGV sont très proches l'une de l'autre. Il semble que vers le sud l'implantation d'une gare nouvelle à l'est de Béziers n'accroîtrait que de manière marginale l'aire d'attraction vers Montpellier. Il en est différemment avec Béziers-Narbonne TGV. La création d'une gare nouvelle à l'ouest de Narbonne (scénario 4) contribue à limiter l'aire d'attraction de Perpignan. Cela s'explique par l'amélioration des temps de trajet TGV entre Narbonne TGV et Perpignan centre comparativement au scénario 1 privilégiant les gares centrales.

Les scénarios 2, 3 et 5 rendent la gare de Béziers centre non attractive vers le sud alors que les scénarios 4 et 5 excluent toute utilisation de la gare de Narbonne centre dans une perspective d'optimisation des trajets globaux VP + TGV (Tableau 6).

Comme précédemment, on peut en déduire les limites des aires d'attraction des gares de chaque scénario en excluant les gares non attractives (Cartes 25 à 29).

	Gares attractives	
Scénario 1	Béziers centre	Narbonne centre
Scénario 2	Béziers-Narbonne TGV	Narbonne centre
Scénario 3	Béziers TGV	Narbonne centre
Scénario 4	Narbonne TGV	
Scénario 5	Béziers TGV	Narbonne TGV

Tableau 6 **: Gares attractives pour les trajets TGV vers le** *sud*

Poids démographique des aires d'attraction des gares TGV

Approche par l'offre routière et la demande potentielle en 2020

Il s'agit ici de confronter le niveau d'offre routière avec la demande potentielle de transport à l'horizon 2020. L'offre est évaluée à partir des meilleurs temps de parcours routiers vers la gare TGV et la demande potentielle à partir des populations communales à l'horizon 2020. L'indicateur retenu consiste à déterminer la quantité de population de l'aire d'attraction de la gare en fonction du temps de trajet routier nécessaire pour s'y rendre. On connaît ainsi, minute par minute, le volume de population potentiellement attiré par la gare.

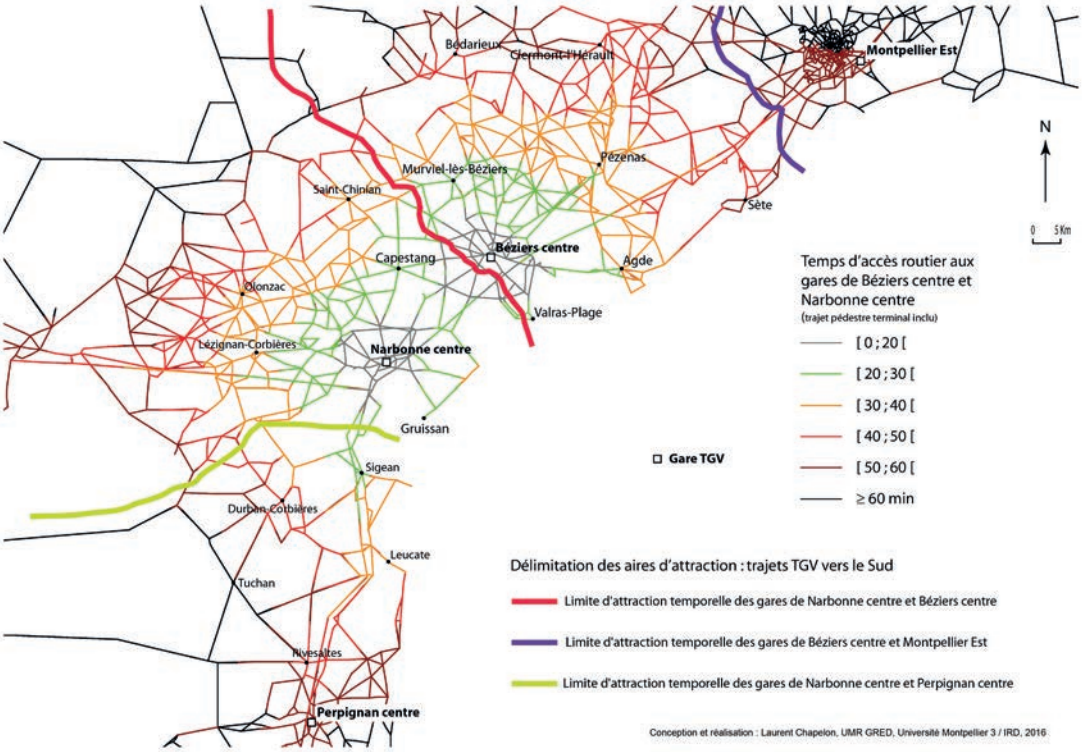
Pour ce faire, les populations communales à l'horizon 2020 ont été affectées sur les sommets du graphe situés au centre de la zone urbaine agglomérée (centre-ville). Dans le cas des communes les plus importantes les populations ont été réparties entre les différents quartiers de la ville.

Ce sont les limites des aires d'attraction des gares qui déterminent ensuite l'affectation de la population à telle ou telle gare. Une commune ne peut pas être rattachée à plus d'une gare TGV. Il n'y a donc pas de doublons. Comme précédemment, deux cas de figure ont été étudiés :

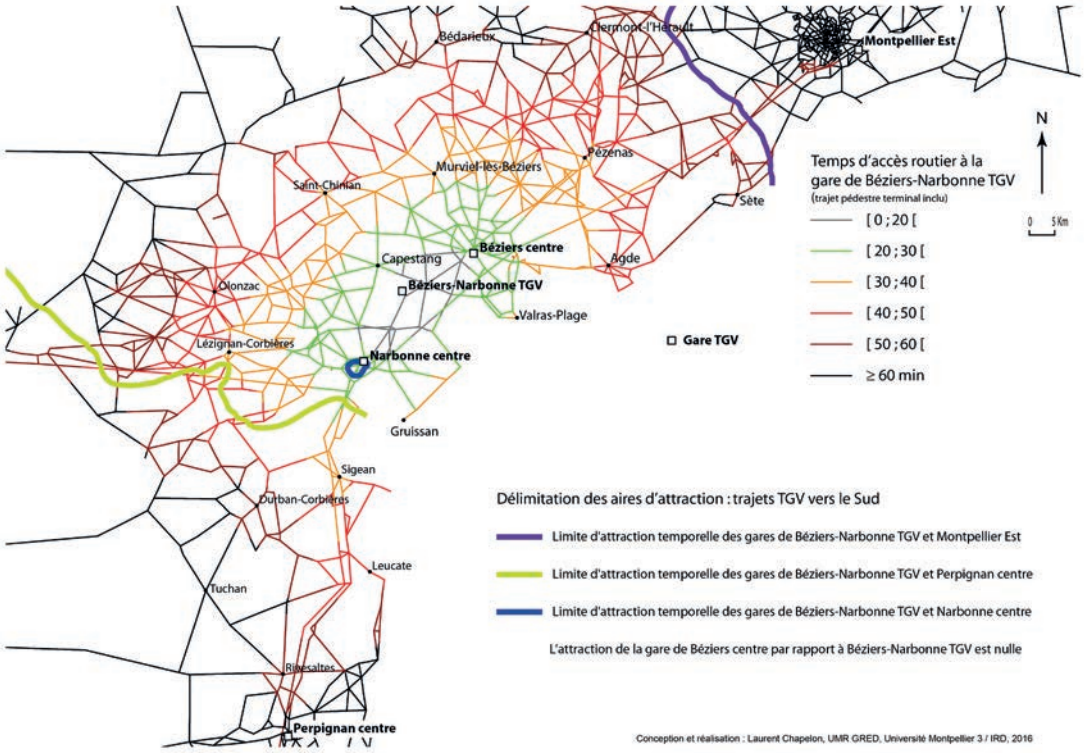
1. Affectation des populations indépendamment du sens du déplacement TGV : accessibilité monomodale VP seule. Les populations communales sont affectées à la gare la plus proche en temps d'accès routier.

2. Affectation des populations en fonction du sens du déplacement TGV : accessibilité multimodale VP + TGV. Les populations communales sont affectées à la gare la plus pertinente pour un usager souhaitant effectuer un déplacement TGV vers le nord ou vers le sud. La pertinence d'une gare est donnée par la minimisation du temps global de parcours VP + TGV qui varie selon le sens du déplacement TGV. Par exemple, dans le scénario 1 vers le sud, la population communale de Sigean, proche de Narbonne, sera affectée à la gare de Perpignan centre car le trajet VP vers Perpignan centre est plus rapide que le trajet VP + TGV via Narbonne centre. Il faut en effet compter 30 minutes supplémentaires de TGV depuis Narbonne vers le sud par rapport à Perpignan (Tableau 2).

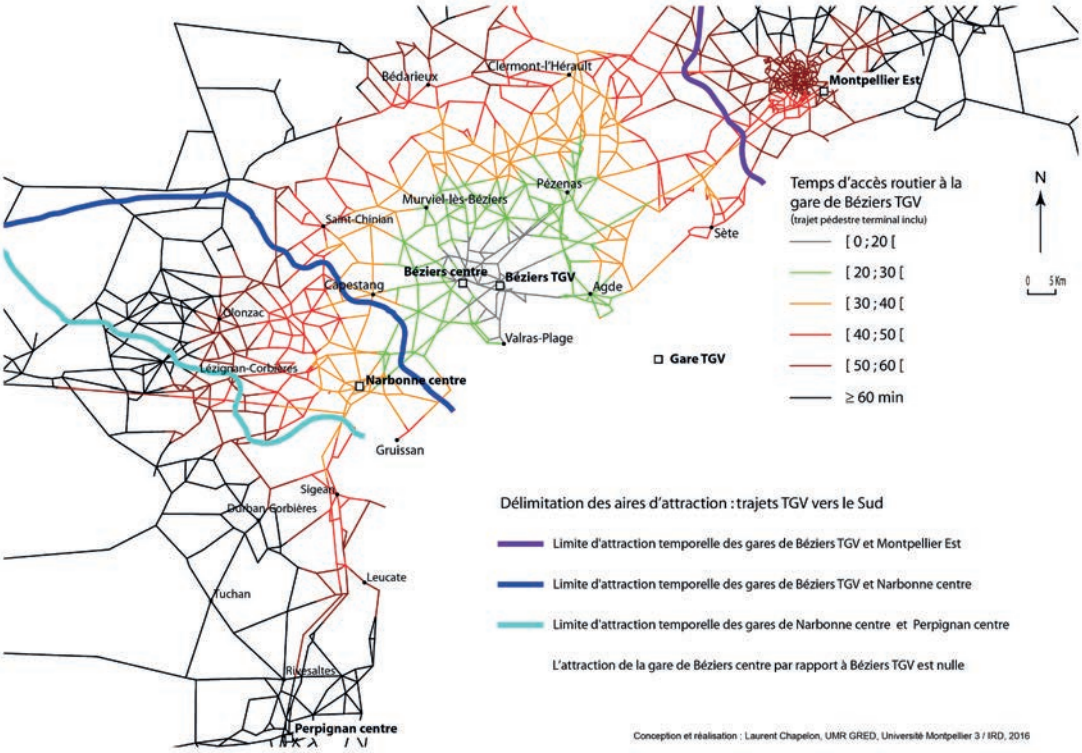
Une fois les populations affectées à chaque gare, les résultats sont agrégés par scénario. Au final, cette approche permet de connaître, pour chaque scénario, la quantité de population située à moins de x minutes de voiture de la gare TGV la plus proche (cas 1) ou la plus



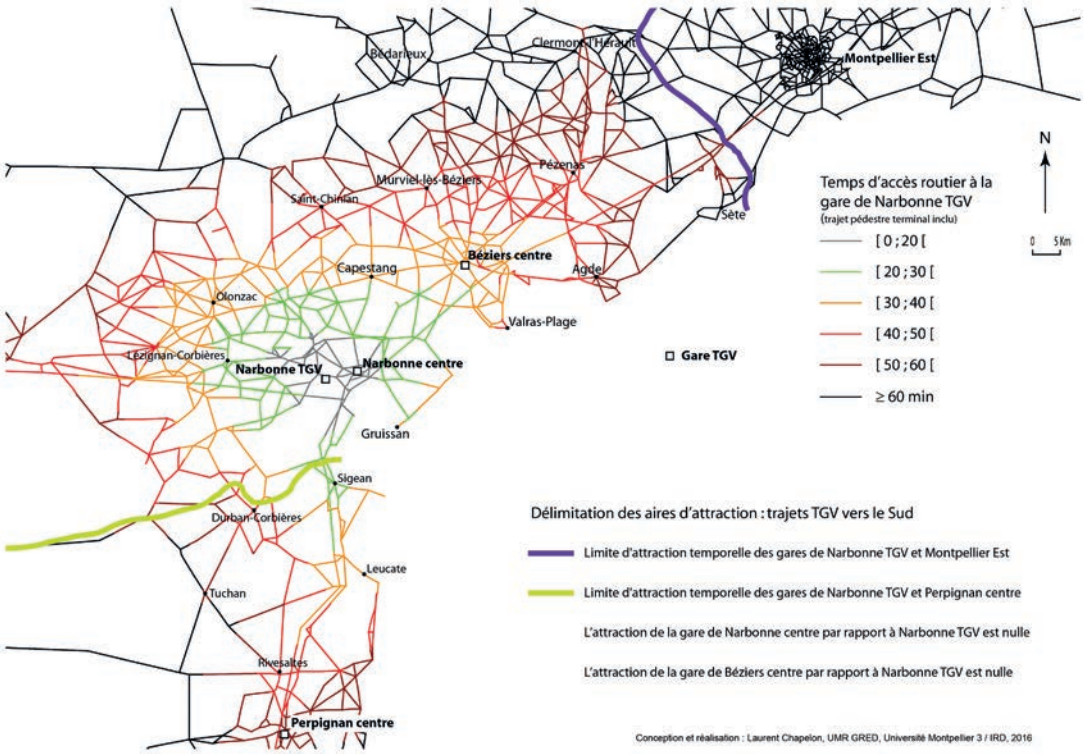
Carte 25 : Scénario 1 : Aire d'attraction de Béziers centre et Narbonne centre (trajets vers le Sud)



Carte 26 : Scénario 2 : Aire d'attraction de Béziers-Narbonne TGV et de Narbonne centre (trajets vers le sud)



Carte 27 : Scénario 3 : Aire d'attraction de Béziers TGV et de Narbonne centre (trajets vers le sud)



Carte 28 : Scénario 4 : Aire d'attraction de Narbonne TGV (trajets vers le sud)

pertinente pour l'usager selon le sens, nord ou sud, de son déplacement (cas 2). Les résultats sont représentés sous forme de courbes qui permettent de comparer directement les scénarios entre eux.

Projections de population à l'horizon 2020

La production des résultats a donc nécessité au préalable l'obtention de données démographiques communales à l'horizon 2020. Ce travail a été effectué en collaboration avec Olivier Bouhet (UMR GRED, Université Paul-Valéry Montpellier 3/IRD).

Les projections démographiques présentées utilisent les résultats du modèle Omphale développé par l'Insee. Les hypothèses retenues sont celles du scénario dit « central ». Le modèle Omphale consiste à simuler l'évolution des effectifs par sexe et par âge de la population d'une zone à partir de 3 composantes : la natalité, la mortalité et les migrations. Pour ce faire, on applique, d'année en année, et pour chaque sexe et âge, des quotients migratoires, de fécondité et de mortalité, aux populations correspondantes. Les quotients sont déterminés en tenant compte des tendances passées. Ils n'intègrent donc pas les modifications possibles de l'environnement de chaque zone : impact du foncier, politiques publiques territoriales, modifications des comportements migratoires... Les projections ne peuvent donc pas s'assimiler à des prévisions.

L'échelle la plus fine de production des données Omphale de l'Insee est l'échelle départementale. Ces projections ne sont pas disponibles à l'échelle communale. Nous avons donc prolongé jusqu'en 2020 les tendances communales observées tout en les ajustant de manière à ce que la somme des populations communales de chaque département soit égale aux projections départementales du modèle Omphale.

Accessibilité à la gare TGV la plus proche

Cet indicateur fournit, pour chaque scénario, la quantité de population captée en fonction du seul temps d'accès routier à la gare TGV la plus proche. L'influence du sens du déplacement en TGV sera intégrée à l'analyse un peu plus loin.

Selon le scénario ce sont entre deux et quatre gares qui sont prises en considération.

Scénario 1 :
Béziers centre
Narbonne centre

Scénario 2 :
Béziers centre
Narbonne centre
Béziers-Narbonne TGV (gare nouvelle)

Scénario 3 :
Béziers centre
Narbonne centre
Béziers-TGV (gare nouvelle)

Scénario 4 :
Béziers centre
Narbonne centre
Narbonne-TGV (gare nouvelle)

Scénario 5 :
Béziers centre
Narbonne centre
Béziers-TGV (gare nouvelle)
Narbonne-TGV (gare nouvelle)

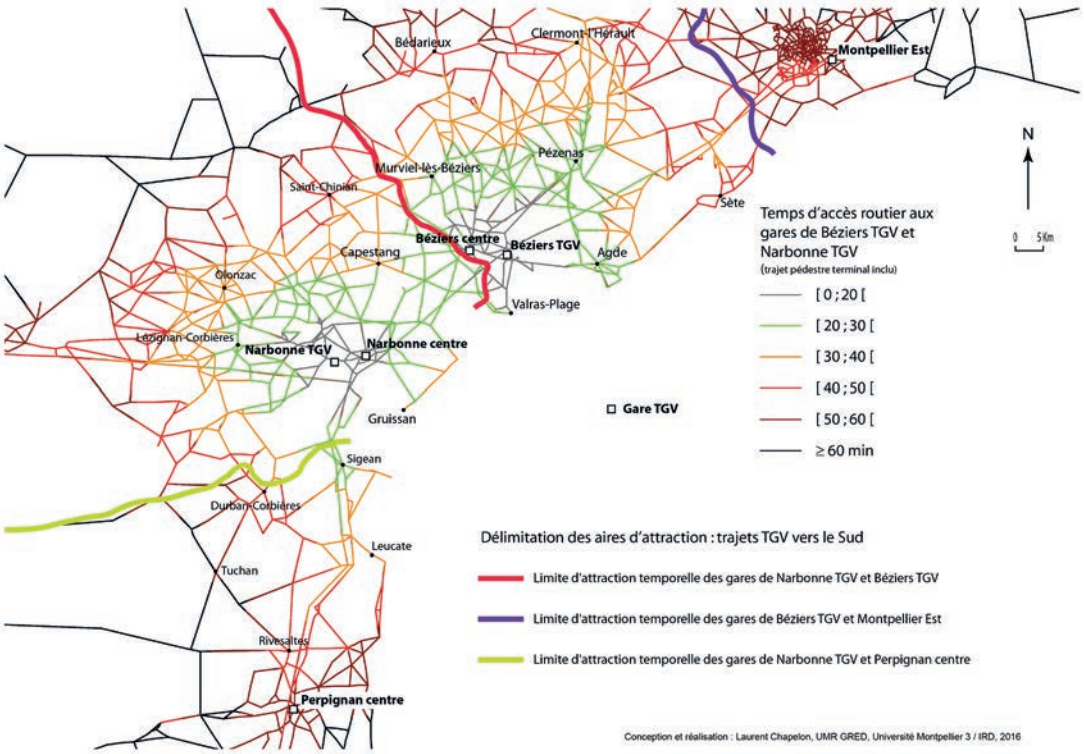
Les résultats tiennent compte de l'attractivité des gares de Montpellier est et Perpignan centre. Les populations des communes entrant dans l'aire d'attraction de ces deux gares ne sont pas comptabilisées dans le cumul.

Les résultats montrent l'intérêt de disposer d'un système à quatre gares (scénario 5). Quel que soit le temps d'accès à la gare, ce scénario fournit les meilleurs cumuls de population. Cela s'explique par la présence des deux gares nouvelles à l'est de Béziers et à l'ouest de Narbonne qui permettent de capter une clientèle potentielle qui se serait tournée vers Montpellier ou Perpignan en leur absence.

Cependant, la proximité géographique de ces deux gares nouvelles par rapport aux gares centrales de Béziers et de Narbonne explique que la courbe du scénario 5 ne se détache que faiblement de celles des autres scénarios.

On dénombre 400 000 habitants à moins de 30 minutes de l'une des quatre gares du scénario 5 contre 384 000 pour le scénario 3, 344 000 pour le scénario 4 et 320 000 pour les scénarios 1 et 2. Ainsi, par rapport à une amélioration de desserte des gares centrales (scénario 1) ce sont 80 000 habitants supplémentaires qui seraient captés par la construction de deux gares nouvelles selon le critère de l'accès à la gare la plus proche.

Parmi les scénarios à trois gares (deux centrales et une nouvelle), c'est le scénario 3 (Béziers TGV) qui offre le meilleur potentiel de population. Cela s'explique par la forte densité démographique de la plaine littorale du département de l'Hérault. Une gare à l'est de Béziers capte un plus fort potentiel de population qu'une gare localisée à l'ouest de Narbonne. Jusqu'au seuil de 17



Carte 29 : Scénario 5 : Aire d'attraction de Béziers TGV et Narbonne TGV (trajets vers le sud)

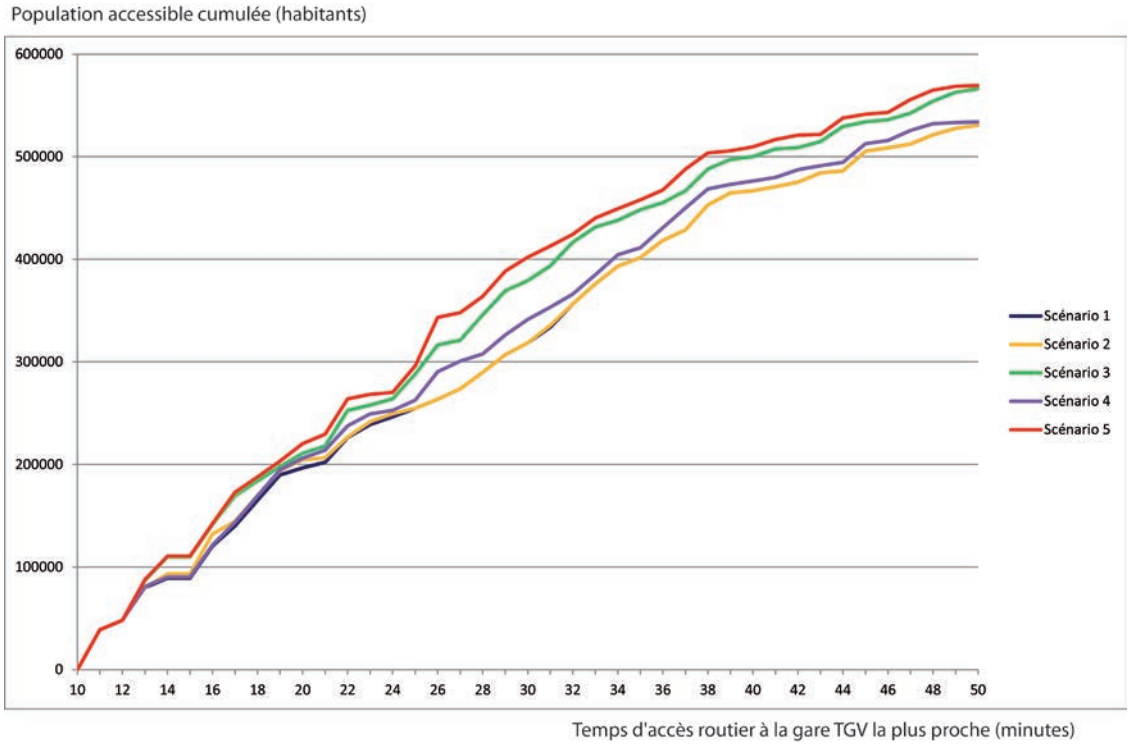


Figure 8 : Population cumulée selon le temps d'accès à la gare la plus proche

minutes, le scénario 3 offre des potentialités presque similaires au scénario 5.

La moindre performance du scénario 1 comparativement aux autres s'explique par l'absence de gare nouvelle. Mais le différentiel entre les courbes n'est vraiment marqué qu'au-delà de 24 minutes. A 24 minutes le différentiel de population entre les scénarios 1 et 5 est de 20 000 habitants.

Le scénario 2 n'offre, au regard de cet indicateur, que peu d'intérêt compte tenu de la localisation de la gare nouvelle Béziers-Narbonne TGV entre Béziers centre et Narbonne centre. Son aire d'attraction est de ce fait limitée de même que la population supplémentaire potentiellement captée par cette gare.

Accessibilité à la gare la plus pertinente pour l'usager

Comme précédemment, il s'agit ici de cumuler la population attirée par la gare en fonction du temps de parcours routier nécessaire pour s'y rendre. La différence tient au critère de choix de la gare TGV par l'usager. Ici, la gare la plus pertinente pour un usager est celle qui lui permet de minimiser son temps total de parcours vers le nord ou vers le sud. Alors que l'indicateur précédent peut être qualifié de structurel, celui-ci est un indicateur fonctionnel. Il tient compte du temps de trajet TGV supplémentaire que devra parcourir un usager selon qu'il se rend dans telle ou telle gare. L'aire d'attraction de la gare dépend donc des conditions d'accès routier mais également de la performance des services TGV qu'elle offre. La prise en considération de cette dimension fonctionnelle dans le calcul des aires d'attraction des gares implique, là encore, de distinguer les trajets vers le nord (vers Paris, Lyon, Marseille, Nice, Lille…) et les trajets vers le sud (Barcelone, Madrid…).

Trajets TGV vers le nord

Vers le nord, les résultats sont beaucoup plus contrastés qu'avec l'indicateur précédent. Jusqu'au seuil de 24 minutes, le scénario 1 est le plus intéressant. Cela s'explique aisément par le fait que ce scénario améliore la desserte TGV des gares centrales de Béziers et Narbonne. Or, ces gares desservent prioritairement les secteurs denses et centraux des deux grandes agglomérations. Comparativement, les autres scénarios ne proposent pas d'amélioration de la desserte de ces deux gares centrales. De ce fait, pour bénéficier de la performance optimale du réseau TGV de nombreux habitants doivent rejoindre une gare nouvelle excentrée et impliquant de ce fait des trajets routiers plus longs. Ces résultats montrent tout l'intérêt d'une amélioration de la desserte TGV des

Au-delà de 24 minutes, le scénario 5 se détache fortement. En effet, la présence de deux gares nouvelles, à Béziers et Narbonne, permet d'accroître la population captée par ces deux agglomérations. Le trajet VP + TGV est, pour de nombreuses communes, plus intéressant que le seul trajet VP vers Montpellier. Cependant, le relatif éloignement des gares des secteurs denses et centraux explique que ce scénario ne soit pertinent qu'aux alentours de 20 qui reste tout à fait acceptable sachant que 10 minutes sur les 20 sont utilisées pour stationner le véhicule et se rendre sur le quai de la gare.

Parmi les scénarios à trois gares, le scénario 4 apparaît le plus performant jusqu'au seuil de 30 minutes. Cela s'explique par le fait que, dans ce scénario, deux gares sont attractives vers le nord : Narbonne TGV et Béziers centre (Tableau 5). Aucun usager n'a intérêt à prendre le TGV à Narbonne centre. L'attractivité de Béziers centre, qui est due à l'éloignement de Narbonne TGV, explique le bon positionnement de ce scénario dans les 30 premières minutes. En effet, Béziers centre capte un volume important de population en quelques minutes. Cela explique également que le scénario 4 soit mieux placé que le scénario 5 jusqu'à 18 minutes. Le scénario 5 possède deux gares attractives vers le nord (Narbonne TGV et Béziers TGV) toutes deux excentrées. Les gares centrales étant moins « performantes » que les gares nouvelles, elles ont une attraction nulle. Dans le scénario 5, les habitants de Béziers et de Narbonne doivent ainsi se rendre en périphérie de leur agglomération pour prendre le TGV, d'où un décalage observable dans le cumul des populations.

Le scénario 3 (Béziers TGV) apparaît moins performant que le scénario 4 jusqu'au seuil de 34 minutes. Cela s'explique par le fait que, vers le nord, tous les usagers qui souhaitent optimiser leur temps total de déplacement ont intérêt à prendre le train à Béziers TGV y compris les habitants de Narbonne. La gare de Narbonne centre possède une attractivité nulle (contrairement à Béziers centre dans le scénario 4). De ce fait, les performances du scénario 3 sont fortement altérées par l'éloignement de la gare de Béziers TGV depuis Narbonne. Cela confirme une nouvelle fois la nécessité de prendre en compte le sens du déplacement TGV dans les analyses. Au-delà 34 minutes, le scénario 3 devient plus au il capte des habitants jusqu'au-delà de se cumulent avec ceux, au nord, des communes peuplées de la plaine littorale héraultaise. En effet, la limite d'influence du scénario 3 est plus proche de Montpellier que dans les scénarios 1, 2 et 4.

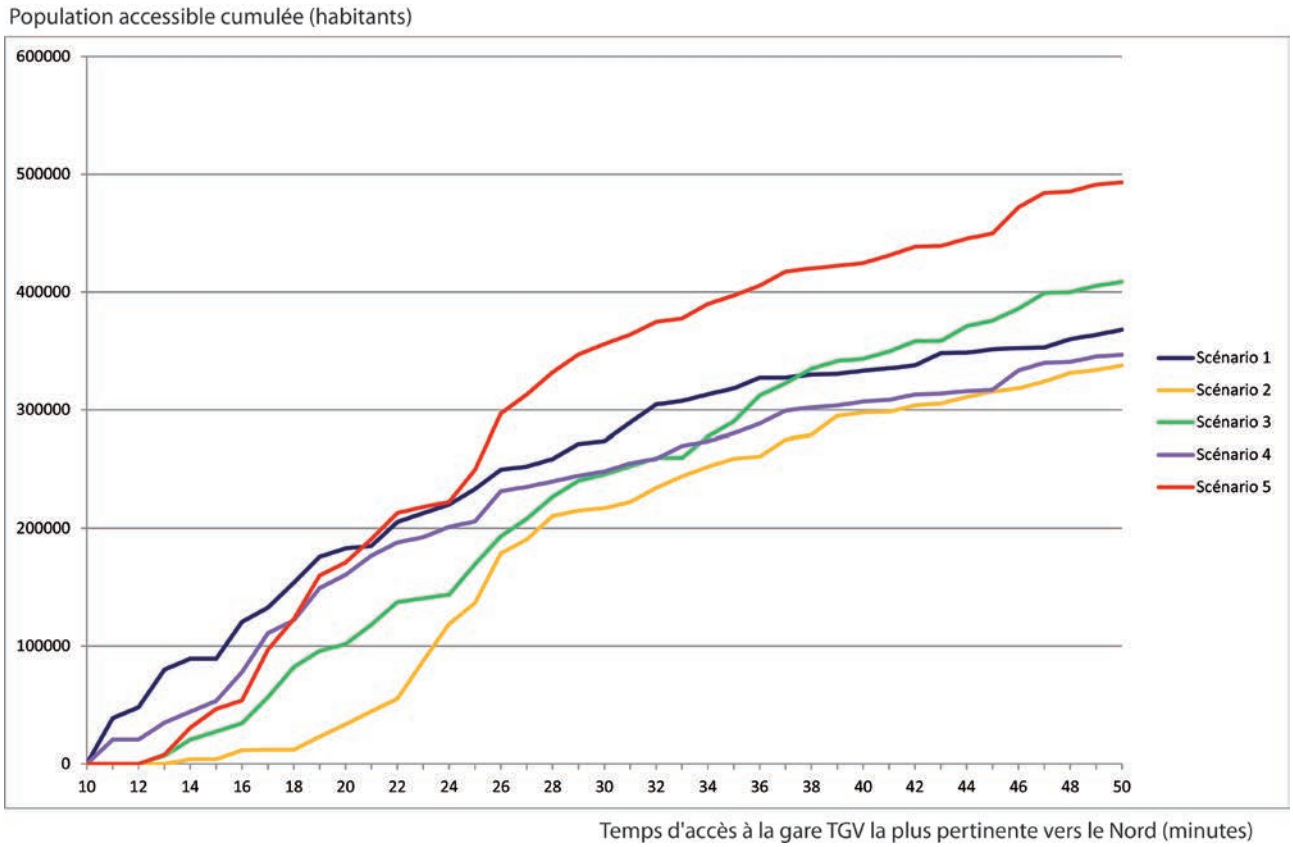


Figure 9 : Population cumulée selon le temps d'accès à la gare la plus pertinente vers le nord

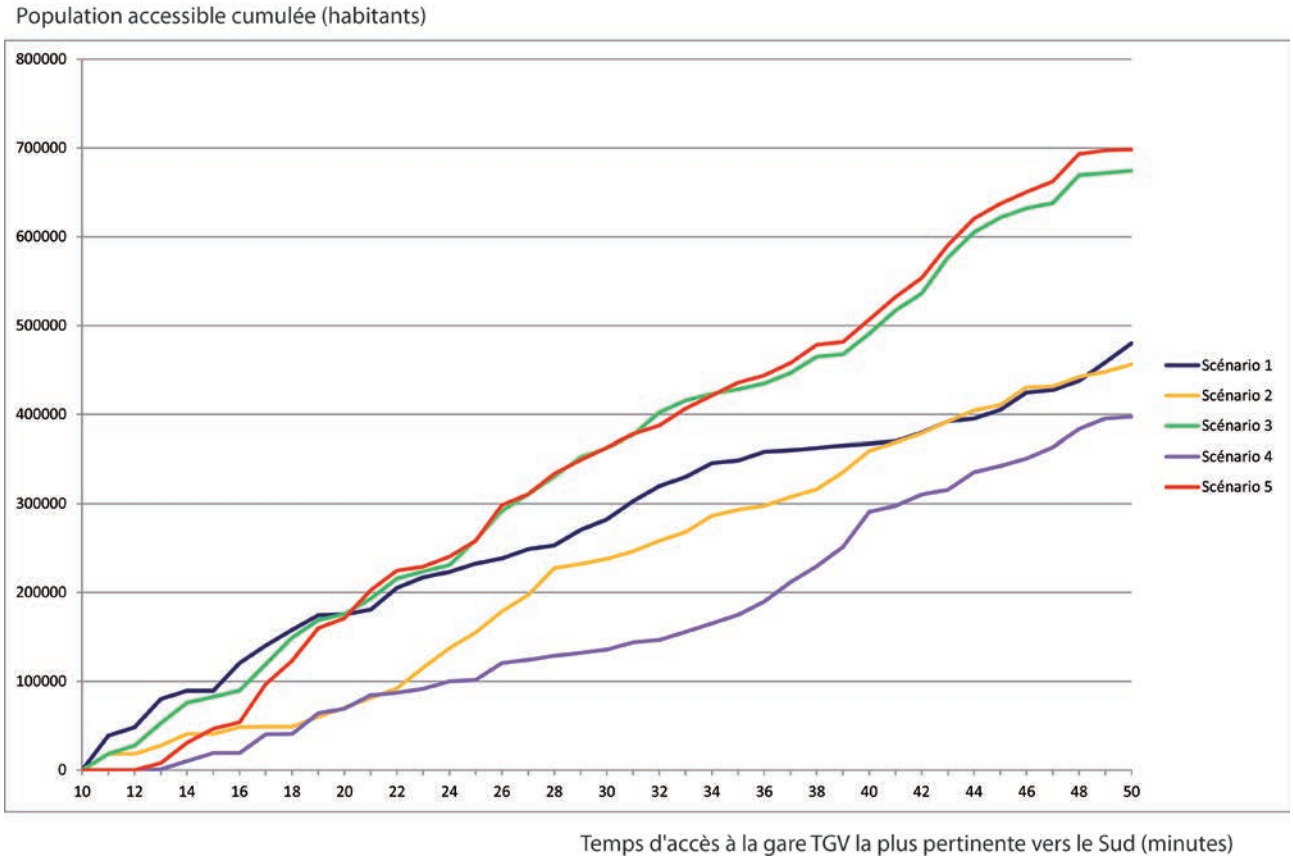


Figure 10 : Population cumulée selon le temps d'accès à la gare la plus pertinente vers le sud

Le scénario 2 est celui qui offre le potentiel de population le moins intéressant. Cela s'explique par le fait que seule la gare de Béziers-Narbonne TGV est attractive. Personne, dans ce scénario, n'a intérêt à prendre le train à Béziers centre ou Narbonne centre. La position intermédiaire de la gare entre Béziers et Narbonne contraint les biterrois et les narbonnais à des trajets périphériques plus importants. Ceci explique la faible pente de la courbe jusqu'à 18 minutes. De plus, l'influence de Perpignan et surtout de Montpellier TGV est particulièrement forte puisqu'elle arrive aux portes de l'agglomération biterroise. Il y a donc une double influence dans ce scénario, de l'absence d'attraction des gares de Béziers centre et de Narbonne centre et d'un positionnement géographique intermédiaire entre les deux qui limite l'aire d'attraction de Béziers-Narbonne TGV.

Trajets TGV vers le sud

La hiérarchie observée vers le nord est partiellement modifiée pour les trajets vers le sud. Les volumes de population concernés sont également plus importants compte tenu de l'accroissement des aires d'influence en direction du nord (vallée de l'Hérault, littoral héraultais, portes de Montpellier).

On observe tout d'abord l'intérêt, comme précédemment, d'améliorer la desserte TGV des secteurs denses et centraux des grandes agglomérations. En effet, jusqu'au seuil de 20 minutes, le scénario 1 est le plus intéressant. Les gains de temps offerts par la ligne nouvelle profitent immédiatement aux biterrois et aux narbonnais. Quel que soit le seuil, le scénario 1 reste plus intéressant que le scénario 4 et jusqu'à 40 minutes il devance le scénario 2. Seuls les scénarios 3 et 5 offrent une performance supérieure au-delà de 20 minutes.

Le scénario 3, à une gare nouvelle, apparaît très proche du scénario 5, à deux gares nouvelles. Cela s'explique par le fait que, dans le scénario 3, deux gares sont attractives pour les usagers souhaitant minimiser leurs trajets vers le sud : Béziers TGV et Narbonne centre (Tableau 6). La gare de Béziers est permet de capter une part importante de population jusqu'aux portes de Montpellier et la gare de Narbonne centre évite aux narbonnais de se rendre à Béziers TGV. Elle explique que le scénario 3 soit plus performant que le scénario 5 jusqu'au seuil des 20 minutes.

En effet, dans le scénario 5 seules Narbonne TGV et Béziers TGV sont attractives. Or, pour les narbonnais, l'accessibilité à Narbonne TGV est plus contraignante que l'accessibilité à Narbonne centre, même si au final le service offert sera de meilleure [redacted] nous avons pu observer que la simulation de Narbonne TGV (scénario 4 et 5) annihilait l'attractivité de la gare centrale de Narbonne, moins performante vers le sud. Au final ce sont près de 700 000 personnes qui entrent dans l'aire d'attraction du scénario 5 en moins de 50 minutes.

Le scénario 4 est fortement pénalisé par le fait que seule Narbonne TGV est attractive pour les usagers souhaitant optimiser leur temps de parcours global vers le sud. De ce fait, l'aire d'attraction de Montpellier TGV s'accroît au détriment de celle de Narbonne TGV.

Dans le scénario 2, l'aire d'attraction de Narbonne centre est très limitée. De ce fait, la plupart des usagers doivent se rendre à Béziers-Narbonne TGV. Le positionnement intermédiaire de cette gare tend à accroître les aires d'attraction de Perpignan et de [redacted] aux autres scénarios à deux gares attractives. Cela explique les résultats modestes obtenus par le scénario 2 vers le sud.

Conclusion

Il ressort de ces différentes analyses que le scénario 5 offre les meilleures possibilités d'attraction de population compte tenu de la « performance » des deux gares nouvelles qui le constituent. Ce scénario rend peu pertinent l'usage des gares centrales dans une perspective d'optimisation des trajets multimodaux. Il se détache nettement dès 21 minutes vers le nord et dès 20 minutes vers le sud. En deçà de ces [redacted] est pénalisé par l'éloignement des gares des secteurs denses et centraux des grandes agglomérations. Mais ce constat est relativisé par des temps de parcours corrects observés depuis les centres villes.

Parmi les scénarios à une seule gare nouvelle, Béziers est apparaît la mieux placée (scénario 3) que ce soit vers le sud (quel que soit le seuil) ou vers le nord (au-delà de 38 minutes). Cette gare bénéficie du dynamisme du département de l'Hérault pour accroître son attractivité. Les résultats ont également montré l'intérêt d'améliorer la desserte TGV des gares centrales. Le scénario 1 obtient les meilleurs résultats jusqu'au seuil des 20 minutes et reste bien placé au-delà de ce seuil. En revanche, au regard des critères retenus ici, le scénario 2 (Béziers-Narbonne TGV) apparaît moins pertinent. Les cumuls de population sont parmi les plus faibles obtenus.

Bibliographie

Appert M., Chapelon L., 2007, « The space-time variability of road base accessibility : application to London » dans Mathis P., dir., *Graphs and Networks*, Londres, ISTE, p. 3-30.

Bavoux J.-J., Chapelon L., 2014, *Dictionnaire d'analyse spatiale*, Paris, Armand-Colin, 607 p.

Bavoux J.-J., *et al,* 2005, *Géographie des transports*, Paris, Armand-Colin, 231 p.

Bunge W., 1962, *Theoretial geography*, Lund, Gleerup, 210 p.

Chapelon L., 2016, « Evaluation de la performance des chaînes intermodales de transport par les mesures d'accessibilité » dans Chapelon L. (dir.), *Transports et intermodalité*, Londres, ISTE, p. 107-135.

Chapelon L., 2000, « Accessibilité routière et périphéricité des villes atlantiques » dans Carrière J.P., Farthing S. (dir.), *Les cités atlantiques : villes périphériques ou métropoles de demain ?*, Paris, Publisud, p. 139-170.

Chapelon L., 1997, « Offre de transport et aménagement du territoire », Thèse de doctorat, Université de Tours, CESA.

Chapulut J.-N. et al., 2011, *La grande vitesse ferroviaire*, Paris, La Documentation Française, (Centre d'analyse stratégique, rapports & documents, n° 40), 184 p.

Cogis O., Robert C., 2003, *Théorie des graphes*, Paris, Vuibert, 251 p.

L'Hostis A., 2014, « Le détour, la pause et l'optimalité. Essai sur la distance et ses apports au transport et à l'urbanisme », Mémoire d'HDR, Université Paris-Est, LVMT.

L'Hostis A., 1997, « Images de synthèse pour l'aménagement du territoire », Thèse de doctorat, Université de Tours, CESA.

Mathis Ph. (dir.), 2007, *Graphs and networks. Multilevel modeling*, Londres, ISTE, 322 p.

Minoux M., Bartnik G., 1986, *Graphes, algorithmes, logiciels*, Paris, Bordas (Dunod informatique), 428 p.

Teghem J., 2012, *Recherche opérationnelle. Tome 1 Méthodes d'optimisation*, Paris, Ellipses, 603 p.

Troin J.-F., 1995, *Rail et aménagement du territoire*, Aix-en-Provence, Edisud, 261 p

UN MODÈLE MULTI-AGENTS POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT FLEXIBLE EN MILIEU URBAIN

Présentation du Trans-Cultural Transport Simulator

par Adrien Lammoglia

UMR GRED, UPVM3/IRD
Route de Mende 34199 Montpellier cedex 5
lammoglia.adrien@gmail.com

Offrir des solutions de déplacement efficaces est un enjeu capital pour les sociétés au Nord, mais aussi dans les pays émergents. De nombreux travaux abordant les problématiques de planification urbaine intègrent la question d'organisation, d'optimisation et de diversification des modes de transport. Les recherches menées dans le domaine des transports innovants montrent que la flexibilité, tendant à augmenter la qualité de service, constitue un des leviers pour améliorer l'offre de transport. Diverses formes de flexibilité existent dans le fonctionnement des systèmes actuels. Pour évaluer ses apports, nous appréhendons des services opérant dans deux contextes sociétaux distincts. D'une part, dans un pays industrialisé (la France) où le développement de réseaux de transport de masse non flexible (tramways, train, bus…) contrebalance difficilement la dépendance automobile. D'autre part, dans un pays émergent (le Sénégal) où l'usage des transports collectifs artisanaux est généralisé, impliquant une grande diversité des modes et une atomisation de l'offre. Bien que de nombreux travaux en géographie, économie et urbanisme abordent la thématique du transport informel, la modélisation et notamment la simulation spatialisée de ces transports demeurent relativement rares. En parallèle, la modélisation multi-agents suscite de plus en plus d'intérêt pour les géographes. Les Systèmes Multi-Agents (SMA) que NetLogo et Gama sont aujourd'hui des outils très prisés par les géomaticiens, au même titre que la Cartographie Assistée par Ordinateur (CAO) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ils permettent de créer un environnement virtuel spatialisé, voire géoréférencé et de simuler une grande diversité de phénomènes spatio-temporels. Ce travail met en exergue les apports de la modélisation multi-agents pour l'étude des transports publics flexibles (type Transport À la Demande) et artisanaux (type taxi collectif informel). L'article présente en particulier le Trans-Cultural Transport Simulator, développé dans l'environnement NetLogo. Par l'analyse du comportement d'agents réalisant ces services en concurrence ou coopération, j'identifie des seuils et des conditions de mise en œuvre des services en termes d'efficacité et de couverture spatiale. Grâce à la confrontation des modèles par la simulation, je propose ensuite une typologie complète des systèmes étudiés. Par ailleurs, j'apporte des éléments de compréhension sur les services auto-organisés au Sénégal, puis je montre les forces et les faiblesses des systèmes de transport flexibles français. In fine, j'ouvre la discussion sur l'intérêt des modèles multi-agents pour l'étude des systèmes de mobilité en milieu urbain et la conception de transports innovants.

Dans les pays émergents, il n'est pas rare de constater que le transport informel joue un rôle majeur dans la mobilité des personnes (Godard, 2008). À Dakar (Sénégal), malgré la volonté des pouvoirs publics d'encadrer l'offre de transport et de diversifier les modes, les transports artisanaux se sont pérennisés au cours des vingt dernières années (Godard, 2002). Ils offrent des services bon marché, relativement flexibles et sont très prisés par les habitants de la proche banlieue. En contrepartie, ils ne sont pas ou peu contrôlés par les autorités organisatrices de transport et présentent un certain degré d'incertitude en termes d'organisation et de fonctionnement. A contrario, dans les pays industrialisés comme la France, l'offre de transport est assez peu flexible et plus orientée vers le transport de masse (bus, tramways, train…). Le recours au transport public reste minoritaire et la dépendance à l'automobile demeure toujours très forte (Bussière et Madre, 2002).

L'idée directrice de ce travail est qu'il est pertinent de confronter le fonctionnement des transports artisanaux sénégalais tels que les taxis collectifs (communément appelés « taxis clan ») (Lammoglia, Josselin et Faye, 2012) avec celui des systèmes

français de type Transport À la Demande (TAD)[1], considérés comme plus modernes et pour lesquels les capacités d'auto-organisation des individus ont été progressivement remplacées par des systèmes d'information et de communication de haut niveau technologique et logistique. Ces innovations semblent apporter plus d'immédiateté au transport flexible, mais nécessitent en contrepartie un encadrement fort de la part des autorités des contraintes réglementaires et spatiales. À l'opposé, les services spontanés et dérégulés identifiés au Sénégal bénéficient d'une plus grande souplesse, au détriment de la sécurité des passagers.

L'objectif de l'article est de comparer et d'analyser les apports et limites des différentes formes de flexibilité. D'un point de vue méthodologique, le travail est basé sur trois modèles inspirés de systèmes de transport observés en France et au Sénégal puis implémentés en Systèmes Multi-Agents (Ferber et Perrot, 1995 ; Amblard et Phan, 2006) dans l'environnement NetLogo (Tisue et Wilensky, 2004). La première partie met en exergue la démarche générale de modélisation, en précisant pour chaque étape les méthodes et outils mis en œuvre. Une seconde partie est dédiée à la présentation du simulateur : le Trans-Cultural Transport Simulator. J'explique l'architecture du méta-modèle, mais aussi le fonctionnement détaillé des modèles dynamiques. La dernière partie est dédiée à l'exploration des systèmes de transport. Grâce à une analyse de sensibilité complète, je mets en évidence les seuils et les conditions de mise en œuvre des modèles en termes d'efficacité et de couverture spatiale. Je propose par la suite une typologie détaillée mettant en exergue les forces et les faiblesses des modèles. *In fine*, la discussion apporte une réflexion sur l'apport des systèmes multi-agents pour l'étude des systèmes de mobilité et la conception de transports innovants.

La modélisation multi-agents pour l'étude des transports flexibles

La démarche générale de modélisation consiste à analyser en particulier les processus internes des différents systèmes de transport, sans prendre en considération toutes les composantes d'un système de mobilité. L'objectif est d'identifier et modéliser les mécanismes et les comportements les plus significatifs. En contrôlant l'environnement et les conditions de simulation, nous pouvons expliquer avec plus de précision les différences concernant le fonctionnement des services et la structuration de l'espace. Dans les simulations, les transports et leur territoire virtuel de desserte ne sont pas modélisés dans un souci d'exhaustivité. La confrontation des modèles n'a pas pour but de formuler des préconisations opérationnelles. Elle constitue plutôt une première étape pour explorer le fonctionnement des systèmes. Comme nous allons le voir dans cette première partie, la démarche générale qui m'a permis de concevoir le simulateur s'articule autour de cinq étapes majeures (fig. 1).

Observations de terrain

La première étape concerne l'étude des services de transport dans leurs contextes sociétaux. Cela inclut mon regard de géographe sur le terrain et l'étude documentaire. Le but de cette étape est de s'inspirer de la réalité et des connaissances existantes pour modéliser des services de transports analogues, opérant dans différents contextes sociétaux.

En France, une attention particulière est portée à la qualité de service. Pour cela, les efforts sont largement orientés vers l'innovation technologique. En améliorant la flexibilité et le traitement de l'information, on tente de proposer des solutions de transport plus spontanées pour concurrencer le véhicule personnel. Pour modéliser ces services, je me suis appuyé sur plusieurs travaux dans le domaine des transports innovants, dont le prototype Modulobus (Guillas et Josselin, 2012) et les TAD TADOU (Garaix *et al.*, 2007) et le TAD Evolis Gare (Castex et Josselin, 2007).

Au Sénégal, l'attention est portée à la rentabilité des services et à la durabilité. L'enjeu pour les autorités est d'organiser et de formaliser les services existants, pour ainsi proposer une offre de transport cohérente et pérenne. Les données sur le fonctionnement des transports informels ou artisanaux sont relativement rares, car très compliquées à obtenir. Nos informations proviennent donc essentiellement d'observations de terrain et d'entretiens avec les acteurs dans leur environnement de travail. Ces acteurs étaient aussi bien des chauffeurs que des propriétaires, des utilisateurs et des responsables des hautes autorités. Les observations ont été appuyées par l'étude de rapports officiels, basés sur des enquêtes réalisées en 2000, délivrés gracieusement par le CETUD[2].

1 Le transport à la demande (TAD) est un transport collectif terrestre de personnes, dont le service est activé seulement à la demande des usagers. On distingue plusieurs degrés de flexibilité selon la souplesse des itinéraires et la spontanéité concernant le traitement des réservations (Banos et Josselin, 1999 ; Le Breton *et al.,* 2000).

2 Le Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD) est un établissement public à caractère professionnel, chargé de la mise en œuvre et du suivi de l'application de la politique sectorielle des transports publics définie par l'État pour la région de Dakar.

Synthèse des observations et classification

La deuxième étape consiste à synthétiser l'information et à établir une classification des éléments observés. À ce niveau, un premier filtre entre en action : le principe de parcimonie (Louryan, 2011). Notre objectif est de trouver les processus les plus révélateurs du fonctionnement des systèmes, par le choix de critères pertinents. Ce processus de sélection concerne les deux principales composantes des modèles, à savoir les agents et toutes les composantes de l'environnement de simulation (réseaux routiers, arrêts de bus, gare routière…).

Concernant les agents, l'objectif n'étant pas de modéliser le comportement des individus dans toute leur complexité, je me suis limité à deux familles les clients et les véhicules. Au sein d'une même famille, ils ont tous strictement le même comportement, mais ils vont être amenés à faire des choix différents au cours de la simulation, en fonction de leur expérience. Pour les clients, les choix vont être influencés par leur localisation initiale, leur lieu de destination et leurs interactions avec les véhicules durant la simulation. De cette manière, on arrive à créer une demande de mobilité probabiliste (créée périodiquement et répartie de manière aléatoire) suffisante pour faire fonctionner un service de transport. La deuxième catégorie d'agents concerne les véhicules. Dans nos modèles, il n'y a pas de distinction entre chauffeur et véhicule. Ils sont modélisés sous la forme d'un seul agent, avec un principe de fonctionnement qui est propre au service modélisé (choix de déplacement, capacité des véhicules, objectifs de desserte...).

A propos de l'environnement, je me suis également limité aux objets indispensables pour faire fonctionner les services, à savoir un réseau routier simplifié sur lequel des stations sont localisées, afin de prendre et déposer les clients. L'espace est isotrope et les clients peuvent se déplacer dans toutes les directions, sans contraintes particulières. Certains paramètres, comme le nombre de voies sur le réseau, la capacité d'accueil des stations, n'ont pas été pris en compte, car ils ne paraissaient pas indispensables au vu des objectifs. D'autres paramètres, comme la rugosité de l'espace, la congestion des réseaux, etc., n'ont pas été intégrés par crainte de complexifier considérablement le système.

Elaboration du modèle conceptuel

Si le premier filtre concerne la sélection des entités à modéliser, le deuxième filtre concerne l'identification des interactions entre les différents agents. La définition des interactions est une phase capitale en modélisation individu-centrée car la manière dont interagissent les agents est vraiment déterminante pour le fonctionnement des modèles. À cette étape, il est bon de se poser les questions suivantes : quelles sont les capacités d'échange de nos agents ? Quel type d'information peuvent-ils échanger ? De quelle manière les agents interagissent-ils, à quels moments de la simulation et sous quelle condition ? Devons-nous programmer des agents cognitifs, qui vont apprendre de leur interaction et faire évoluer leur Est-il possible de se limiter à des agents réactifs aux signaux qu'ils reçoivent au cours de la simulation ?

Une fois de plus, j'ai choisi de me focaliser sur les relations les plus significatives. Le but était d'éviter l'effet de boîte noire, autrement dit de pouvoir comprendre l'incidence de chaque forme d'interaction sur le fonctionnement général du système. Pour représenter le modèle conceptuel, j'ai réalisé un diagramme de classes, UML (Muller et Gaertner, 2000), représentant les entités, les classes d'agents et les liens qui les unissent.

Implémentation des modèles en système multi-agents

La quatrième phase concerne l'implémentation des modèles dans l'environnement de programmation NetLogo. Le travail consiste à coder tous les objets constituant l'environnement de simulation, ainsi que le comportement des agents et leurs variables d'état. À cette étape, j'ai implémenté les procédures spécifiques aux agents (par exemple : « choix de la station à desservir »), reflétant leur comportement, ainsi que les procédures communes à tous les modèles (par exemple : « déplacement des agents »). Enfin, j'ai défini les indicateurs et mis en place les outils statistiques permettant un suivi en temps réel de l'évolution des systèmes.

Un nouveau filtre intervient à cette étape : il s'agit de la transcription du modèle conceptuel en algorithme, codé dans le langage de programmation de NetLogo. Le risque est d'implémenter des procédures qui ne reflètent pas exactement les comportements ou les phénomènes identifiés. Ce problème peut survenir pour plusieurs raisons : soit parce que le modèle conceptuel et les diagrammes UML ne sont pas assez précis, soit parce que le langage de programmation de NetLogo ne permet pas de retranscrire fidèlement les algorithmes. Pour pallier cette difficulté, j'ai procédé à un aller-retour permanent entre la modélisation UML et l'implémentation en Autrement dit, je simulais et explorais les modèles à chaque fois que j'avançais dans le travail d'implémentation. Le but de cette première forme d'exploration était non pas d'analyser la performance des modèles, mais de tester la justesse des comportements simulés en fonction du modèle conceptuel proposé.

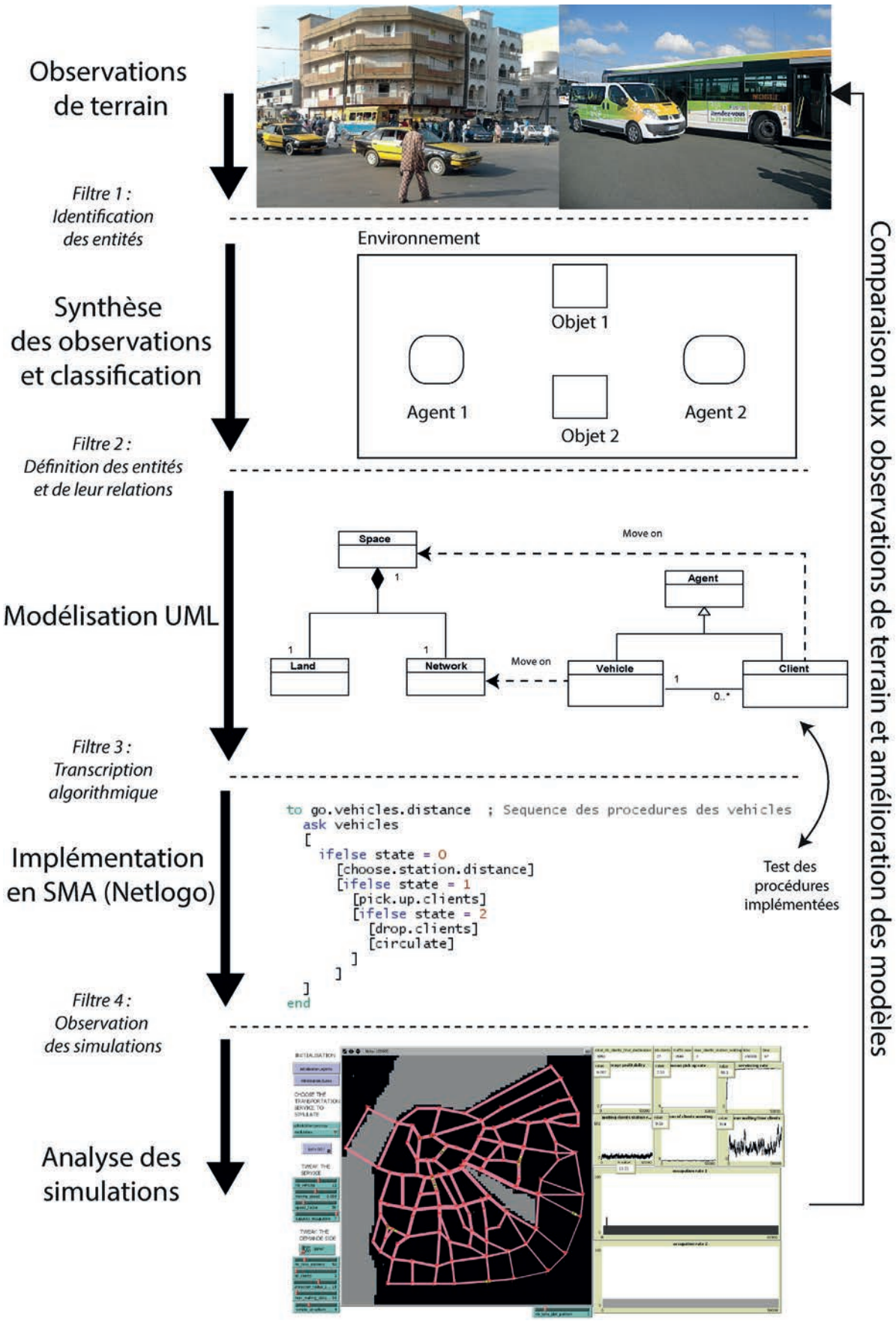


Figure 1 : Démarche générale de modélisation

Analyse des simulations

La dernière étape concerne l'analyse des simulations. À ce stade, j'ai procédé à deux phases d'exploration. La première visait à identifier les seuils d'efficacité des systèmes. La seconde étape consistait à comparer les différents modèles en termes de performance dans des conditions de simulation similaires. De nombreuses simulations préliminaires ont aussi été effectuées pour tester les modèles. Elles ont permis de revenir sur l'étape de modélisation, c'est-à-dire d'enrichir les modèles, soit en corrigeant des algorithmes, soit en développant les comportements, voire en implémentant de nouvelles fonctions. La démarche est donc bien adaptative : il existe un lien évident entre les étapes de modélisation et de simulation.

Le filtre qui intervient à ce niveau est finalement le regard que l'on porte sur nos simulations. La qualité des informations dégagées ou la perte éventuelle d'information va dépendre de la qualité des observations. C'est pourquoi une attention particulière a été portée à l'élaboration d'une méthodologie complète d'analyse de modèle sur NetLogo (Lammoglia, 2013). Cette méthodologie combine à la fois l'observation en temps réel des animations, des graphiques et des moniteurs, et surtout le traitement statistique des données de simulation, avec notamment l'utilisation de méthodes de *scoring* et de mesure de degrés d'incertitude.

Présentation du Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS)

Comme le suggère le préfixe latin *trans* (« par-delà »), le terme transcultural renvoie non seulement à cette idée de confronter les cultures, mais surtout d'accéder à un méta-niveau de réflexion appliqué à la thématique des transports et de la mobilité. Cette notion est liée au concept de transculturation, élaboré par l'anthropologue et ethnologue cubain Fernando Ortiz Fernández. L'auteur évoque un processus de transition entre deux cultures, les deux cultures étant actives et contribuant à l'émergence d'une nouvelle réalité culturelle (Ortiz, 1987). L'intérêt premier du TCTS est de proposer, au sein d'une même interface, une grande diversité de modes de transport, qu'ils soient d'ordre théorique ou inspirés de services réels opérant dans différents contextes sociétaux. Je ne présente pas ici le détail des sept modèles implémentés. En revanche j'explique la structure du méta-modèle et le fonctionnement des trois modèles qui sont au cœur de cet article.

Fonctionnement du méta-modèle[3]

Pour plus d'efficacité, les différents systèmes ont été implémentés au sein d'un même méta-modèle. Le fait de disposer de tous les modèles sur une même interface de simulation permet de les simuler sur des espaces virtuels identiques, avec les mêmes conditions initiales et avec une majorité de procédures communes. Il est alors possible d'analyser précisément l'incidence des procédures spécifiques aux modèles. Nous disposons également des mêmes indicateurs et des mêmes outils d'analyse pour chaque modèle. Les simulations et leurs analyses sont alors standardisées et reproductibles, ce qui est indispensable pour confronter les modèles, analyser leurs performances et révéler leurs spécificités.

Modèle conceptuel (vue statique)

Comme le montre le diagramme de classes UML (fig. 2), les modèles sont tous composés de deux familles d'agents : les clients et les véhicules. Les clients se déplacent sur un espace virtuel composé d'une surface plane continue et isotrope. Les propriétés physiques sont donc identiques dans toutes les directions et les calculs de distance utilisent une métrique euclidienne. L'espace est également composé d'un réseau routier sur lequel circulent les véhicules et dont la forme peut être théorique ou inspirée de réseaux réels.

La structure des réseaux générés est toujours identique, seules la topologie et la forme du graphe varient. Le réseau est constitué de nœuds appelés « stations ». Elles sont les points de rencontre entre les deux types d'agents. Les véhicules prennent en charge les clients uniquement lorsqu'ils s'arrêtent aux stations. Ces stations sont représentées par des points de couleur verte (fig. 9). Certaines ont un statut particulier : elles constituent des destinations pour les clients (représentées par des drapeaux rouges). Les destinations sont des lieux où les clients peuvent être pris en charge et déposés. Chaque station est caractérisée par un potentiel d'attractivité. À l'initialisation, ce potentiel est défini en fonction du nombre de clients situés dans l'aire d'attraction des stations. La taille de cette aire peut être paramétrée via l'interface de simulation. L'attractivité des stations évolue au cours de la simulation en y additionnant le nombre de passages des véhicules et le nombre de clients régulièrement embarqués et débarqués à la station. Les stations sont reliées entre elles par des arêtes. Elles constituent les axes routiers sur lesquels circulent les véhicules. Le réseau est non planaire, *i.e.*

3 « Le méta-modèle est le modèle du langage de modélisation dans lequel sont exprimés les modèles dynamiques qu'un simulateur est censé pouvoir interpréter. Le méta-modèle définit des concepts de modélisation, leurs propriétés et les relations existant entre ces concepts indépendamment des techniques d'implémentation informatique utilisées par le simulateur » (Treuil *et al.* 2008).

des axes peuvent se croiser sans qu'il y ait de point d'intersection, à l'image d'une route qui passerait par-dessus une autre grâce à un pont. Le graphe n'est pas orienté, c.-à-d. les véhicules peuvent circuler dans les deux sens sur tous les axes à la même vitesse. Enfin, la majorité des graphes utilisés ne sont pas complets : les nœuds ne sont pas systématiquement connectés les uns aux autres (cela produirait des réseaux routiers très peu réalistes).

Activité des agents (vue dynamique)

Le diagramme d'activité (fig. 3) précise le comportement des deux familles d'agents et explique comment ils interagissent au cours des simulations. Le temps n'est pas pris explicitement en compte dans nos simulations. Des volées de création de clients simulent des phases ou des pics journaliers. Les agents agissent en continu selon la cadence imposée par le logiciel (les itérations). À noter que les agents ne se déplacent pas à la même vitesse. Le rapport de vitesse entre les véhicules et les individus qui marchent est directement paramétrable depuis l'interface de simulation.

Les véhicules sont créés une seule fois, à l'initialisation. Chacun apparaît sur une station choisie aléatoirement. Ils se déplacent en continu de station en station tout au long de la simulation (sauf pour le modèle « clandos »). À chaque station, ils testent en premier lieu s'ils ont des clients à décharger. Ils vérifient ensuite si des clients en attente peuvent être embarqués. Si c'est le cas, ils se déplacent en direction de la destination demandée par les clients et ils réitèrent ces procédures en continu de station en station.

Contrairement aux véhicules, les clients ont un cycle de vie prédéfini. Ils sont créés à l'initialisation, puis recréés au cours de la simulation, en fonction de la quantité et du pas de temps souhaité par l'utilisateur. Après leur apparition, les clients choisissent d'abord une destination au hasard. Si la destination choisie est trop éloignée pour s'y rendre à pied (distance maximale à paramétrer sur l'interface de simulation), ils choisissent une station à partir de laquelle ils vont prendre un transport pour atteindre leur destination finale. Cette première station est choisie en fonction de son attractivité rapportée à sa distance, de manière à ce que le client n'ait pas trop à marcher. Une fois embarqués, les clients sont inactifs. Ils sont débarqués une fois le véhicule arrivé à destination et disparaissent de la simulation. On ne considère donc pas les éventuels retours des déplacements et aucune hypothèse n'est faite sur leur motif d'origine-destination.

Réseaux et espaces virtuels de simulation

Au sein de l'environnement NetLogo, le TCTS permet de créer une grande diversité de réseaux et d'espaces virtuels, qu'ils soient entièrement théoriques ou inspirés de la réalité. En effet, il est possible de générer un réseau aléatoire (fig. 4) (les nœuds sont disposés aléatoirement dans l'espace puis connectés en fonction d'une distance maximale) ou un réseau dit de Manhattan (réseau rectiligne). Il est également possible de créer des réseaux inspirés du réel, l'utilisateur pouvant s'appuyer sur une couche spatialisée ou un fichier image importé dans l'interface de simulation. Cette méthode a permis de modéliser le centre-ville d'Avignon (fig. 5), ainsi que la proche banlieue de Dakar. Bien que l'espace soit isotropique pour les piétons, il est possible de polariser l'espace en fonction de la population en identifiant des zones de forte et de faible densité. Des informations plus précises sur la méthode de création et les caractéristiques des différents espaces sont exposées dans mon mémoire de thèse (Lammoglia, 2013).

Les modèles dynamiques

Je présente dans cette partie le fonctionnement détaillé des modèles dynamiques, c.-à-d. des trois types de transport flexible étudiés à savoir : (1) les taxis collectifs informels sénégalais (« clandos »), (2) des taxis opérant en coopération (« coopération ») et (3) le prototype de TAD dynamique « modulobus ».

Des véhicules en concurrence qui attendent les clients aux stations (modèle « clandos »)

Ce modèle a été inspiré des « taxis clandos » observés à Dakar. Sa spécificité réside dans le fait que les véhicules ne circulent pas en continu au cours de la simulation. Ils vont systématiquement attendre les clients aux stations avant de commencer à rouler et ils entament leurs tournées seulement lorsque le véhicule est suffisamment rempli (fig. 6). Il s'agit d'un service de transport typiquement dépendant des besoins des clients. Cela ne veut pas dire pour autant que ce soit un service de bonne qualité ou financièrement équitable. Dans les autres modèles, les véhicules choisissent leurs itinéraires de manière plus ou moins rationnelle, mais sans relation directe avec les individus. Ce sont alors les clients qui vont s'adapter et être en attente des véhicules. Dans ce modèle, les véhicules ne vont jamais desservir une destination qui n'est pas demandée par un client. Les agents n'ont aucune connaissance de la forme du réseau et ils ne peuvent pas évaluer les distances. Contrairement à la réalité, ils ne peuvent pas refuser une course, qui serait trop éloignée par exemple.

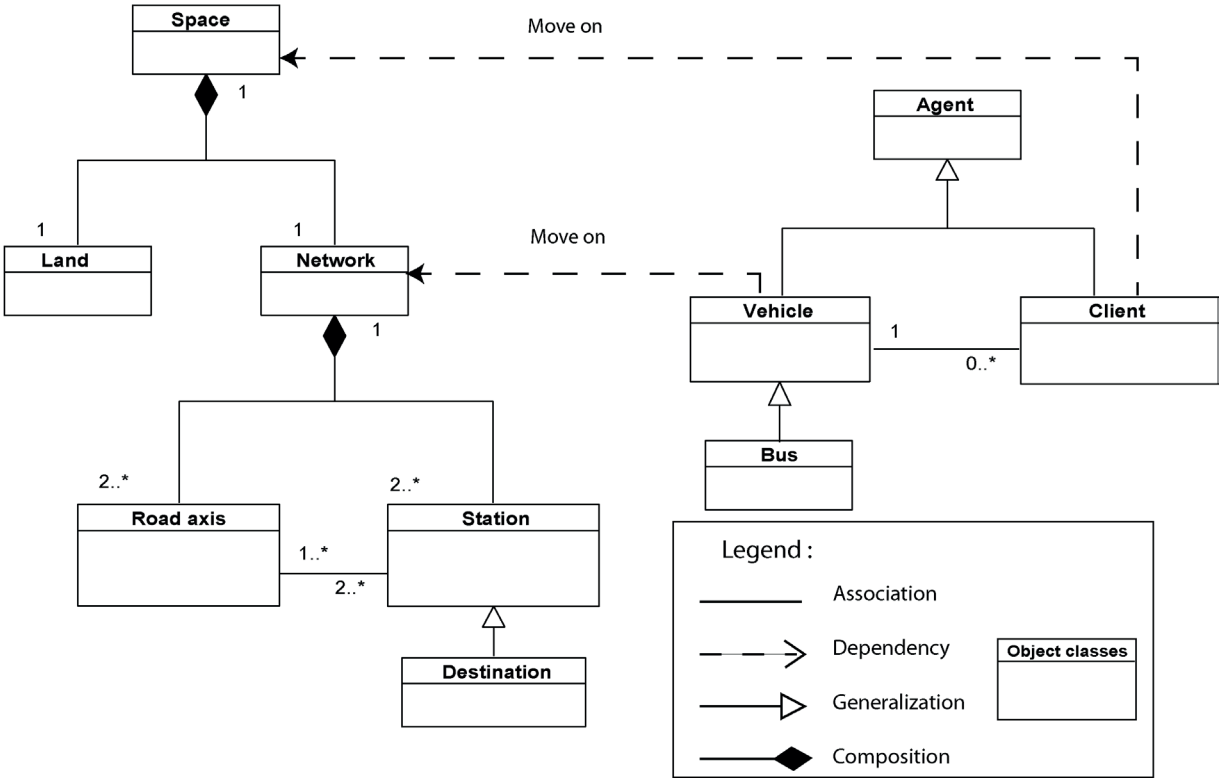


Figure 2 : Diagramme de classe du TCTS (langage UML)

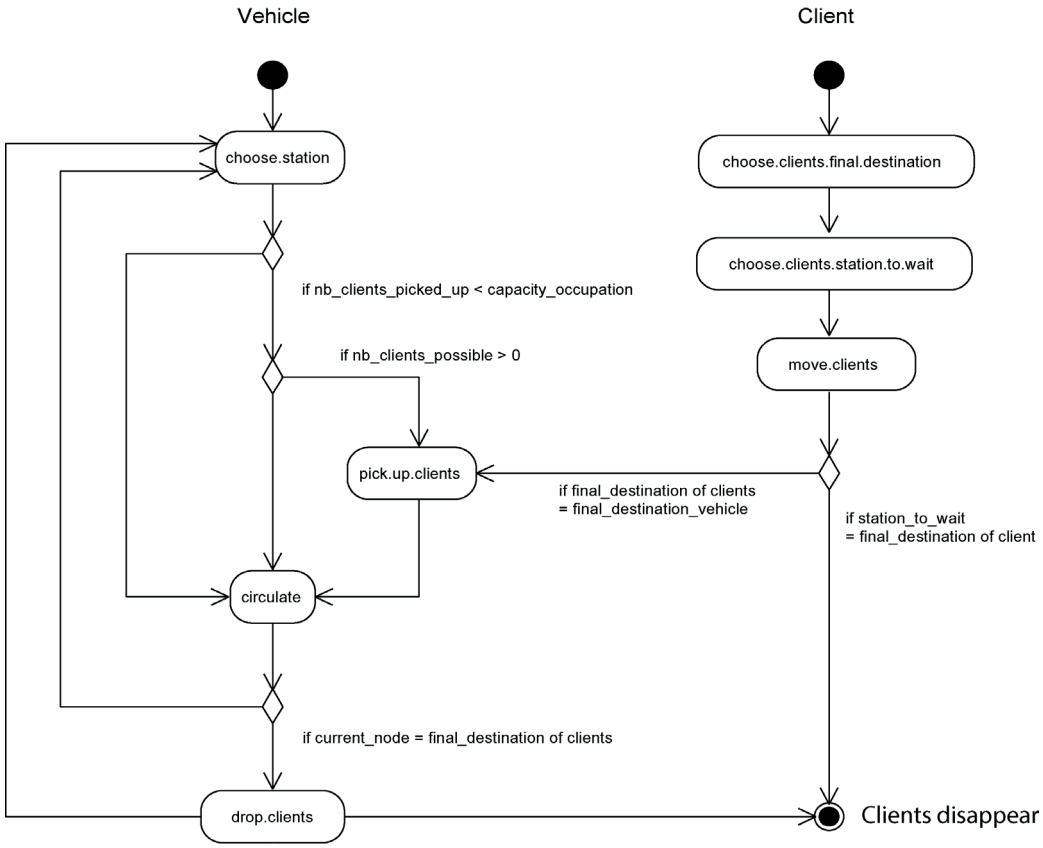


Figure 3 : Diagramme d'activité du TCTS (langage UML)

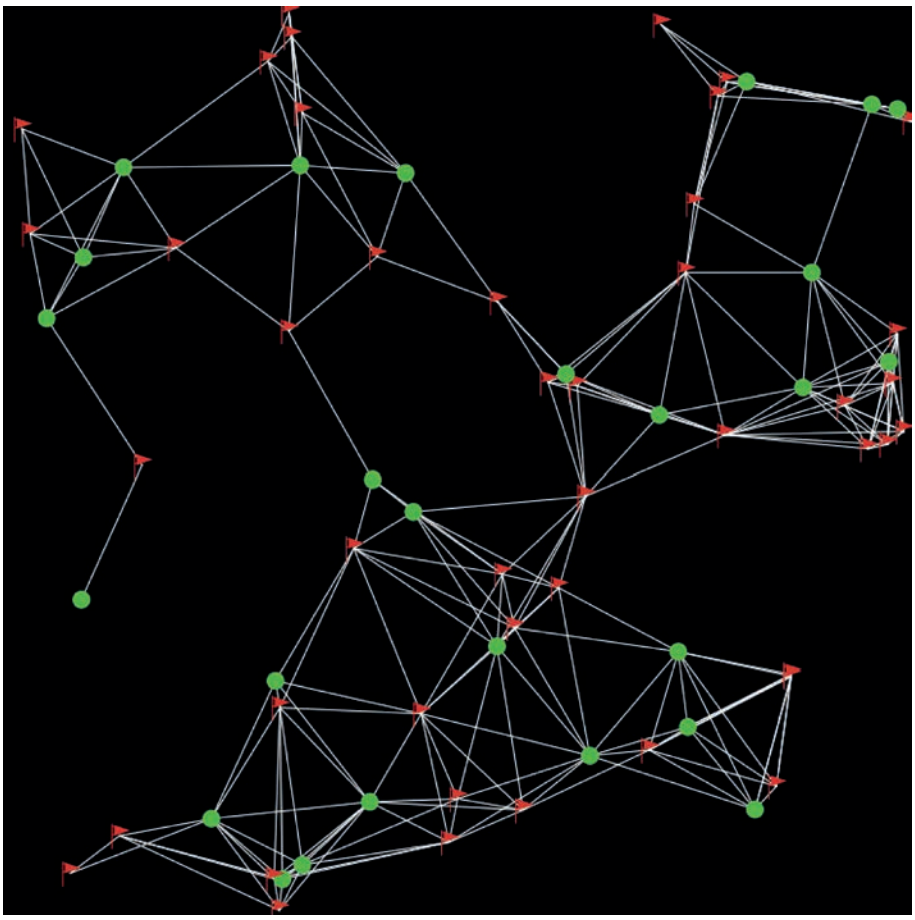


Figure 4 : Un exemple de réseau aléatoire

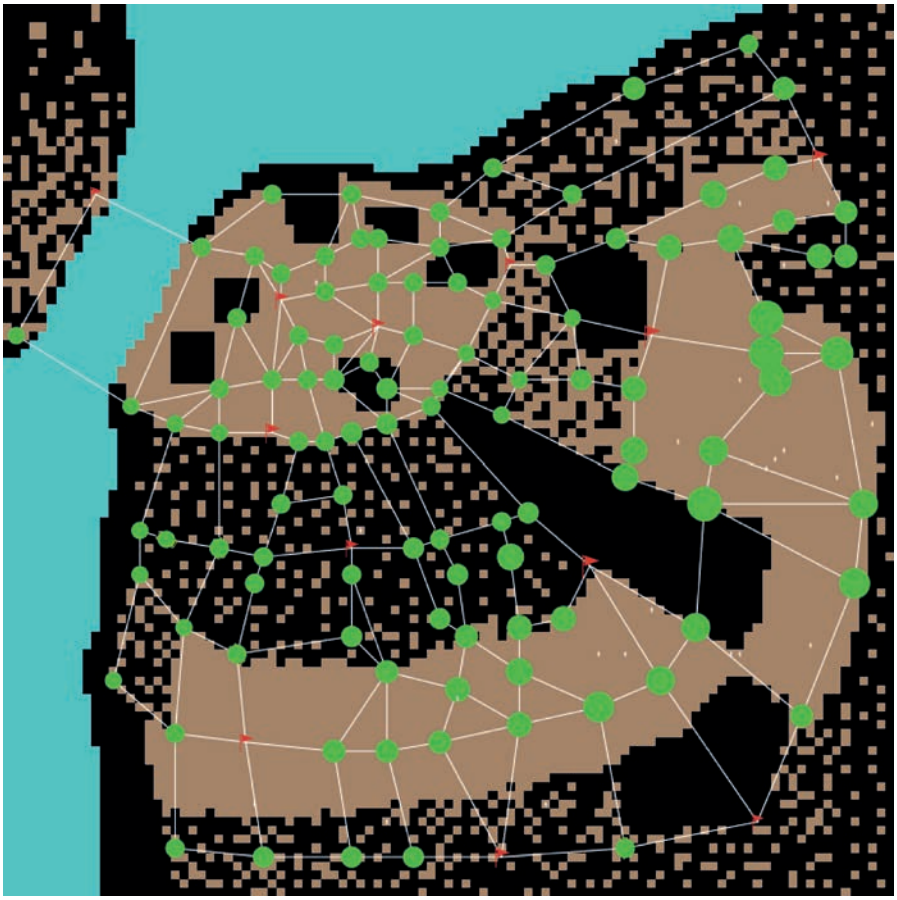


Figure 5 : Réseau simplifié du centre-ville d'Avignon avec des zones de forte et faible densité

La particularité de ce modèle se situe au niveau de la prise en charge des clients. Lorsque les véhicules arrivent à un arrêt, ils vont essayer d'embarquer le maximum de clients et ne vont démarrer leur tournée que si le taux d'occupation est supérieur à un certain seuil (ajustable). Tant que le remplissage du véhicule n'est pas suffisant, ils vont soit choisir une autre destination (si une seule personne était concernée par la précédente), soit attendre que d'autres clients ayant la même destination arrivent à l'arrêt. Dans notre cas, les véhicules commencent leur course quand le taux d'occupation dépasse les 50 % en référence aux chauffeurs de « taxis clandos » avec lesquels je me suis entretenu à Dakar. Dans la réalité ce seuil varie selon les chauffeurs, les créneaux horaires et les caractéristiques de la course (distance temps, kilométrique, densité de clients…).

Un service spontané de véhicules en coopération (modèle « coopération »)

Le modèle « coopération » propose une approche innovante pour optimiser un service de transport flexible, en donnant aux chauffeurs davantage de responsabilités sur l'organisation des itinéraires. Les agents véhicules se voient dotés de nouvelles capacités. Ils sont toujours réactifs, mais ils sont aussi coopératifs et peuvent accéder à des informations partagées entre tous les véhicules et les mémoriser.

Dans leur état initial, les véhicules se déplacent aléatoirement sur le réseau routier. Lorsqu'ils atteignent une station avec des clients en attente, ils embarquent le maximum de clients ayant une même destination, puis ils se dirigent directement vers la station de destination. Si possible, ils embarquent d'autres clients en cours de route. Leur particularité (fig. 7) réside dans le fait que les chauffeurs sont capables de compter le nombre de clients restant après avoir embarqué leurs propres clients. Dans le cas où il resterait des clients en attente après le chargement, l'agent va marquer la station (la station change de couleur sur la simulation), et tous les autres conducteurs vont être informés qu'à cette station précisément il demeure au moins un client en attente. Les agents choisissent toujours en priorité des stations marquées. En revanche, ils ne connaissent pas la quantité exacte de clients. Le comportement des véhicules peut être comparé à celui des fourmis qui explorent un territoire et déposent des marqueurs chimiques (les phéromones) pour informer de leur passage le reste de la colonie. Cet algorithme d'optimisation est connu sous le nom de *Ant Colony Optimization* (Dorigo, Birattari et Stutzle, 2006). Il a d'ailleurs été utilisé dans des modèles de trafic pour simuler les phénomènes de congestion routière (Ando *et al.*, 2006 ; Kurihara *et al.*, 2009).

Cette nouvelle capacité constitue une différence majeure avec les autres modèles. En effet, les agents ont une vision plus large et partagée de l'espace à desservir. Ils peuvent aussi mémoriser de l'information. Le modèle permet de réfléchir sur le rôle des chauffeurs, qui, individuellement, sont capables de collecter toutes sortes d'informations sur le terrain et d'acquérir par la pratique une certaine connaissance du système de mobilité dans lequel ils exercent. Les principes d'auto-organisation basés sur les comportements individuels sont fréquents dans les transports des pays en voie de développement, mais aussi en France avec les opérateurs de taxis. Ces artisans du secteur sont entièrement responsables de leur offre, c'est pourquoi ils n'hésitent pas à communiquer et à s'organiser collectivement pour assurer l'efficacité de leur service et surtout la rentabilité de leur travail.

D'un point de vue algorithmique, la différence première est qu'avant de choisir une station au hasard, les véhicules regardent toujours si une station est marquée. Si oui, le véhicule se dirige vers la station en utilisant le plus court chemin (en distance euclidienne). Lorsque plusieurs stations sont marquées, le véhicule se déplace vers la station marquée la plus proche. Cette dernière n'est pas nécessairement contiguë à la station où se trouve le taxi au moment du choix. Néanmoins, si pendant son déplacement vers la station marquée le véhicule dessert une station avec des clients en attente, il va prendre en charge en priorité ces clients et garder la station en mémoire pour plus tard.

Un service spontané avec une communication clients-véhicules (modèle « modulobus »)

Il est question ici d'un service de type TAD dynamique, c'est-à-dire totalement flexible dans le temps et l'espace. Cette flexibilité est rendue possible grâce à une interaction forte entre les véhicules et les clients. Afin de connecter ces deux entités mobiles, le transport modélisé a recours au *push*, mode de communication dédié entre le conducteur du véhicule et le client potentiel. Dans notre cas, le *push* est un message envoyé au client qui lui indique la destination d'un véhicule en approche. Grâce à cette information, le client intéressé va se rendre à l'arrêt le plus proche où va passer le véhicule et monter dans ce véhicule pour se rendre à sa destination indiquée dans la feuille de route.

Les véhicules ne communiquent pas entre eux et fonctionnent en concurrence. À l'initialisation, chaque véhicule se déplace aléatoirement de station en station à la recherche de clients. La différence se situe lors de la prise en charge des clients, puisque dès cet instant, les véhicules vont calculer leur itinéraire jusqu'à la destination finale (plus court chemin en distance euclidienne) et partager en temps réel cette information, via les *pushs*, avec tous les clients de la simulation. La

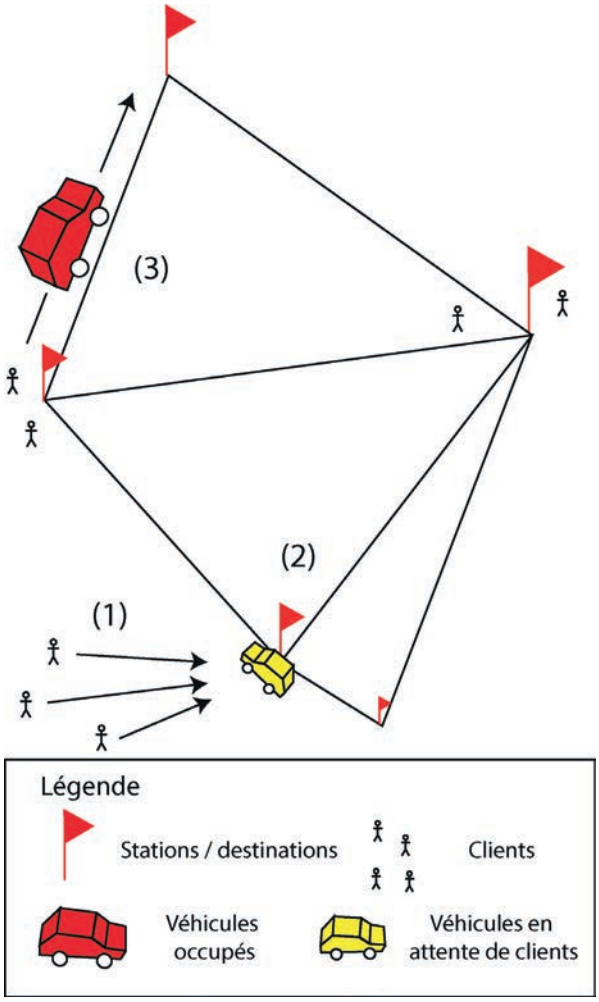


Figure 6 : Choix de déplacement basé sur l'attente des clients aux stations. (1) Les véhicules attendent les clients aux stations ; (2) iIs vont prendre pour destination la station qui concerne le plus grand nombre de clients ; (3) les clients s'installent à bord du véhicule et attendent le départ ; dès que le taux de remplissage est satisfaisant, le véhicule entame sa tournée ; s'il reste de la place à bord, il peut aussi prendre d'autres clients en cours de route.

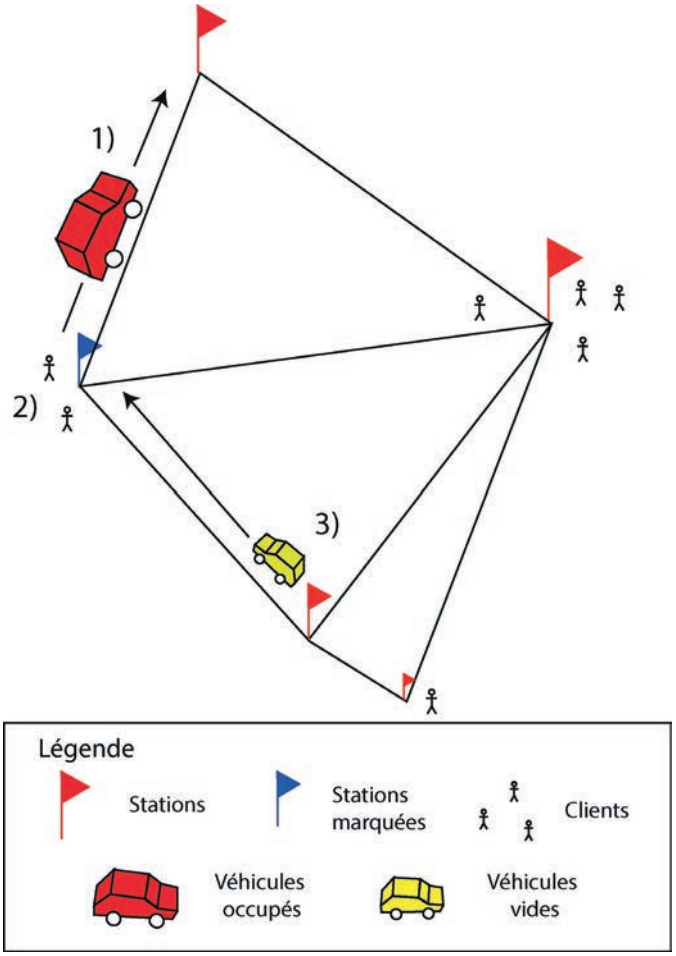


Figure 7 : Choix de déplacement basé sur la coopération inter-véhicules. (1) Les véhicules embarquent les clients aux stations et les déposent à leur destination ; (2) une fois les clients embarqués, le véhicule va regarder s'il reste des clients en attente à la station ; si oui, il va marquer la station et informer les autres véhicules ; (3) quand ils ne sont pas occupés, les véhicules se dirigent en priorité vers les stations marquées.

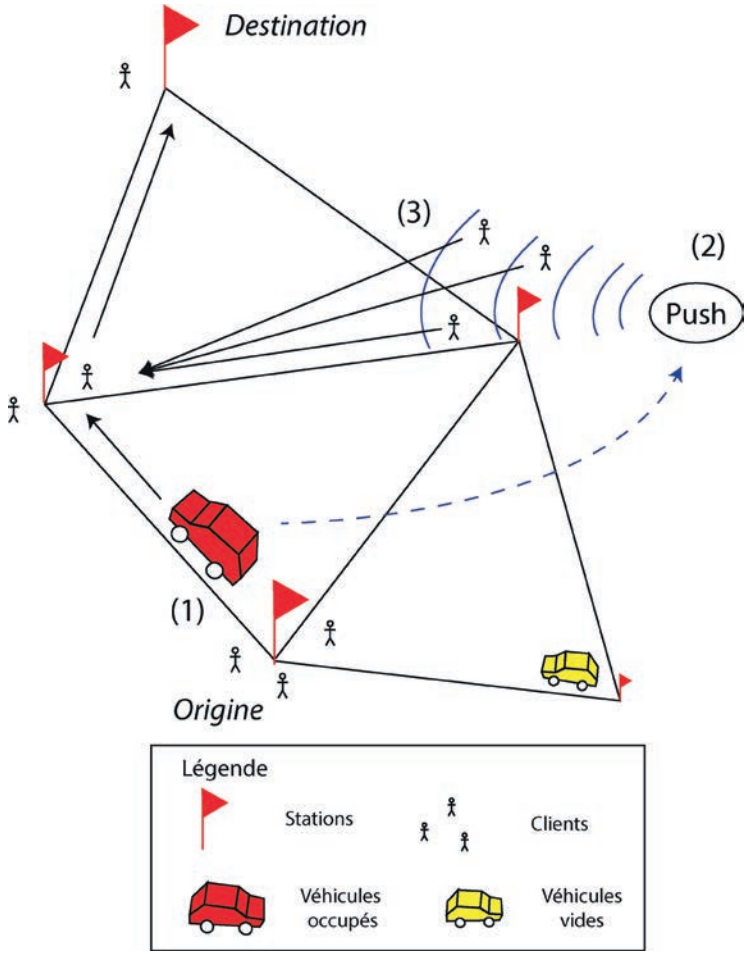


Figure 8 : Choix de déplacement basé sur la communication véhicules-clients. (1) Lorsqu'un véhicule embarque des clients, il transmet son itinéraire de desserte à tous les clients via un push ; (2) en accédant au push, les clients vont chercher un véhicule ayant la même destination qu'eux ; s'ils en trouvent un, ils vont changer de station et se déplacer vers la station la plus proche, prochainement desservie par le véhicule.

particularité du modèle concerne donc le comportement des clients, notamment l'interaction entre les clients et les véhicules. Les clients ne se limitent plus à une seule station possible pour prendre un transport, mais ils vont chercher la station la plus intéressante tout au long de la simulation. Ils connaissent tous les véhicules qui vont desservir leur station de destination. Ils connaissent aussi, pour chaque véhicule, l'itinéraire qu'il va emprunter. En fonction de ces informations, ils vont marcher vers la station la plus proche, prochainement desservie par un véhicule, ayant la même destination qu'eux. La communication se fait en temps réel (à chaque itération) et on peut observer, dans les simulations, des clients qui changent plusieurs fois d'arrêts.

Interface de simulation

L'interface de simulation se veut intuitive et pédagogique (fig. 9). NetLogo permet d'importer un environnement de simulation et d'exporter l'état de la simulation à tout moment. Une fois l'environnement affiché à l'écran, l'utilisateur peut choisir parmi les trois modèles de transport. À gauche de l'interface, plusieurs paramètres permettent de personnaliser les conditions initiales de simulation, notamment les caractéristiques de l'offre et de la demande de mobilité. À droite, des graphiques et des moniteurs mis à jour en temps réel permettent d'observer l'état des principales variables et l'évolution des indicateurs au cours de la simulation. Il est également possible d'observer sur l'animation la structuration de l'espace virtuel.

Paramètres initiaux de simulation

Une fois le modèle sélectionné, l'utilisateur peut initialiser la simulation et personnaliser les paramètres concernant le service de transport et la demande de mobilité. Les paramètres modifiables sont d'une part, pour les services de transport :

- le nombre de véhicules (sachant que leur nombre n'évolue pas en cours de simulation) ;
- leur vitesse de déplacement qui est relative à la vitesse de déplacement des clients (facteur vitesse) ;
- le nombre de places offertes dans chaque véhicule (capacité d'occupation).

sont d'autre part, pour la demande de mobilité :

- la période de création des clients : toutes les n itérations logicielles de nouveaux clients sont créés et disposés aléatoirement dans l'espace ;
- le nombre de clients à créer périodiquement ;
- le rayon du cercle d'attraction des stations, qui permet de calculer l'attractivité des stations à l'état initial (en fonction du nombre de clients présents dans le cercle) ;
- la distance maximale de déplacement, en-deçà de laquelle un client va directement marcher jusqu'à la destination sélectionnée (au lieu de marcher en direction d'une station pour prendre un transport).

Une fois tous les paramètres fixés, l'utilisateur peut lancer la simulation. Il est possible d'accélérer ou de ralentir l'animation, de la réinitialiser et de la relancer à souhait.

Variables et indicateurs

Le TCTS permet d'analyser chaque simulation de manière exploratoire selon trois approches (fig.10). Pour chaque approche, j'ai défini une série d'indicateurs qui sont observés en temps réel sur l'interface de simulation, puis analysés statistiquement grâce à des exports de données.

La première approche consiste à évaluer la qualité de service pour les clients par le biais des indices suivants :

- le nombre moyen de clients en attente aux stations à l'instant t (CA) ;
- le temps d'attente moyen des clients avant embarquement (TAC). Un compteur au niveau de chaque client permet de mesurer le nombre d'itérations écoulées à partir de la création d'un client jusqu'à l'embarquement dans un véhicule ;
- le nombre de clients présents dans la simulation à l'instant t (sachant qu'ils sont créés périodiquement et qu'ils disparaissent une fois arrivés à destination) ;
- le plus grand nombre de clients en attente ainsi que la station concernée à l'instant t.

La seconde approche concerne les performances et l'efficacité des services de transport. Les indicateurs sont les suivants :

- le nombre de voyageurs par kilomètres (VPK) : nombre total de clients embarqués (Ce), rapporté à la distance temps totale (D) parcourue au cours de la simulation. ;
- le taux de chargement (tC en %) : part des stations traversées avec prise en charge de clients (Sc), rapportée au nombre total de stations fréquentées (Sf). ;
- le taux d'occupation des véhicules (tO en %) : nombre de clients à bord d'un véhicule (c) à l'instant t rapporté à la capacité du véhicule (CP) : .

Enfin, il est possible d'appréhender la desserte à l'échelle du territoire, comme si nous nous placions au niveau d'une autorité organisatrice de transport. Les observations sont alors d'ordre spatial et structurel, nous analysons :

- le taux de desserte (tD en %) : nombre total de clients arrivés à destination (Ca) divisé par le nombre total de clients créés (C) : ;

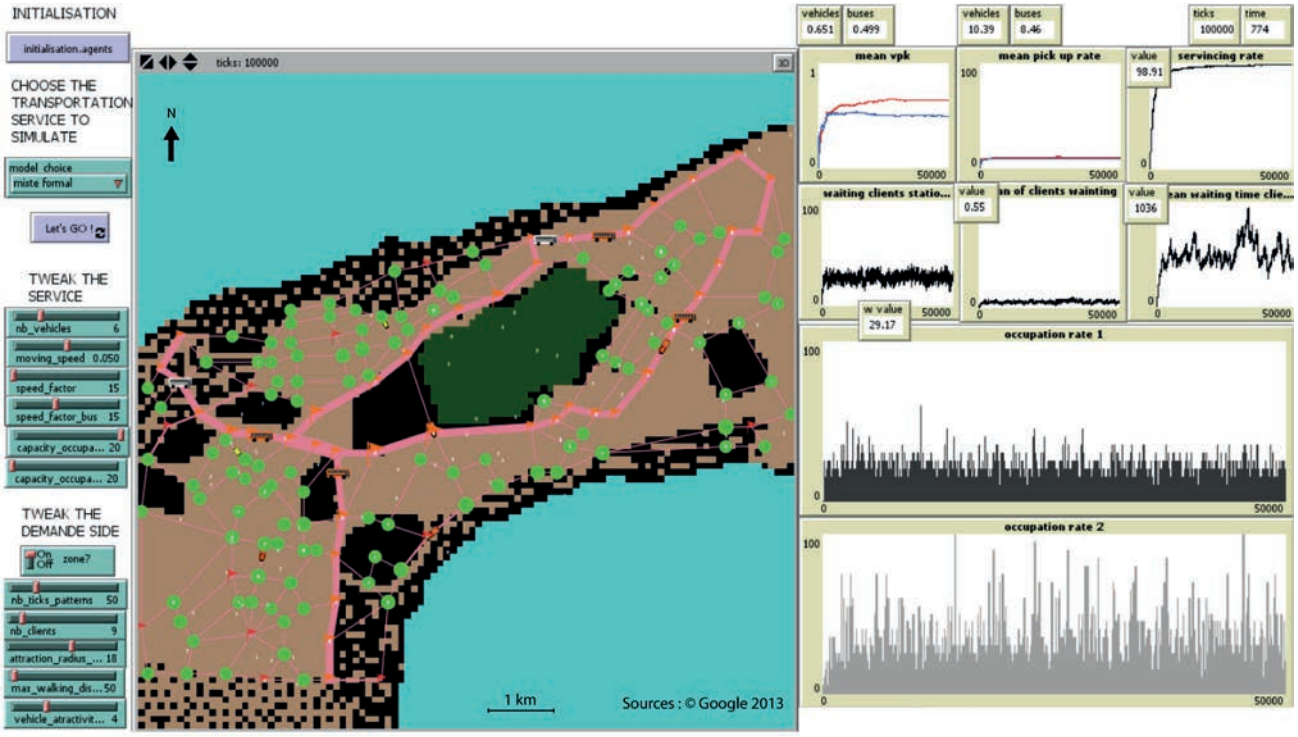


Figure 9: Interface de simulation (plateforme NetLogo) : à gauche les conditions de simulation à paramétrer à l'initialisation ; au centre la fenêtre de simulation ; à droite les graphiques dynamiques permettant de suivre l'évolution des indicateurs en temps réel.

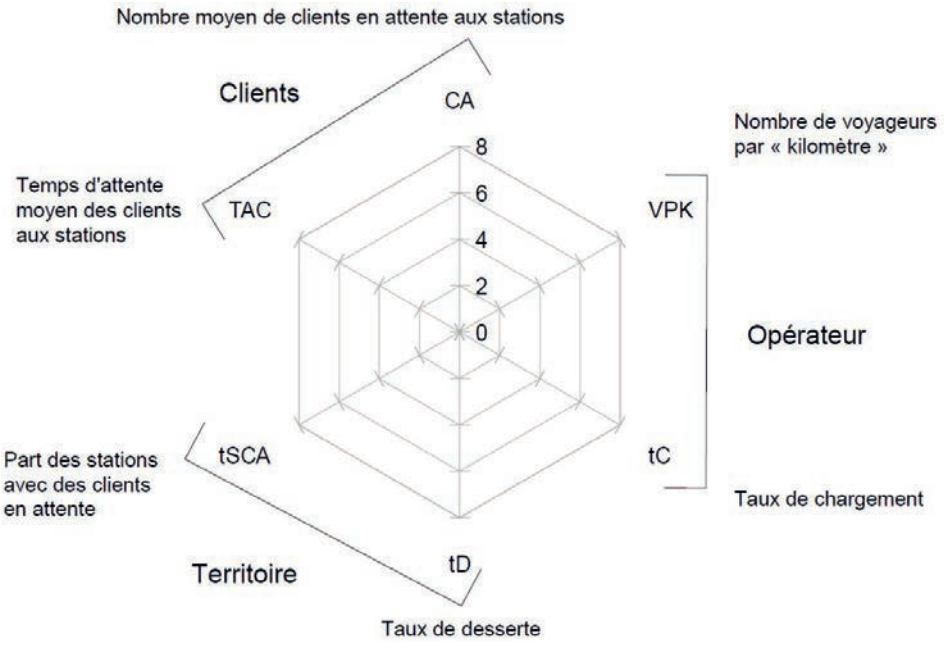


Figure 10 : Synthèse des six indicateurs regroupés en trois approches

- la proportion de stations avec des clients en attente (tSCA en %) : nombre de stations avec des clients en attente (Sc) à l'instant t rapporté au nombre total de stations (S) : ;
- la répartition des flux routiers sur le réseau. Chaque axe est caractérisé par la variable trafic qui indique le nombre de passages cumulés de véhicules ;
- le potentiel d'attractivité des stations à l'instan

Observations et analyses des simulations

Les graphiques et les moniteurs situés à droite de la fenêtre de simulation permettent d'observer en simultané le fonctionnement des agents, l'évolution des variables et des indicateurs présentés ci-dessus (fig. 9). Ces graphiques sont mis à jour dynamiquement à chaque itération logicielle. Aussi, pour faciliter les observations, la taille des objets évolue au cours de la simulation. L'épaisseur des axes routiers est proportionnelle à la fréquentation des véhicules (variable trafic). La taille des stations et des destinations est proportionnelle à leur potentiel d'attractivité respectif. Cela permet d'observer et de comprendre la structuration de l'espace virtuel, notamment les phénomènes de polarisation. Pour finir, NetLogo propose toute de fonctions d'exportation de données permettant d'extraire à la fois les graphiques, le détail des données de la simulation, des captures d'écran et même des clips vidéo, dans leur dimension diachronique. Chaque simulation peut être sauvegardée dans son intégralité et être réimportée plus tard si nécessaire.

Analyse de sensibilité et performances des modèles

Les résultats présentés dans cette partie sont issus de ma thèse soutenue publiquement en octobre 2013 (Lammoglia, 2013). Au cours des trois années de doctorat j'ai pu effectuer plusieurs centaines de simulations ce qui nous a permis d'analyser très finement le fonctionnement des modèles. Dans cet article, je mets en exergue les résultats les plus innovants. Sans entrer dans les détails des simulations, j'explique d'abord la méthodologie mise en œuvre concernant l'analyse de sensibilité. Je propose ensuite une typologie complète des trois modèles en question.

Protocoles de simulation

Dans un premier temps, l'objectif a été d'explorer la sensibilité des modèles dans l'espace des paramètres et de définir des seuils d'efficacité. Le temps de simulation et la fréquence de création des clients ont été définis en me basant sur de précédentes expérimentations (Lammoglia, Josselin et Marilleau, 2015) *it is possible to significantly improve the global transport efficiency without any general objective function, (ii.* En effet, j'ai pu constater qu'il existait un facteur optimum entre le nombre de clients à créer et la fréquence de création qui se situe aux alentours de 5. Autrement dit, les résultats sont relativement similaires lorsqu'on crée 10 clients toutes les 50 itérations ou 20 clients toutes les 100 itérations. A ce stade, j'ai donc décidé de fixer la fréquence de création à 50 pour que la simulation progresse plus rapidement. Le temps de simulation a aussi été fixé à 100 000 itérations car, au-delà, les indicateurs ne variaient presque plus. Concernant la demande de mobilité, la distance de marche maximale et le rayon d'attractivité des stations (qui permet de définir l'attractivité à l'état initial) étaient également fixes. Les paramètres qui ont été testés dans cette première phase d'exploration sont donc (a) le nombre de clients générés périodiquement, (b) le nombre de véhicules, (c) le facteur de vitesse de déplacement entre les véhicules et les piétons, (d) la capacité de charge des véhicules, le type de réseau (convergence ou point à point) (fig. 11). Finalement, cette première phase a permis de révéler les conditions de fonctionnement idéales pour chacun des modèles.

Après avoir exploré la sensibilité des modèles, l'objectif de la seconde phase d'exploration a été d'analyser en profondeur leur performance et de les caractériser très précisément. Pour cela j'ai fixé les paramètres peu influents et analysé en profondeur l'incidence des autres, à savoir la topologie des réseaux et la capacité de montée en charge des transports. Ainsi, j'ai d'abord évalué la stabilité des modèles en les simulant de manière itérative avec des conditions de simulation identiques (20 simulations par modèle). C'est une étape indispensable pour évaluer la sensibilité des modèles aux procédures aléatoires qu'ils intègrent et ainsi pouvoir justifier les comparaisons. J'ai donc ensuite testé l'influence que pouvait avoir la forme des réseaux sur le fonctionnement des différents modèles (6 réseaux testés[4]). Pour finir, j'ai étudié la capacité de montée en charge des trois services en les soumettant à 6 niveaux de densité de clients (fig. 12).

Typologie des modèles

Pour conclure l'analyse des modèles, je propose dans la partie qui suit une typologie complète des trois systèmes (fig. 17). L'objectif est ici de révéler les forces et les faiblesses, de réfléchir à l'apport de la flexibilité dans leur mode de fonctionnement, ainsi qu'à d'éventuelles pistes d'améliorations.

Modèle « modulobus »

De manière générale, le modèle « modulobus » apparaît comme le modèle le plus performant. Son point fort

4 La topologie et les spécificités de chaque réseau sont expliqués en détail dans ma thèse (Lammoglia, 2013)

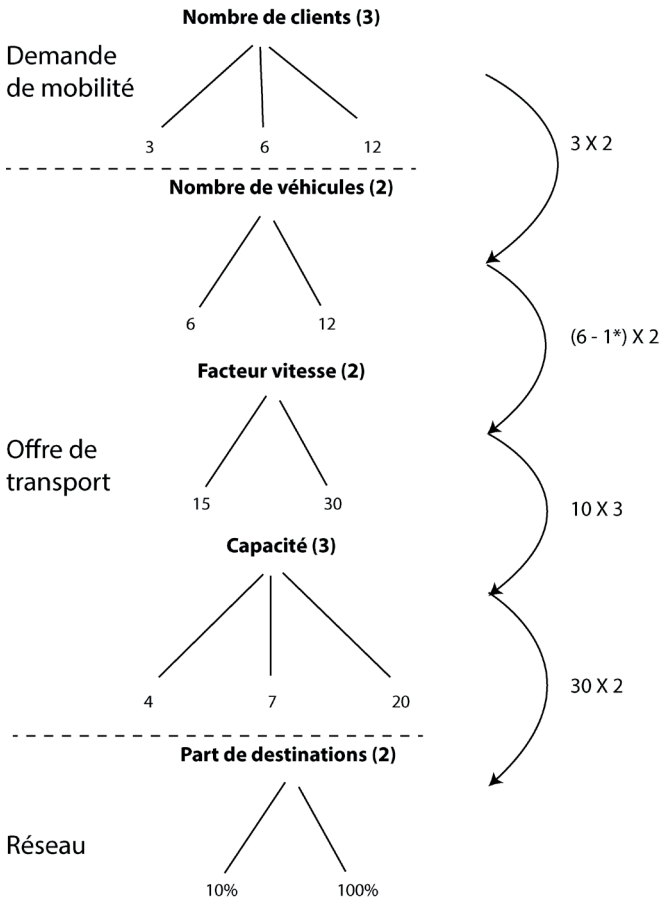


Figure 11 : Arbre de simulation de la première phase d'exploration

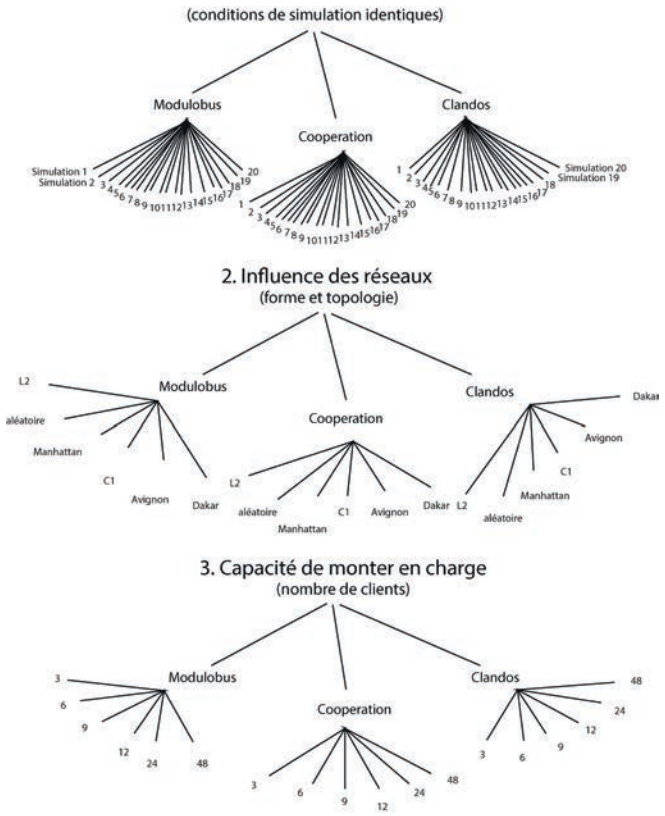


Figure 12 : Arbre de simulation de la seconde phase d'exploration

est la qualité de service. Nous constatons à la fois de très bons résultats et une très bonne stabilité pour les indicateurs concernant la satisfaction des clients et la desserte du territoire (fig. 13 et fig. 14).

Le modèle est peu sensible à la topologie des réseaux. Il présente une capacité de montée en charge très importante (3 à 48 clients créés toutes les 50 itérations). Finalement, c'est le modèle qui bénéficie de conditions de fonctionnement les plus étendues. Le principe de communication mis en œuvre et la possibilité pour les clients de partir à la rencontre des véhicules constituent donc un gain d'efficacité important. Toutefois, quels que soient la forme et le type de réseau simulé (convergence ou point à point) les indicateurs concernant l'approche opérateur demeurent moyens. Ils augmentent très légèrement avec la densité de clients.

Pour améliorer le modèle, il serait intéressant de préciser cette forme d'interaction et surtout de limiter le déplacement des clients qui, dans certains cas, peut produire des scènes très peu réalistes. Par exemple, nous pourrions demander aux clients de ne pas se déplacer en permanence vers les véhicules en s'arrêtant soit au bout d'une certaine distance parcourue, soit après un « échec ». En effet, j'ai pu observer des situations ou le client tente de rejoindre un véhicule mais arrive trop tard à la station. Il se peut aussi que le véhicule soit plein au moment de son passage. Pour corriger ce problème, il serait nécessaire d'intégrer au *push* des données comme le taux de remplissage et l'heure de passage des véhicules aux stations. Un des leviers serait donc d'enrichir l'information partagée entre les clients et les véhicules. De plus, j'ai constaté que le principal défaut du « modulobus » était la faible rentabilité du service. Cela s'explique par le fait que les véhicules circulent en continu sur le territoire. Or, le principe même du TAD est de déclencher des véhicules à la demande des clients. Nous pourrions alors imaginer un comportement mixte du modèle, entre celui du « modulobus » et celui du « clandos », autorisant les véhicules à partir avec un seul client à bord et de transmettre ensuite l'itinéraire via le *push*.

Modèle « coopération »

La spécificité de ce modèle est d'afficher des résultats relativement bons pour les trois approches, avec de très bons résultats dans certaines conditions de simulation. C'est aussi le modèle qui présente les meilleures performances en faible densité notamment grâce à sa capacité d'exploration du territoire. Le « modulobus » est relativement peu sensible aux différents paramètres testés, le paramètre le plus influent étant la densité de clients. Il est aussi peu sensible à la forme du réseau et aux caractéristiques du territoire. En revanche, il n'excelle dans aucun des domaines et on a pu constater une dégradation importante de la qualité de service en forte densité (fig. 13).

Le modèle « coopération » peut finalement être considéré comme le modèle de transport typiquement multi-agents. En effet, il permet de modéliser un principe de coopération entre des chauffeurs de véhicules. Néanmoins la manière dont les agents coopèrent est bien plus proche de celle des fourmis que celle des *taximen* dans la réalité. Ceci étant, j'ai pu observer des résultats très intéressants, soulignant la polyvalence du service, puisqu'il présentait généralement de bons résultats pour l'ensemble des indicateurs.

Deux leviers apparaissent alors pour améliorer ce modèle. Tout d'abord il serait intéressant de modéliser un principe d'interaction plus sophistiqué entre les véhicules. Par exemple, en plus de marquer les stations avec des clients en attente, le véhicule pourrait sentir la présence ou non de véhicules à proximité et informer les autres véhicules de la station ciblée. Cela permettrait de mieux répartir la desserte sur le territoire et d'éviter que des véhicules se dirigent vers les mêmes stations. Le second levier serait d'enrichir l'information déposée aux stations. Il serait par exemple intéressant que les véhicules puissent connaître le nombre exact de clients en attente aux stations pour ainsi mettre en place un système de priorité.

Modèle « clandos »

Dès les premiers résultats, le modèle « clandos » est apparu particulièrement intéressant. Pour l'ensemble des simulations, il se démarque grâce à ses très bonnes performances concernant l'approche opérateur. Les différences observées avec les deux autres modèles sont très importantes (fig.15 et fig. 16). En revanche, c'est le modèle qui présente les conditions de fonctionnement les plus restreintes et il présente une très faible qualité de service.

Trois raisons expliquent les faibles performances en forte densité pour les approches « client » et « territoire ». Tout d'abord (i), je n'ai implémenté dans ce modèle qu'une partie des comportements observés à Dakar. En effet, les véhicules fonctionnent en garage uniquement, c'est-à-dire qu'ils attendent les clients à l'arrêt et ils ne débutent leur tournée qu'une fois le véhicule suffisamment rempli. Or, il existe dans la réalité un deuxième mode de fonctionnement complémentaire qui consiste à circuler en continu sur des itinéraires relativement réguliers en heure pleine (forte densité de clients) pour embarquer les clients en cours de route. Aussi (ii), dans toutes les simulations, le taux de remplissage minimum pour le départ des véhicules

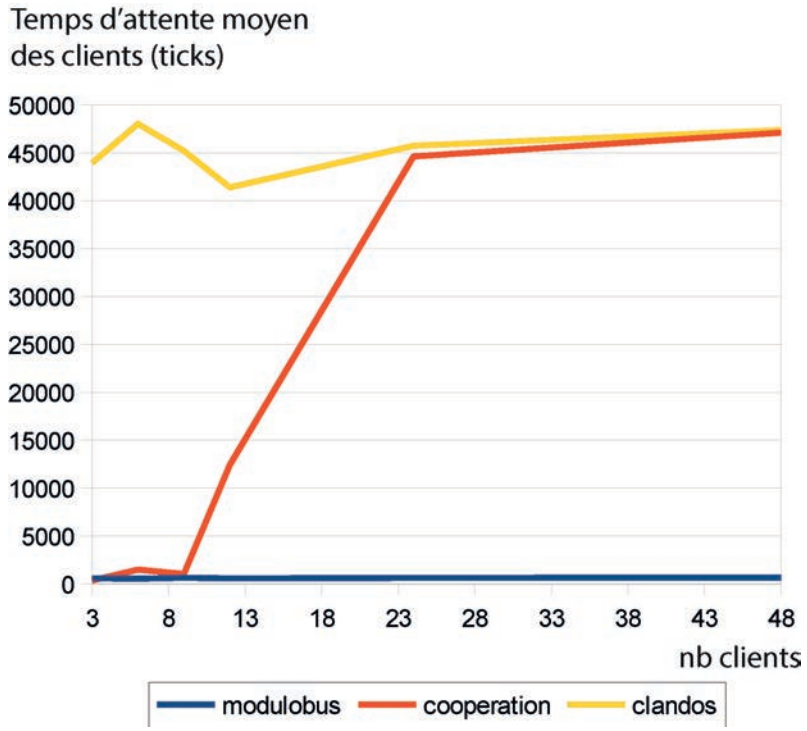
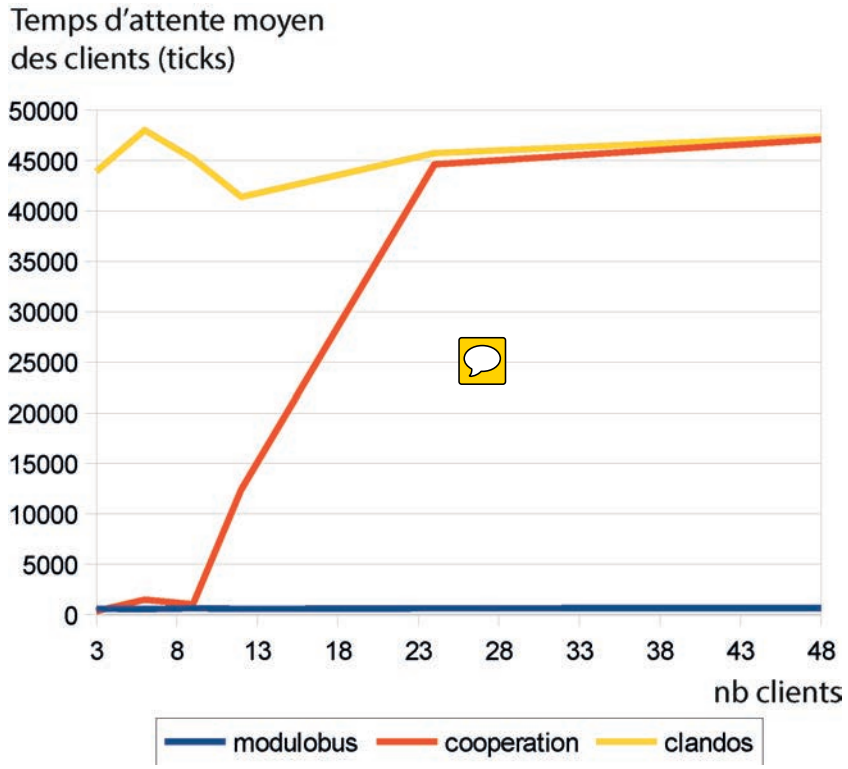


Figure 13 : Temps d'attente moyen des clients en fonction du nombre de clients générés périodiquement au cours de la simulation



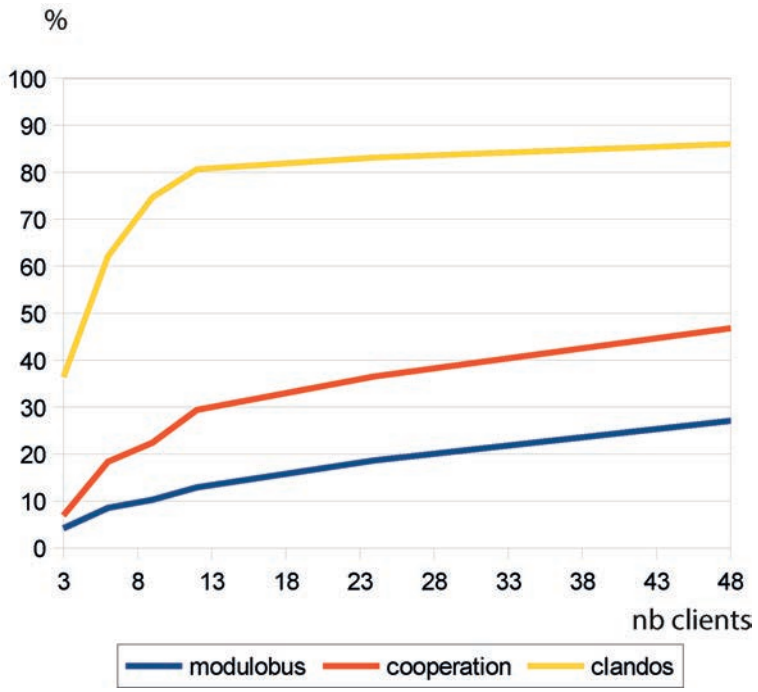


Figure 15 : Taux de chargement des véhicules en fonction du nombre de clients générés périodiquement au cours de la simulation

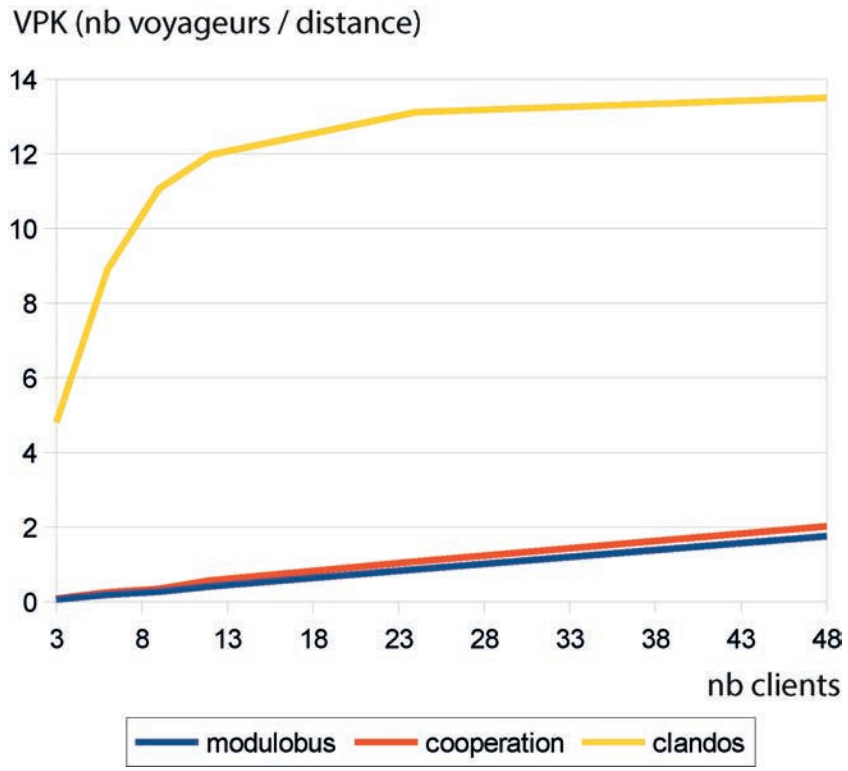


Figure 16 : Nombre de voyageurs par kilomètres parcourus en fonction du nombre de clients générés périodiquement au cours de la simulation

à 50 % est fixe. Ce n'est pas le cas dans la pratique puisque les chauffeurs peuvent l'adapter en fonction des conditions du moment (heure creuse ou pleine, situation financière…). Enfin (iii), il ne faut pas négliger le rôle que jouent les réseaux sociaux dans le fonctionnement des transports informels. Pour ce travail, j'ai simulé des comportements de clients relativement simples, qui ne reflètent pas la manière dont les différents acteurs interagissent à Dakar. Par exemple, il arrive fréquemment que des clients interrogent des chauffeurs pour trouver un transport adapté à leur déplacement. Les clients discutent aussi beaucoup entre eux pour se donner des conseils et partager leurs expériences quotidiennes. Un des enjeux serait de modéliser une nouvelle catégorie d'agent : les *coxeurs*[5], et de définir les règles d'interaction avec les clients et les véhicules.

Conclusion et perspectives

In fine, ce travail constitue une première étape de réflexion sur l'emploi des SMA pour le développement des transports flexibles. Le Trans-Cultural Transports Simulator est en effet le premier outil permettant de simuler des systèmes artisanaux africains. C'est aussi un des rares outils offrant la possibilité d'évaluer les apports de l'interaction entre les individus (chauffeur et clients) pour l'optimisation de Transports À la Demande. Dans les paragraphes qui suivent, je propose une réflexion sur les apports de la modélisation multi-agents au sein des sciences géomatiques.

Comprendre et expliquer le fonctionnement des transports artisanaux/informels

Un des enjeux des modèles présentés est l'apport de connaissances sur le fonctionnement de services dits artisanaux ou informels, dans les pays en voie de développement. En effet, les données concernant leur mode d'opération sont assez rares, car difficiles à obtenir. Ce travail montre qu'en étudiant les pratiques des chauffeurs il était possible de modéliser le fonctionnement de ces services. Bien que les modèles ne soient pas exhaustifs, ils permettent, dans un premier temps, de réfléchir à l'importance des choix décisionnels des acteurs et d'analyser l'impact de ces services sur un système de mobilité à l'échelle d'un territoire.

Au-delà des modèles étudiés dans cet article, j'insiste sur le fait que le simulateur NetLogo est un logiciel libre (*freeware*) relativement simple à maîtriser. Il est donc tout à fait possible d'organiser des cours et des formations dans les universités des pays du Sud (comme du Nord) et ainsi développer le nombre d'utilisateurs potentiels. L'association CODATU[6] avait pour projet de mettre en place une base de connaissances sur le transport en Afrique qui serait hébergée par un pays africain et partagée avec tous les autres pays. Il serait possible d'enrichir cette base de données en y intégrant un ensemble de modèles qui en partie par des étudiants et des chercheurs africains. Grâce à ces modèles, nous pourrions analyser et comparer des services artisanaux opérant dans différentes villes africaines. De plus, ces modèles pourraient permettre d'ouvrir le dialogue avec les autorités, comme j'en ai pu faire l'expérience lors de réunions de travail à Dakar avec les membres du CETUD. En effet, la présentation de résultats de simulation aide à réfléchir à l'intégration et l'organisation des transports informels, parfois mal connus par les autorités. Pour aller plus loin, nous pourrions même envisager de développer des modèles participatifs (modèle d'accompagnement type jeux de rôle), à l'image de ComMod (Barreteau *et al.*, 2014), qui permettrait de faire réfléchir et interagir une grande diversité d'acteurs (décideurs, chercheurs, chauffeurs, propriétaires, etc.), réunis autour d'une même table.

Concevoir de nouveaux services innovants et optimisés

Les SMA sont aussi intéressants pour inventer de nouveaux types de transports flexibles, notamment des services adaptés dynamiquement à la demande. Grâce à l'aspect exploratoire de l'approche, il est possible de réfléchir aux leviers permettant d'optimiser les systèmes. Par exemple, le principal levier que j'ai pu identifier dans ce travail est la communication entre les clients et les véhicules. Il serait tout à fait possible d'aller plus loin en intégrant, par exemple, de réelles capacités de coopération, voire d'apprentissage, ou bien même de faire intervenir un agent de haut niveau qui constituerait un intermédiaire entre les différents types d'agents (Josselin, Marilleau et Lang, 2009). Cela permettrait de démultiplier les formes d'interaction et d'enrichir l'information transmise. Un aspect qui n'a que très peu été abordé dans ce travail est également la calibration des services. La simulation à base d'agent constitue une méthode intéressante pour tester un service de transport et le calibrer en jouant sur différents critères d'optimisation, chose qu'il est difficile de faire en situation réelle.

5 Les « coxeurs » procèdent au remplissage des véhicules en échange de quelques pièces. On les trouve fréquemment dans les gares routières et au niveau des arrêts. Ces acteurs du transport facilitent le travail des chauffeurs car ils sont en directe avec les clients. Ce sont souvent des jeunes en attente de devenir chauffeur qui apprennent le métier en collaborant avec ces derniers (Lammoglia, Josselin et Faye, 2012 ; Seck, 2006).

Figure 17 : Typologie des modèles basés sur une méthode de scoring

Bibliographie

Amblard F., Phan D., 2006, *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Paris, Hermes science publ. (Collection Science informatique et SHS), 446 p.

Ando Y., *et al.,* 2006, « Performance of pheromone model for predicting traffic congestion », *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, p. 73−80.

Banos A., Josselin D., 1999, « Les services de transport à la demande dans leur marché et leur cadre institutionnel– étude de faisabilité d'un repositionnement socio-économique de ces marchés », *Rapport d'étape PREDIT d'octobre*, p. 58.

Barreteau O., et al., 2014, « Companion modelling: a method of adaptive and participatory research », dans *Companion Modelling*, p. 13−40.

Bussière Y., Madre J.L., 2002, *Démographie et transport: villes du Nord et villes du Sud*, Paris, Editions L'Harmattan, 494 p.

Castex É., Josselin D., 2007, « Temporalités éclatées : la réponse des transports à la demande aux nouvelles formes de mobilité » Bondue J.-P., Royoux D. (dir.), *Espace populations sociétés. Space populations societies*, 2007/2-3, p. 433−447.

Dorigo M., Birattari M., Stutzle T., 2006, « Ant colony optimization », *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1, 4, p. 28−39.

Ferber J., Perrot J.F., 1995, *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, Paris InterEditions, 522 p.

Garaix T., *et al*., 2007, « Transport à la demande points à points en zone peu dense. Proposition d'une méthode d'optimisation de tournées », *Cybergeo : European Journal of Geography*.

Godard X., 2002, *Les transports et la ville en Afrique au sud du Sahara: le temps de la débrouille et du désordre inventif*, Paris, Karthala Editions, 410 p.

Godard X. (dir.), 2008, *Le transport artisanal dans les villes méditerranéennes,* Aix en Provence MMSH (Actes INRETS n° 114)

Guillas A., Josselin D., 2012, « Prototypage d'un Transport à la Demande dynamique : le concept de Modulobus », Rapport final, Predit 4 Séminaire de valorisation du GO2-GO3 Accessibilité..

Josselin D., Marilleau N., Lang C., 2009, « Modelling dynamic demand responsive transport using an agent based spatial representation », *European Conference on Complex Systems*.ECCS'09, Warwick.

Kurihara S.,et al., 2009, « Traffic congestion forecasting based on pheromone communication model for intelligent transport systems », *Proceedings of the Eleventh conference on Congress on Evolutionary Computation*, p. 2879−2884.

Lammoglia A., 2013, «Analyse et modélisation multi-agents de transports flexibles», Thèse de doctorat, , Université d'Avignon.

Lammoglia A., Josselin D., Faye R.M., 2012, « Les taxis clandos à Dakar : quel avenir pour ces transports à la demande (TAD) urbain », *The role of urban mobility in (re)shaping cities* Conférence CODATU XV. Addis Abeba, Ethiopie, 22-25 Octobre.

Lammoglia A., Josselin D., Marilleau N., 2015, « Some propositions to find optimal conditions to simulate a flexible transport using an Agent-Based Model », *Cybergeo : European Journal of Geography*. juin 2015.

Le Breton E., *et al*., 2000, « Le Transport à la Demande, un nouveau mode de gestion des mobilités urbaines », *GIP Mutations des industries et des services, PREDIT,*

Louryan S., 2011, « Le principe de parcimonie ou "rasoir d'Ockham". », *Revue médicale de Bruxelles*, *32*, 5, p. 488−489.

Muller P.A., Gaertner N., 2000, *Modélisation objet avec UML*, Paris, Eyrolles, 520 p.

Ortiz F., 1987, *Contrapunteo cubano del tabaco y el azúcar*, Caracas, Fundacion Biblioteca Ayacuch, 465 p.

Seck S.M., 2006, « Transport et territoires: les « coxeurs » de Dakar, du bénévolat à la prestation de service », *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 48, p. 7−17.

Tisue S., Wilensky U., 2004, « NetLogo: A simple environment for modeling complexity », *International Conference on Complex Systems*, p. 16−21.