



HAL
open science

Analyse et modélisation multi-agents de transports flexibles. Comparaison de services français et sénégalais.

Adrien Lammoglia

► To cite this version:

Adrien Lammoglia. Analyse et modélisation multi-agents de transports flexibles. Comparaison de services français et sénégalais.. Géographie. Université d'Avignon, 2013. Français. NNT: . tel-00903655v1

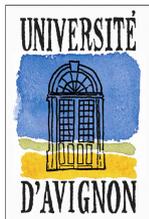
HAL Id: tel-00903655

<https://theses.hal.science/tel-00903655v1>

Submitted on 12 Nov 2013 (v1), last revised 28 Mar 2014 (v2)

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

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



UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ACADÉMIE D'AIX-MARSEILLE



UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE

THÈSE en cotutelle internationale

entre

l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, France

et

l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal

pour obtenir le grade de Docteur

SPÉCIALITÉ : Géographie

École Doctorale 537 « Culture et Patrimoine » (C&P), Avignon

SPÉCIALITÉ : Informatique

École Doctorale « Mathématique et Informatique » (EDMI), Dakar

**Analyse et modélisation multi-agents
de transports flexibles
Comparaison de services français et sénégalais**

présentée par

ADRIEN LAMMOGLIA

soutenue publiquement le 14 octobre 2013 devant un jury composé de :

M. Dominique BADARIOTTI	Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
M. Arnaud BANOS	Chargé de Recherche, CNRS	Examineur
M. François BOUSQUET	Directeur de recherche, CIRAD	Examineur
M. Alexis DROGOU	Directeur de recherche, IRD	Rapporteur
M. Roger M. FAYE	Maître de conférences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar	Co-directeur
M. Xavier GODARD	Directeur de recherche, INRETS	Examineur
M. Didier JOSSELIN	Directeur de recherche, CNRS, Université d'Avignon	Co-directeur
M. Claude LISHOU	Professeur, Université Cheikh Anta Diop de Dakar	Examineur



Avant-propos

La thèse que nous présentons a été inspirée d'un voyage touristique en 2009 au Sénégal. Accompagné d'un ami sénégalais, j'ai pu découvrir et observer pendant ces trois semaines la diversité des modes de transport au Sénégal et plus particulièrement à Dakar. Ayant travaillé avec Didier Josselin sur des questions de Transport A la Demande en première année de Master, l'utilisation des transports sénégalais a alimenté ma réflexion sur la flexibilité des transports. Cela nous a permis de soumettre, durant ma seconde année de Master, un projet de thèse à l'ADEME qui a accepté de le financer.

Trois semaines étant très courtes pour vraiment comprendre les spécificités des services dakarois, nous avons œuvré pour que la thèse bénéficie d'une co-tutelle entre la France et le Sénégal. L'objectif était de séjourner plus longtemps au Sénégal afin d'observer plus finement les transports et surtout d'échanger avec les spécialistes sur place. Cela a été possible grâce à Roger Faye et l'école Supérieure Polytechnique de Dakar qui m'ont accueilli pendant trois mois (d'octobre 2011 à février 2012). Au cours de ces trois mois, je suis retourné vivre avec la famille qui m'avait accueilli la première fois. Étant pleinement immergé dans le mode de vie sénégalais, j'ai dû vivre et me déplacer comme n'importe quel sénégalais. Cela m'a permis de découvrir rapidement la métropole dakaroise et ses divers services de transports. Ce séjour a surtout été l'occasion de rencontrer et de travailler avec une variété de personnes. Des chauffeurs de taxi aux membres du conseil exécutif des transports urbains de Dakar, toutes ces personnes m'ont énormément apporté et sans elles cette thèse n'aurait certainement pas eu cette cette originalité.

Partenariat

ADEME

La thèse est entièrement financée par l'ADEME et s'insère dans deux thèmes du programme de travail PREDIT 4 :

- Mobilités dans les régions urbaines (GO 3) : approche géographique de la mobilité, urbanisme, inter-modalité, pratiques de mobilité, etc.
- Politiques de transport (GO6) : Régulation, réglementation et organisation des transports urbains. Transport public et transport privés.

UMR ESPACE et Prorentsoft : projet ANR-PREDIT TSFA (Transports Sûrs, Fiabiles et Adaptés) : Le Modulobus

La collaboration avec le groupe de chercheurs pluridisciplinaire et l'entreprise Prorentsoft, qui ont piloté le projet Modulobus, a joué un rôle déterminant pour cette thèse. Le projet ANR, terminé en 2012, a permis de proposer un prototype de transport à la demande dynamique, que nous avons pu modéliser et simuler dans nos travaux.

Centre Universitaire de Recherche et d'Études de la Mobilité (CUREM)

Grâce à une cotutelle avec l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, par l'intermédiaire du Laboratoire de Traitement de l'Information (LTI), nous avons pu effectuer une mission de trois mois à Dakar. Cela nous a permis de travailler en collaboration avec des spécialistes du transport et de la mobilité en milieu urbain au Sénégal. Nous avons particulièrement collaboré avec le Centre Universitaire de Recherche et d'Études de la Mobilité qui vise à se positionner comme un centre de référence en matière de transport pour les autorités locales et régionales, les professionnels locaux et sous-régionaux liés à la mobilité.

Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD)

Le deuxième collaborateur majeur au Sénégal est le CETUD. Le Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar 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. Au cours des trois mois, nous avons été gracieusement accueilli et nous avons pu accéder à tout un ensemble de rapport d'études.

CODATU (COopération pour le Développement et l'Amélioration des Transport Urbains)

CODATU est une association à vocation internationale dont l'objectif est de promouvoir les actions d'animation et d'échanges scientifiques, techniques, économiques et sociaux concernant les systèmes de déplacements urbains et périurbains. Elle s'appuie sur les échanges d'expériences entre les pays en développement et les pays les plus anciennement industrialisés. Dès le début de la thèse, nous nous sommes rapprochés de l'association CODATU qui est aujourd'hui une référence incontournable en la matière. Grâce à la présentation d'un article dans la dernière conférence CODATU XV, à Addis Abeba nous avons pu rapprocher nos travaux et créer des liens étroits. De nouvelles collaborations devraient également voir le jour d'ici 2014 (séminaires, réunion de travail, publication d'articles, etc.).

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite adresser mes sincères remerciements à mes deux directeurs de thèse. Je remercie Didier Josselin pour son encadrement, son implication et ses encouragements. Pendant ces 5 années, j'ai pu apprendre beaucoup de choses de notre collaboration. Des choses autant sur le plan professionnel que personnel et dont je serais éternellement reconnaissant. Je remercie également Roger Marcelin Faye qui a permis que cette thèse bénéficie d'une cotutelle internationale avec l'université Cheikh Anta Diop de Dakar. Je le remercie pour son encadrement assidu et pour son accueil irréprochable à Dakar.

Je remercie l'ADEME pour avoir soutenu et financé le sujet de thèse. Je remercie particulièrement les responsables de la cellule thèse qui m'ont permis de travailler dans de très bonnes conditions. Je salue aussi toutes les personnes ayant œuvré pour les rencontres des doctorants de l'ADEME.

Je voudrais témoigner ma reconnaissance au personnel de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, qui m'a offert, depuis ma première année de Master un cadre de travail vraiment très agréable. Je voudrais remercier tous les collègues de bureau pour leur bonne humeur et pour leur patience. Je remercie tous les membres du laboratoire UMR ESPACE pour leur sympathie et leur attention. Je remercie particulièrement Nathalie et Michel qui se sont toujours montrés d'une grande efficacité.

Je souhaite remercier tous les partenaires qui ont permis d'enrichir cette thèse. Je les remercie pour leur collaboration et pour leurs échanges très instructifs. Je remercie donc tous les membres du CETUD, les employés de la SOTRAM, l'équipe de Prorentsoft, l'association CODATU, tous les membres du LTI et du CUREM qui m'ont très bien accueilli dans leurs locaux.

Je tiens à remercier tous les chauffeurs et toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir de travailler durant mon séjour à Dakar. Je les remercie d'avoir été à mon écoute et d'avoir répondu sans hésitation à toutes mes questions. Parmi ces personnes, certains sont devenus des proches. Je vous remercie tous du fond du cœur et j'espère pouvoir vous le rendre un jour.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes à Dakar qui m'ont accueilli et qui ont rendu ce séjour inoubliable. Je remercie particulièrement mes grands frères sénégalais, ainsi que tous mes amis et leur famille. Vous êtes gravés à jamais dans mon cœur.

Je remercie Nico, Laurent et ma mère pour les relectures et pour leurs nombreux conseils.

Enfin, je remercie du fond du cœur toute ma famille et mes proches pour leur amour et leurs encouragements. L'amour est le premier carburant de l'Homme. Un grand merci à tous, ma gratitude est éternelle.

Table des matières

Introduction.....	17
Contexte de recherche.....	19
Les enjeux de mobilité en France métropolitaine.....	19
La problématique des transports au Sénégal.....	20
Des transports flexibles pour faire face à ces contraintes sociétales.....	21
Problème posé.....	23
Questions.....	24
Objectifs.....	24
Positionnement et enjeux scientifiques.....	25
Organisation du mémoire.....	26
 Partie 1.	
L'offre de transport	
en France et au Sénégal.....	29
Chapitre 1.Définitions.....	33
1.1 Transport collectif, semi-collectif et individuel.....	33
1.2 La notion de public et de privé.....	34
1.3 Secteur formel et informel.....	36
1.4 L'artisanat dans le secteur des transports.....	39
1.5 Comment composer avec toutes ces termes ?.....	40
Chapitre 2.Les services réguliers ou peu flexibles.....	42
2.1 La prédominance du transport de masse régulier en France.....	42
2.1.1 L'autobus.....	42
2.1.2 Les TCSP.....	43
2.1.3 Des systèmes en perpétuel développement.....	44
2.1.4 Fiche signalétique.....	45
2.2 Le service de bus de grande capacité Dakar Dem Dikk.....	45
2.2.1 Matériel roulant.....	46
2.2.2 Fonctionnement du service.....	46
2.2.3 Quelles perspectives pour Dakar Dem Dikk ?.....	48
2.2.4 Fiche signalétique.....	49
2.3 Les célèbres « cars rapides » sénégalais.....	49
2.3.1 Un service formel ou informel ?.....	50
2.3.2 Un service flexible ou régulier ?.....	50
2.3.3 Le parc de véhicules.....	50
2.3.4 Fonctionnement du service.....	52
2.3.5 Coûts, rendement et rentabilité.....	53
2.3.6 Les problèmes posés.....	54
2.3.7 Fiche signalétique.....	55
2.4 Les récents opérateurs formels de minibus.....	55
2.4.1 Organisation du système.....	56

2.4.2 Le matériel roulant et les équipages.....	58
2.4.3 Esquisse de bilan.....	59
2.4.4 Fiche signalétique.....	61
Chapitre 3. Les services flexibles semi-collectifs.....	62
3.1 Les transports à la demande (TAD).....	62
3.1.1 Définitions.....	62
3.1.2 Les objectifs du TAD.....	63
3.1.3 Les différents types de TAD et leur mode de fonctionnement.....	64
Niveau 1 : les systèmes proches des transports collectifs classiques, mais avec des dessertes réalisées par des véhicules semi-collectifs.	64
Niveau 2 : les TAD relativement flexibles utilisant des lignes virtuelles, créées suite à une réservation préalable.....	64
Niveau 3 : les services sans horaire fixe et sans ligne virtuelle.	65
Niveau 4 : les TAD très souples proposant une desserte point à point en quasi temps réel.....	66
3.1.4 Les centrales de réservation.....	68
3.1.5 Quelles perspectives pour le TAD en France ?.....	70
3.1.6 Fiche signalétique.....	71
3.2 Les taxis collectifs sénégalais.....	71
3.2.1 Formes d'organisation.....	72
3.2.2 Fonctionnement des « garages »	73
3.2.3 La couverture spatiale du service.....	74
3.2.4 Les pratiques et la forme des tournées au niveau local.....	74
3.2.5 Une rentabilité calculée au jour le jour.....	75
3.2.6 Des tournées limitant les incertitudes et adaptées aux besoins de mobilité.....	76
3.2.7 Un taux de remplissage toujours proche des 100 %.....	77
3.2.8 Immédiateté et rapidité : le temps c'est de l'argent.....	77
3.2.9 Un exemple de système basé sur l'interaction des individus.....	78
3.2.10 Fiche signalétique.....	79
Chapitre 4. Le transport public individuel.....	80
4.1 Les taxis français.....	80
4.1.1 Organisation et fonctionnement du service.....	80
4.1.2 Cadre légal.....	81
4.1.3 Quel rôle à jouer pour les taxis en France ?.....	81
4.1.4 La dérive des chauffeurs dans l'illégalité.....	82
4.1.5 Fiche signalétique.....	82
4.2 Les taxis artisanaux sénégalais.....	82
4.2.1 Des artisans du transport.....	83
4.2.2 Mode de fonctionnement.....	83
4.2.3 Une tarification flexible.....	85
4.2.4 La pratique du taxi collectif chez les opérateurs formels.....	85
4.2.5 Quel avenir pour ces taxis ?.....	86
4.2.6 Fiche signalétique.....	86
4.3 Des taxis avec réservation téléphonique à Dakar.....	87
4.3.1 Une société qui cherche à se différencier.....	87

4.3.2 Un service organisé sur deux niveaux.....	88
4.3.3 Les tarifs du centre d'appel et la clientèle ciblée.....	90
4.3.4 Un modèle de réussite pour les transporteurs dakarais ?.....	90
4.3.5 Fiche signalétique.....	91
Conclusion partie 1 : les services flexibles sélectionnés.....	92
 Partie 2.	
Modélisation multi-agents de systèmes de transport.....	95
Chapitre 1.Le cadre théorique.....	99
1.1 Le paradigme de la complexité.....	99
1.1.1 Qu'est-ce qu'un système complexe ?.....	99
1.1.2 La complexité en Sciences Humaines et Sociales.....	100
1.1.3 La complexité dans les systèmes de mobilité.....	101
La demande de mobilité (cf. (a) dans l'illustration 25).....	102
L'offre de transport (cf. (b) dans l'illustration 25).....	103
L'autorité organisatrice de transport (cf. (c) dans l'illustration 25).....	105
Sauts d'échelle et interaction entre les trois sous-systèmes.....	105
1.2 L'approche systémique.....	106
1.2.1 La modélisation systémique.....	107
1.2.2 La théorie des systèmes.....	109
Organisation et auto-organisation.....	109
Équilibre et stabilité.....	110
Chapitre 2.Des modèles à base d'agents pour l'étude de systèmes de mobilité.....	111
2.1 La modélisation multi-agents.....	111
2.2 Des objectifs de modélisation variés.....	114
2.2.1 Simuler des systèmes de mobilité réalistes.....	114
2.2.2 Comprendre et expliquer des systèmes.....	118
2.2.3 Résoudre des Problèmes et optimiser des tournées.....	122
2.3 Notre approche.....	123
2.3.1 Le paradigme multi-agent.....	123
2.3.2 Le langage de modélisation UML.....	125
Le diagramme de classe vue (statique).....	125
Les diagrammes d'activités (vue dynamique).....	126
Les diagrammes d'état transition (vue dynamique).....	126
2.3.3 La plate-forme de simulation NetLogo.....	126
2.3.4 Le protocole ODD.....	127
Aperçu du modèle.....	128
Les concepts mis en œuvre (Design concepts).....	129
Les détails du modèle.....	130
Les résultats clés (Main results).....	130
Chapitre 3.Le Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS).....	131
3.1 Démarche générale.....	131
3.1.1 Observations de terrain.....	133
3.1.2 Synthèse des observations et classification.....	133

3.1.3	Élaboration du modèle conceptuel.....	134
3.1.4	Implémentation des modèles en système multi-agents.....	134
3.1.5	Analyse des simulations.....	135
3.2	Meta-modèle.....	135
3.2.1	La structure générale.....	136
	Modèle conceptuel (vue statique).....	136
	Activité des agents (vue dynamique).....	138
3.2.2	L'environnement de simulation.....	139
	Les réseaux théoriques aléatoires.....	140
	Le réseau rectiligne de Manhattan.....	141
	Des réseaux dessinés sur mesure.....	142
	Identifier des zones de forte et faible demande de mobilité.....	143
3.3	Modèles dynamiques.....	145
3.3.1	Un service fonctionnant sur des lignes régulières.....	145
3.3.2	Des services spontanés de véhicules en concurrence.....	147
3.3.3	Des véhicules en concurrence qui attendent les clients aux stations.....	150
3.3.4	Un service spontané de véhicules en coopération.....	153
3.3.5	Un service spontané avec une communication clients-véhicules.....	156
3.4	Interface de simulation.....	160
3.4.1	Paramètres initiaux de simulation.....	160
3.4.2	Les variables et les indicateurs.....	161
	Approche clients.....	161
	Approche opérateur.....	162
	Approche territoire.....	162
3.4.3	Observations et analyses des animations.....	162
	Conclusion partie 2 : les fondements méthodologiques.....	164

Partie 3.

Exploration et confrontation

	des systèmes de transport.....	167
	Chapitre 1.Exploration de l'espace des paramètres et sélection des modèles.....	171
	1.1 Problème posé.....	171
	1.1.1 Postulats.....	171
	1.1.2 Hypothèses.....	171
	1.1.3 Objectifs.....	172
	1.2 Méthodologie.....	172
	1.2.1 Protocole de simulation.....	172
	1.2.2 Grille d'analyse des résultats.....	176
	1.3 Résultats.....	181
	1.3.1 Comparaison des performances générales.....	181
	Performances observées sur le réseau aléatoire en convergence R1 (cf. illustration 67).....	181
	Performances observées sur le réseau aléatoire en point à point R2 (cf. illustration 68).....	182
	1.3.2 Typologie des modèles.....	183

Typologie observée sur le réseau en convergence R1 (cf. illustration 69).....	184
Typologie observée sur le réseau en point à point R2 (cf. illustration 70).....	185
1.3.3 Exploration de l'espace des paramètres.....	186
Vitesse de déplacement des véhicules (cf illustration 71).....	186
Capacité d'occupation des véhicules (cf illustration 78).....	188
Facteur entre le nombre de clients et de véhicule (cf illustration 81).....	190
1.4 Synthèse.....	191
1.4.1 Retour sur les hypothèses.....	191
1.4.2 Typologie des services.....	192
Chapitre 2. Analyses de variabilité et caractérisation des modèles.....	194
2.1 Variabilité des modèles.....	195
2.1.1 Problème posé.....	195
Postulat.....	195
Hypothèses.....	195
Objectifs.....	195
2.1.2 Méthodologie.....	195
2.1.3 Résultats.....	196
2.1.4 Synthèse.....	197
2.2 Influence des réseaux.....	198
2.2.1 Problème posé.....	198
Postulat.....	198
Hypothèses.....	199
Objectifs.....	199
2.2.2 Méthodologie.....	199
2.2.3 Résultats.....	203
Sensibilité des modèles.....	203
Classification des réseaux.....	205
2.2.4 Synthèse.....	207
2.3 Capacité de montée en charge.....	208
2.3.1 Problème posé.....	208
Hypothèses.....	208
Objectifs.....	208
2.3.2 Méthodologie.....	208
2.3.3 Résultats.....	209
Approche clients.....	209
Approche territoire.....	210
Approche opérateur.....	211
2.3.4 Synthèse.....	212
2.4 Caractéristiques détaillées des modèles.....	212
2.4.1 Comparaison des modèles.....	212
2.4.2 Présentation ODD.....	214
Modulobus.....	214
Cooperation.....	216
Clandos.....	217
Chapitre 3. Confrontation et complémentarité des systèmes.....	219

3.1 Problème posé.....	220
Hypothèses.....	220
Objectifs.....	221
3.2 Méthodologie.....	221
3.2.1 Protocole de simulation.....	221
3.2.2 Comparaison des modèles.....	224
3.3 Résultats.....	225
3.3.1 Modèle mixte Formel.....	225
Réponse aux clients.....	226
Compétition et complémentarité des opérateurs.....	226
Analyse spatiale.....	227
Synthèse.....	229
3.3.2 Modèle mixte Informel.....	229
Réponse aux clients.....	230
Compétition et complémentarité des opérateurs.....	231
Analyse spatiale.....	231
Synthèse.....	234
3.3.3 Modèle mixte Flexible.....	234
Réponse aux clients.....	234
Compétition et complémentarité des opérateurs.....	235
Analyse spatiale.....	236
Synthèse.....	238
3.3.4 Modèle mixte Régulier.....	239
Réponse aux clients.....	239
Compétition et complémentarité des opérateurs.....	240
Analyse spatiale.....	240
Synthèse.....	241
3.3.5 Modèle mixte France-Sénégal.....	241
Réponse aux clients.....	242
Compétition et complémentarité des opérateurs.....	243
Analyse spatiale.....	244
Synthèse.....	245
3.3.6 Modèle Hybride.....	245
Recherche des critères d'hybridation et de calibration du modèle.....	246
Réponse aux clients.....	249
Approche opérateur.....	250
Analyse spatiale.....	251
Synthèse.....	252
3.4 Synthèse.....	253
Compétition et complémentarité des modèles.....	253
Typologie des modèles composés.....	253
Conclusion partie 3 : comparaison de l'ensemble de modèles.....	257
Conclusion générale.....	259
Synthèse des résultats.....	261
Discussion et perspectives.....	263

Le Trans-Cultural Transport Simulator.....	263
Les modèles dynamiques.....	264
Les apports des SMA pour le développement des transports flexibles.....	266
Comprendre et expliquer le fonctionnement des transports artisanaux/informels....	266
Concevoir de nouveaux services innovants et optimisés.....	267
Références.....	269
Indexs.....	283
Annexes.....	291
Résumé / Abstract.....	301

Introduction

Contexte de recherche

Avec l'apparition de l'objectif de Développement Durable en 1987 (Brundtland 1987) et sa tentative d'application dans nos sociétés actuelles, tout investissement et tout aménagement doit aujourd'hui être « durable ». Le transport, préoccupation majeure pour toutes les sociétés, n'échappe pas à la règle. Aujourd'hui, un service de transport doit être économe et peu polluant, tout en maximisant l'efficacité de sa desserte et en réduisant les coûts de fonctionnement. L'automobile reste en forte contradiction avec ces principes, puisqu'elle coûte cher aux particuliers (essence, entretien), à la collectivité (construction et entretien des routes) et à l'environnement par sa forte consommation de ressources et ses rejets de gaz à effet de serre. Dans les pays en voie de développement, le problème se pose également, mais sous un angle différent. En effet, l'utilisation des modes de transport varie beaucoup selon les classes sociales. En moyenne les individus, par leurs déplacements, consomment moins de capital naturel que dans les pays développés (Joumard 2005). Il paraît difficile d'imposer l'économie des ressources, et la réduction des émissions de polluants dans ces pays qui essaient de se moderniser et de se développer, comme les pays du nord l'on fait il y a moins d'un siècle. Les priorités ne sont donc pas les mêmes, ce qui ne signifie pas que les principes du Développement Durable doivent être ignorés. Au contraire, l'enjeu est de permettre à ces pays de se développer et d'améliorer la qualité de vie de leurs populations, le plus rapidement possible, tout en préservant au mieux le capital naturel, en évitant certaines erreurs commises par les pays industrialisés.

Les enjeux de mobilité en France métropolitaine

Face aux problèmes énoncés ci-dessus, une réelle volonté de contrer la dépendance automobile est apparue dans les sociétés occidentales, même si pour l'instant les résultats sont peu convaincants. Cela s'explique par un certain nombre de paradoxes. Par exemple, malgré cette volonté de diminuer le trafic automobile, les collectivités continuent à investir des sommes considérables pour l'amélioration et la construction de routes permettant d'aller toujours plus loin et toujours plus vite avec le véhicule individuel. En France, des études réalisées par l'INSEE ont montré qu'en moyenne la distance mesurée à vol d'oiseau des déplacements a augmenté de 6% entre 1994 et 2008, alors que le temps quotidien moyen de déplacement a augmenté d'une minute seulement (Hubert 2009). Une autre étude montre qu'en milieu urbain, l'efficacité des réseaux routiers croît de manière exponentielle avec la distance parcourue (Genre-Grandpierre 2007). En d'autres termes, l'automobile est d'autant plus rentable que la distance à parcourir est grande. Ce principe est directement lié aux phénomènes de métró-polarisation et de périurbanisation : les individus peuvent ainsi travailler en centre-ville et résider dans des zones pavillonnaires situées en marge des villes. Dans les grandes agglomérations, on observe des pratiques de mobilité très différentes selon les zones géographiques (centre, banlieue, périphérie) (Bussière & Madre 2002). En région parisienne, par exemple, il est généralement très contraignant et très coûteux d'utiliser l'automobile quand on réside en centre-ville, alors que celle-ci est fortement appréciée pour les personnes qui résident en périphérie. « La voiture est de plus en plus utilisée en espace rural et faiblement urbanisé ». La motorisation s'y est accrue puisqu'en 2008 « 68 % des personnes appartiennent à un ménage comptant autant de voitures que de membres adultes, contre 54 % en 1994 » (Hubert 2009). Face à la dépendance automobile, les collectivités françaises encouragent l'utilisation de modes collectifs alternatifs. Ils sont variés : métró, tram, bus, minibus, etc. L'accent est de plus en plus porté sur l'intermodalité et les transports dits « propres » (Paul-Dubois-Taine 2010). En parallèle, des chercheurs et des industriels réfléchissent sur de nouvelles façons de se déplacer, remettant en question l'individualisation des

Introduction

déplacements et le faible prix des trajets, qui est rarement perçu à sa juste valeur par les individus. L'objectif est donc de proposer des modes de transport attractifs, efficaces et peu coûteux, permettant de réduire les flux de véhicules et de favoriser le regroupement des passagers. L'impact de cette efficacité se traduit également sur l'environnement par une moindre émission de gaz polluants.

La problématique des transports au Sénégal

Au Sénégal, les pratiques de mobilité sont sensiblement différentes. À Dakar, première ville du pays, les services de transport sont très nombreux et parfois difficilement contrôlables par les autorités publiques. Ils sont souvent considérés par la population comme peu efficaces et très contraignants, alors qu'ils arborent des niveaux de remplissage de véhicules enviés par les services de transport en France, où la logique du « tout automobile » défavorise leur usage. Les voyages se font parfois dans des conditions difficiles et l'offre ne satisfait pas la demande réelle de mobilité (Godard 2002)). Un deuxième phénomène important est l'augmentation constante du parc automobile. En 2008, « le service régional des transports terrestres immatriculait en moyenne 65 véhicules par jour » (ANSD 2008). D'après le ministère des transports, le Sénégal a atteint les 78 immatriculations par jour en 2012. Pourtant, les infrastructures ne sont pas toutes en bon état et les difficultés de se déplacer demeurent préoccupantes à Dakar et au Sénégal en général. La perpétuelle hausse des déplacements, et notamment ceux en automobile, entraîne des problèmes de congestion, d'accidents et de pollution. Non seulement le trafic est dense, mais en plus les véhicules sont, pour certains, en mauvais état et très polluants. Les enjeux en termes de transport sont donc multiples à Dakar. Il s'agit d'aménager la ville pour améliorer la cohabitation entre les piétons et les véhicules, d'entretenir et de moderniser les infrastructures liées au transport, de renouveler le parc de véhicules, etc. Un autre enjeu capital est aussi d'organiser les différents services de transport collectif, qu'ils soient publics ou artisanaux, pour un développement plus durable de la ville (Godard 2008b).

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux services de transports dakarois parce qu'ils présentent une très grande variété de modes de fonctionnement, de gestion et d'organisation. Dakar, capitale politique et économique du Sénégal, comptait 2 536 959 habitants en 2009 (ANSD 2010). Fondée sur une péninsule, la ville s'est développée dans une forme d'entonnoir (cf. Illustration 1). Inégalement répartie autour des trois pôles principaux que sont Dakar-ville (39,9 %), Pikine-Guédiawaye (47,5 %) et Rufisque-Bargny (12,6 %), la population en forte croissance dans les quartiers périphériques subit la carence d'une offre de transport insuffisante (ANSD 2008). Avec une concentration historique de plus de 85 % des industries et de la quasi-totalité des services administratifs et financiers à Dakar Plateau (Diakaté 2007), des dizaines de milliers de personnes convergent quotidiennement vers le centre de Dakar, à bord de toutes sortes de moyens de transport. Il faut savoir que la plupart des villes et banlieues satellites plus récentes de Dakar sont à 30 kilomètres (ou plus) du centre de la ville. Ces déplacements créent une surcharge des voies de communication et, en certains endroits, des embouteillages inextricables. Aujourd'hui, on assiste à une volonté politique de décharger le centre des activités et de donner à Dakar une organisation davantage multipolaire. La construction du nouvel aéroport international Blaise Diagne à 30 km de Dakar Plateau (APIX 2007) montre bien cette volonté de désengorger la capitale et de favoriser l'émergence d'un pôle économique à l'extérieur de Dakar (cf. Illustration 1).

Introduction



Illustration 1: Plan de la région de Dakar

L'évolution morphologique des trajets et l'accroissement de l'emprise spatiale des transports ont permis « de révéler l'importance de la desserte de nouvelles zones, ainsi que l'existence de flux importants dont les extrémités ne concernaient pas le Plateau » (Diop 2002). On observe par exemple des flux massifs quotidiens sur la route de l'aéroport (axe ouest-est), assurés en grande partie par le secteur informel¹. Aussi, le tracé des lignes des récents minibus de l'AFTU² témoigne bien de cette organisation de plus en plus multipolaire. Pour améliorer la mobilité à Dakar, l'État sénégalais a commencé à restructurer le secteur en créant, en mars 1997, un organe de coordination des transports urbains : le Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD) (Godard 2002). Cependant, après une décennie, l'existence des voyages pendulaires de masse, généralement réalisés dans des conditions difficiles, et l'importance qu'occupe la marche à pied dans le volume des déplacements (71%) (Trans-Africa 2009), révèlent la faible adéquation de l'offre de transport à la demande de mobilité, tant du point de vue quantitatif, que qualitatif.

Des transports flexibles pour faire face à ces contraintes sociétales

Un transport flexible est un service capable de s'adapter continuellement à une demande de mobilité variable (Castex 2007). Comme nous le verrons, depuis une quinzaine d'année le Transport A la demande (TAD) s'est affirmé en France comme le premier transport public collectif flexible. Au Sénégal, nous montrerons que la flexibilité est une propriété intrinsèque de plusieurs services de transport. L'illustration 2, issue de la thèse d'Élodie Castex, présente les

1 Services échappant au contrôle des autorités (cf. Partie 1 Chapitre 1.3)

2 L'Association de Financement des professionnels du Transport Urbain a pour but d'aider la reconversion des cars rapides en des services de mini-bus privés (organisé en GIE), mais formels.

Introduction

différents critères de flexibilité d'un système de transport flexible, qui lui ont permis de comparer plusieurs formes de TAD.

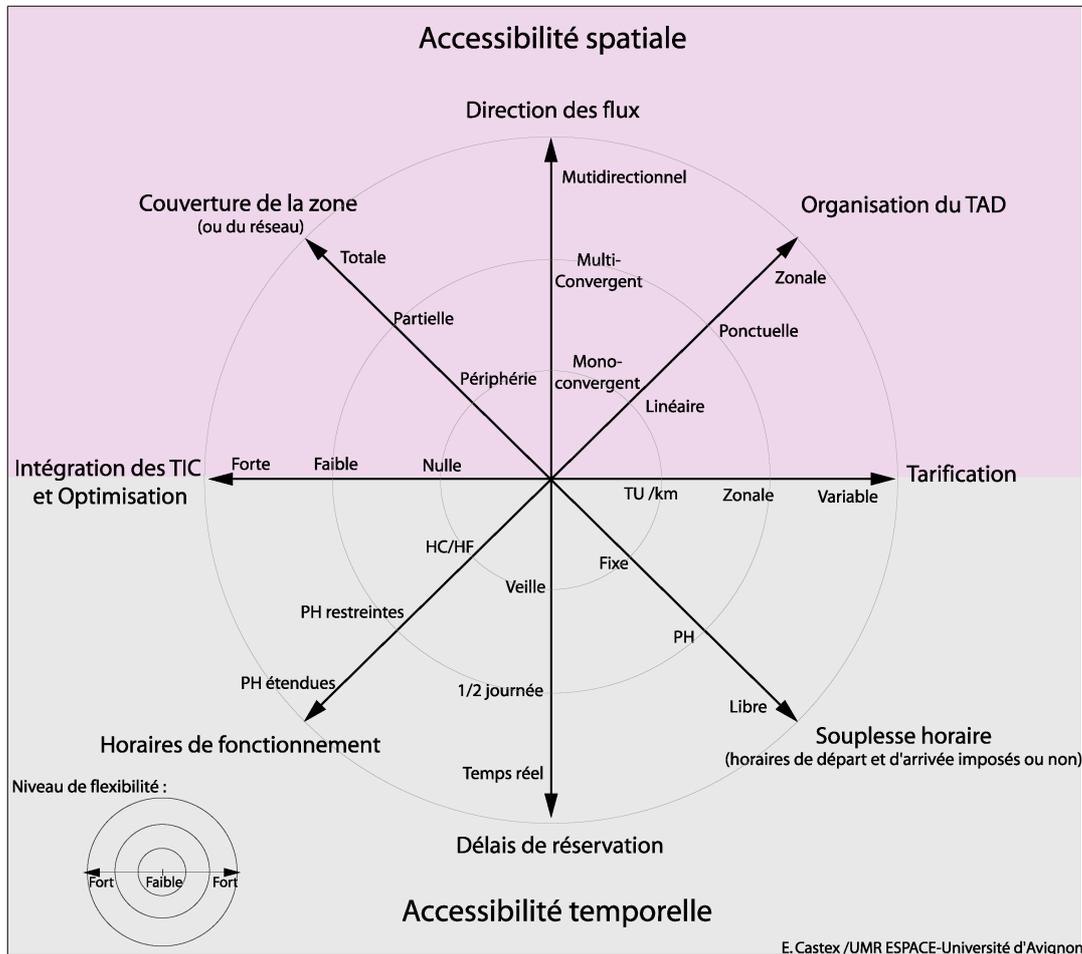


Illustration 2 : critères et niveaux de flexibilité des services de transport (Castex 2007).

Pour s'adapter aux besoins des clients, un service flexible doit être capable de faire varier ses tournées et ses horaires. En d'autres termes, les trajets ne sont pas préalablement définis, mais bien créés ou adaptés en fonction de la demande des clients. Du point de vue de la variabilité temporelle, le service peut être déployé pour répondre à un besoin précis et limité dans le temps, ou peut être réalisé à la minute près par des taxis qui définissent leurs tournées en fonction des réservations. La flexibilité peut aussi être abordée sous l'angle tarifaire comme c'est très souvent le cas dans les pays en voie de développement. Cela se traduit généralement par une négociation, suivie d'un compromis entre le prestataire et le client. Cette approche n'existe que rarement dans les pays développés, où elle a été parfois remplacée par la variabilité des modes tarifaires. Par exemple, des expériences de transport flexible existent en Europe et prônent la variabilité du prix en fonction de la distance, de la qualité de service, voire des configurations de l'itinéraire (Josselin & Genre-Grandpierre 2005). Un service de transport flexible doit donc constamment s'adapter à (a) une demande de mobilité plus ou moins organisée, mais variable dans le temps, (b) à une configuration spatiale fixe et structurante, (c) en fonction des moyens technologiques et

Introduction

financiers des clients et du gestionnaire. (d) L'organisation du service, prenant en compte impérativement ces trois contraintes, peut quant à elle être structurée par un organisme de haut niveau (Autorité Organisatrice de Transport (AOT), collectivité, État) comme c'est généralement le cas en France, ou être auto-organisée à l'échelle des acteurs comme c'est le cas dans les transports artisanaux sénégalais que nous allons étudier (cf. Illustration 3).

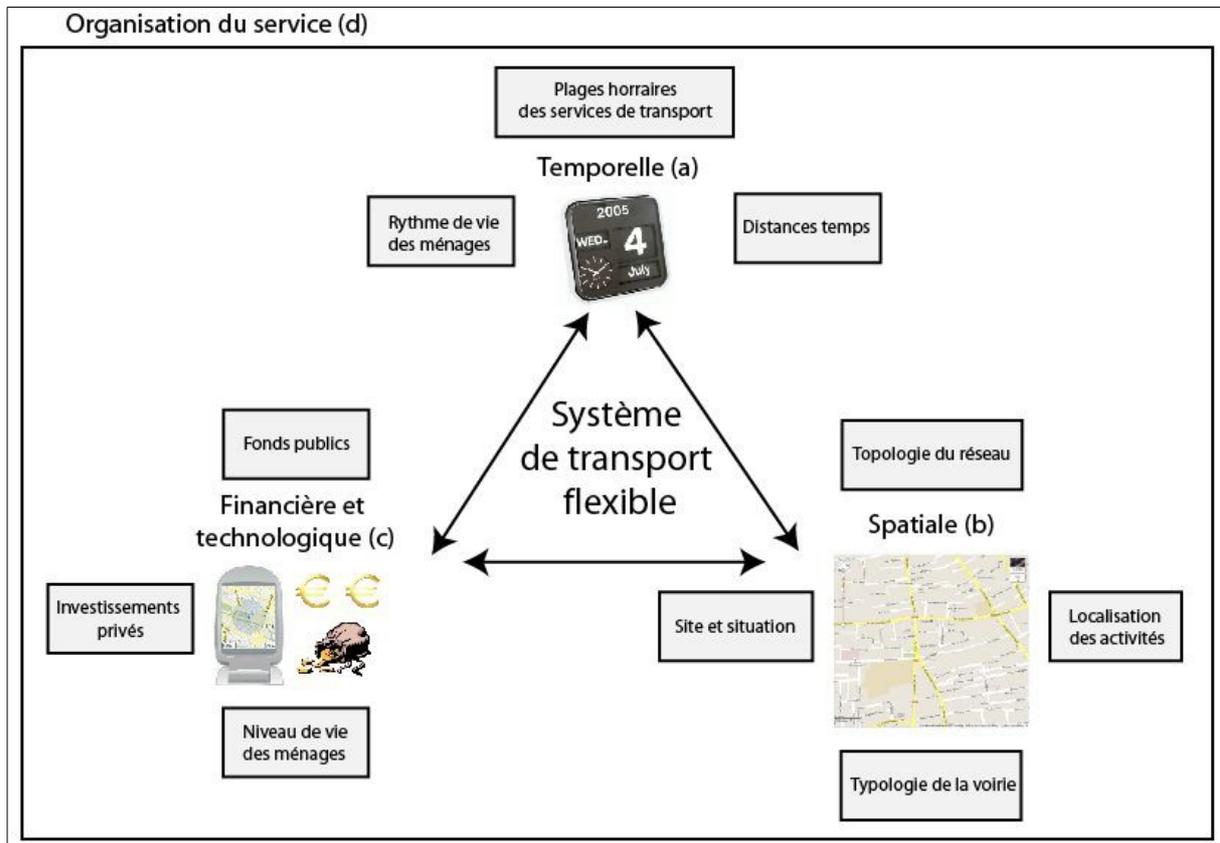


Illustration 3: Les trois contraintes d'un système de transport flexible

Problème posé

Cette recherche s'interroge sur le fonctionnement et le rôle à jouer des transports flexibles dans les sociétés actuelles, en les comparant dans un contexte de pays développé (la France) et de pays en voie de développement (le Sénégal).

Des travaux ont permis de fournir des connaissances sur les transports informels et artisanaux de Dakar (Godard 2002; FIDECO 2008; Kumar & Diou 2010). Cependant, les documents sont bien souvent des bilans d'étude, des expertises ou des diagnostics, c'est-à-dire des analyses issues d'enquêtes. Ils traitent généralement de la mobilité au sens large, prenant en compte à la fois les besoins, la satisfaction des populations, ainsi que les résultats d'exploitation des opérateurs quand ils sont accessibles. Ici, nous ne prétendons pas établir un diagnostic complet du transport dakarois. L'intérêt de la recherche se situe dans la modélisation des principes de fonctionnement des systèmes. Autrement dit, nous cherchons à comprendre comment les acteurs organisent leur

Introduction

service et à modéliser leur comportement. Il est, en effet, assez rare de trouver une information complète et explicite sur les choix organisationnels des acteurs des transports. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas de modélisation de ces systèmes et encore moins de logiciel de simulation permettant d'explorer leur fonctionnement sur un espace donné.

Concernant le contexte français, notre position est un peu différente. Les services considérés étant très encadrés par la législation et planifiés par une Autorité Organisatrice de Transport, leurs principes de fonctionnement sont relativement bien connus. De plus, nous profitons d'une certaine expérience puisque nous avons suivi le processus de mise en place de plusieurs transports à la demande aujourd'hui opérationnels. En revanche, les services de transport flexibles français étant récents et jusqu'à présent relativement peu utilisés, il n'est pas aisé de connaître les apports véritables de ce type de service, notamment vis à vis des modes plus réguliers qui constituent l'essentielle de l'offre de transport actuelle. Ce sont ces éléments que nous souhaitons étudier par l'intermédiaire de nos modèles et de leurs simulations.

Questions

Notre travail s'articule autour de trois questions générales. La première, davantage thématique, concerne la caractérisation des transports observés en France et au Sénégal. Nous nous intéressons particulièrement au fonctionnement des systèmes en révélant les différents niveaux de flexibilité.

Q.1. :Quels sont les différents niveaux de flexibilité caractérisant l'offre française et sénégalaise ?

Une seconde question concerne la mise en place d'une méthodologie comprenant à la fois la modélisation multi-agents des services, l'exploration des modèles et la confrontation des systèmes.

Q.2. Quels apports de la modélisation à base d'agents pour l'étude de systèmes de transport flexible ?

Enfin, la dernière question nous amène à analyser l'importance du comportement des différents acteurs, sur le fonctionnement général d'un système de transport. Pour cela nous simulons et nous comparons des systèmes de transports faisant intervenir des individus capables d'inter-agir, d'échanger de l'information, voire même de coopérer.

Q.3. Quel rôle jouent les différents comportements individuels dans le fonctionnement d'un système de transport ?

Objectifs

Pour répondre à ces questions, nous nous sommes fixés dix objectifs à atteindre. Nous les regroupons ici en deux catégories.

Introduction

Les objectifs thématiques :

1. définir tous les termes généraux permettant de caractériser et de comparer les services de transport, qu'ils soient issue d'un pays industrialisé ou en voie de développement ;
2. proposer un état de l'art sur les différents systèmes de transport existant en France et au Sénégal ;
3. analyser les transports artisanaux pour comprendre leur mode de fonctionnement et évaluer leur part de flexibilité ;
4. expliquer le principe du Transport A la Demande que nous considérons comme le seul véritable transport collectif flexible en France ;
5. fournir une classification des services observés selon leur niveau de flexibilité.

Les objectifs méthodologiques :

6. mettre en place une démarche générale permettant de modéliser le fonctionnement de services de transport à partir de comportements et de procédés observés sur le terrain ;
7. développer plusieurs modèles, chacun d'entre eux faisant référence à un principe de fonctionnement et à un niveau de flexibilité ;
8. grâce à des simulations exécutées à partir du logiciel NetLogo³ (Tisue & Wilensky 2004), explorer, expliquer et comparer le fonctionnement des modèles ;
9. combiner et confronter les modèles entre eux pour évaluer leur potentiel de complémentarité ;
10. évaluer les apports de la modélisation multi-agents pour comprendre et analyser les services informels et les systèmes de transport dynamique.

Positionnement et enjeux scientifiques

A travers la question centrale de l'étude du transport flexible en France et au Sénégal, notre thèse pose trois enjeux scientifiques clés.

D'une part, nous ne considérons pas le contexte sénégalais comme un terrain d'action et nous n'avons pas la prétention d'établir un diagnostic des services de transport dakarois, ni de trouver des solutions d'aménagement et d'organisation du système. Les institutions des pays développés menant des programmes d'action en Afrique visent à apporter une expertise et un savoir faire européen pour résoudre les problématiques complexes auxquelles sont confrontés les décideurs africains. Dès les premiers prémices de la thèse, nous avons fait l'hypothèse que non seulement il n'était pas judicieux de transposer des solutions de transport françaises modernes (e.g. les bus à haut niveau de service, les TAD) au Sénégal. Au contraire, les pays développés avaient tout intérêt à comprendre, voire à s'inspirer du savoir faire africain en matière d'artisanat, de flexibilité, d'auto-organisation, etc. Les africains ne seraient-ils pas les inventeurs des transports à la demande ? Cette hypothèse constitue en réalité le point de départ de cette thèse.

3 <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

Introduction

Le second enjeu consiste à évaluer quels peuvent être les apports des services flexibles, notamment les plus dynamiques, sur l'efficacité des systèmes de transport. Que ce soit des services fonctionnels ou des services en état de prototype, nous ne disposons aujourd'hui que de peu d'informations quant à leur fonctionnement. Il est donc difficile d'évaluer leur impact sur un système de mobilité. Notre travail n'a pas d'ambition prospective, néanmoins nous pensons qu'il est intéressant d'appréhender, en se détachant des contextes sociétaux, la complémentarité et les apports des systèmes particulièrement souples sur le fonctionnement et l'efficacité de l'offre de transport.

Enfin, le troisième enjeu scientifique est de fournir un outil de simulation dédié à l'analyse de services flexibles dans des contextes socioculturels variés. Il n'existe à notre connaissance aucun outil répondant à ce besoin. Notre souhait est donc de proposer un outil de simulation modulaire, i.e. avec un choix de modèles à simuler et à combiner, chacun d'entre eux représentant un mode de fonctionnement observé. L'outil a été développé dans un logiciel distribué gratuitement. Il se veut intuitif et accessible par tout type d'utilisateur.

Organisation du mémoire

Ce rapport est organisé en trois parties. Nous traitons d'abord des questions thématiques pour ensuite aborder les réflexions méthodologiques et répondre à la problématique générale (cf. illustration 4).

Dans une première partie, nous proposons d'abord de définir tous les termes qui seront utilisés pour caractériser les services de transport, qu'ils soient observés ou modélisés. Nous proposons ensuite un état de l'art des services français et sénégalais, en les classifiant selon leur niveau de flexibilité. L'objectif de cette première partie est de présenter tous les services étudiés et de justifier ceux particulièrement analysés dans les simulations.

Dans une seconde partie, nous exposons tous les éléments paradigmatiques, théoriques et méthodologiques sur lesquels s'appuie la thèse. Un second état de l'art a pour but d'exposer nos choix méthodologiques en matière de modélisation et de simulation. Nous présentons ensuite, de manière détaillée, l'outil de simulation qui se situe au cœur de la thèse. Nous expliquons d'abord la méthodologie générale qui nous a permis de transcrire les connaissances de terrain en modèle multi-agents. Nous expliquons ensuite la structure du méta-modèle, nommé le Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS), nous détaillons le fonctionnement des services de transport modélisés, puis les différentes fonctionnalités du simulateur, qui vont nous permettre d'analyser les simulations en profondeur.

Enfin, dans une troisième partie nous exploitons tout un ensemble de simulations à l'aide de traitements statistiques et graphiques. Nous commençons par analyser séparément tous les modèles et à établir une première comparaison. En fonction de ces premiers résultats, nous sélectionnons plusieurs modèles que nous explorons et dont nous analysons leur variabilité pour des paramètres clés, dans le but de les typer. Enfin, nous proposons de combiner certains modèles et de mettre en confrontation leur fonctionnement et leur efficacité. Cela nous permet de conclure sur le potentiel de complémentarité des systèmes de transport étudiés.

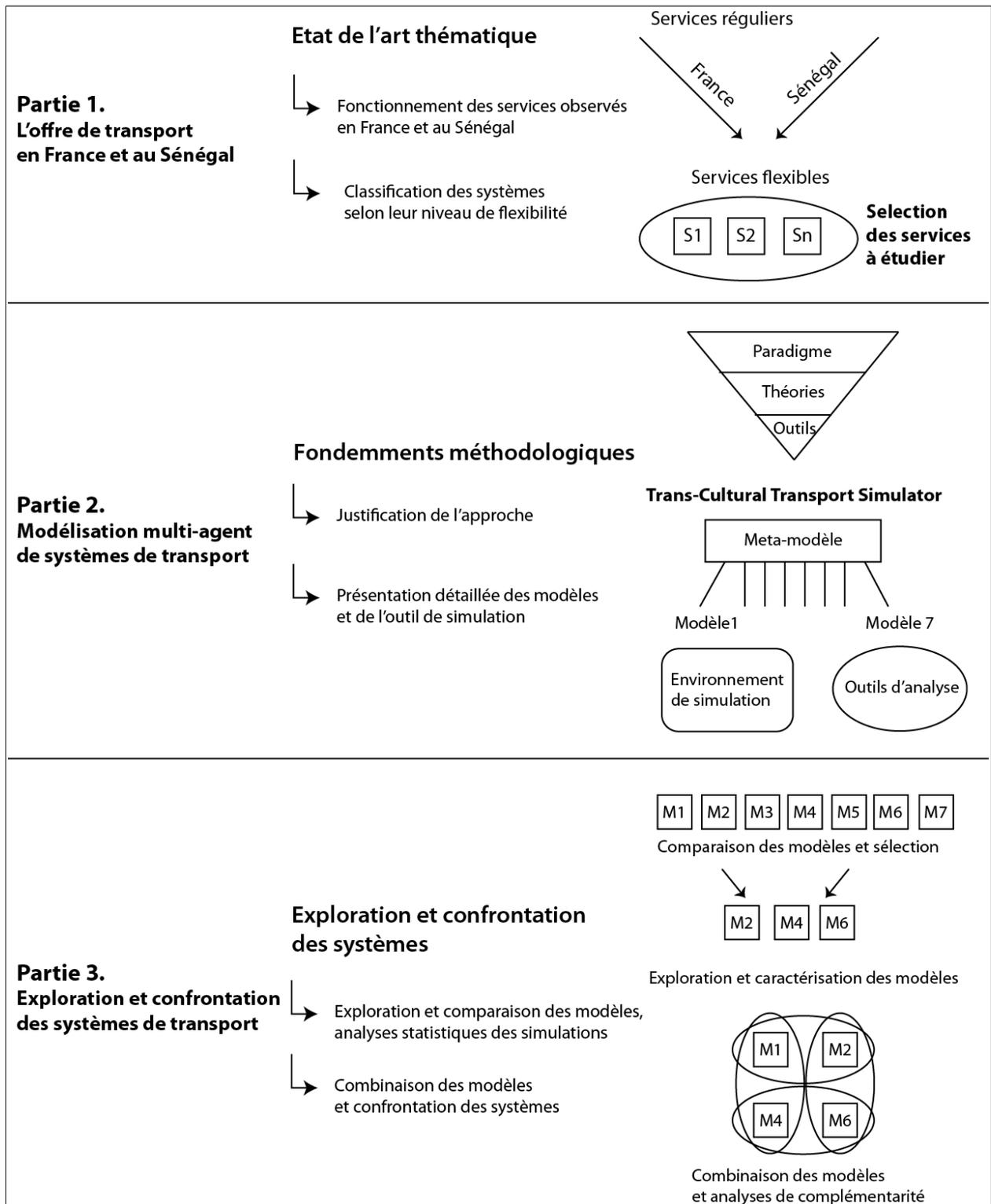


Illustration 4 : grille de lecture générale du mémoire.

Partie 1.
L'offre de transport
en France et au Sénégal

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

Cette première partie offre un état de l'art de l'offre de transport en France et au Sénégal. Pour plus de clarté, nous définissons, en premier lieu, toutes les notions qui seront utilisées pour caractériser les différents systèmes. Nous exposons ensuite une variété de services français et sénégalais en mettant toujours en exergue leur principe de fonctionnement et leur mode opératoire. L'objectif ici n'est pas tant de fournir un diagnostic exhaustif des systèmes de mobilité français et sénégalais, mais plutôt d'introduire et de spécifier les services sur lesquels nous nous sommes basés pour conceptualiser nos modèles. Nous concluons ainsi en établissant une classification et une justification des services de transport qui ont été intégrés aux simulations et qui vont donc être particulièrement étudiés tout au long de ce rapport.

Pour analyser les services sénégalais, nous nous sommes basés sur un ensemble de documents réalisés pour le compte du Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD). Nous avons pu compléter ces informations grâce à nos observations sur le terrain et grâce à une série d'entretiens réalisées au cours de notre mission de trois mois à Dakar. Un exemple d'entretien avec un chauffeur de taxi « clandos » est disponible en annexe 1. Durant cette période, nous nous sommes focalisés sur les services informels artisanaux qui nous ont semblé être les plus intéressants pour cette recherche. Il n'est pas aisé d'analyser le fonctionnement des systèmes informels des pays en voie de développement, car les données ne sont pas toujours disponibles. Les opérateurs souvent très fragiles financièrement, et les autorités ayant des moyens limités, il est généralement difficile de financer la réalisation d'enquêtes et de constituer des bases de données précises. Pourtant, le Sénégal est un des pays africains les plus avancés dans le domaine.

Concernant les transports français, les informations sont, pour la plupart, tirées de la littérature et plus particulièrement de rapports officiels sur la planification du transport urbain. Pour les services de transport publics français, nous nous sommes notamment basés sur les rapports du Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publics (CERTU) qui réalise des études pour le compte de l'État ou au bénéfice des collectivités locales.

Sommaire partie 1

Chapitre 1.Définitions.....	33
Chapitre 2.Les services réguliers ou peu flexibles.....	42
Chapitre 3.Les services flexibles semi-collectifs.....	62
Chapitre 4.Le transport public individuel.....	80
Conclusion partie 1 : les services flexibles sélectionnés.....	92

Chapitre 1. Définitions

Il est indispensable de définir en amont les termes qui seront utilisés tout au long du rapport pour caractériser les services. Ces termes et leur emploi variant parfois selon le contexte, nous proposons ici des définitions générales que nous précisons ensuite selon les deux cas d'étude.

1.1 Transport collectif, semi-collectif et individuel

En France, le transport en commun urbain est assuré en grande majorité par les services collectifs (i). Les systèmes considérés sont les autobus (mode le plus répandu si l'on raisonne en nombre de lignes) ; le métro ; et les tramways, qui connaissent un regain d'intérêt depuis les années 1980 (CERTU 2004). Au Sénégal, l'offre est principalement composée de services semi-collectifs (ii) avec les différents types de minibus et les taxis collectifs. Dans une moindre mesure, certains déplacements sont assurés par le transport individuel (iii). En France ou au Sénégal, ce sont principalement les services de taxis qui répondent à cette demande. Nous proposons ici une classification selon le matériel roulant (et non selon l'infrastructure), puis nous abordons le fonctionnement de ces systèmes dans les chapitres suivants.

Les modes de transport collectifs (i), également nommés transports de masse, rassemblent tous les services avec des véhicules de grande capacité, c'est-à-dire capables de transporter entre 40 et 50 clients ou plus, sur un même itinéraire (CERTU 2004). En France, les modes de transports collectifs sont variés puisqu'on y trouve les services d'autobus standards et articulés sur voirie, les autobus en site propre (Bus à Haut Niveau de Service), les tramways et les métro qu'ils soient automatiques ou non (Marcadon et al. 1997; Bavoux et al. 2005). Au Sénégal, la majeure partie des déplacements se fait en minibus. Seul le service de bus Dakar Dem Dikk fonctionne avec des véhicules de grande capacité (GMAT 2007).

Le transport semi-collectif (ii) est beaucoup moins présent en France, même si depuis quelques années on voit de plus en plus de minibus circuler dans nos villes. Ces services ont généralement pour objectif de mutualiser les déplacements dans des secteurs où la demande de mobilité est relativement faible. Les véhicules peuvent être des minibus de 20 à 40 places (certains sont maintenant électriques), des fourgons d'une dizaine de places, ou de simples voitures de 5 à 7 places assises. Le potentiel de clients de ces zones urbaines étant variable, le remplissage des véhicules est lui aussi très variable et l'utilisation des minibus permet de limiter les coûts globaux (notamment lorsque le taux de remplissage est faible). Parmi ces services, les Transports À la Demande (TAD) se sont largement développés au cours de ces 15 dernières années dans les villes françaises. Il existe aussi toutes sortes de navettes urbaines qui desservent les parkings en périphérie de ville, les stations de tramways, les gares, les aéroports, etc. De plus, nous observons des services privés qui sont généralement réservés à une certaine catégorie de population (ex. : transport de personnel d'entreprise).

À Dakar, la très grande majorité des services sont semi-collectifs, c'est-à-dire que le nombre de passagers prévu ne dépasse pas 40 personnes. Dans la pratique, le chargement est parfois supérieur à cause du non-respect des règles et de la saturation de l'offre. Les transports semi-collectifs correspondent aux services de minibus avec une capacité comprise entre 25 et 35 clients, mais aussi aux taxis clandestins et aux taxis légaux qui pratiquent le taxi collectif et

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

accueillent jusqu'à 7 personnes à bord selon les voitures. Ces services permettent une bonne rentabilité pour l'opérateur et un prix relativement bas pour le client.

Enfin, le transport individuel (iii) concerne tous les services fonctionnant avec un seul client par course. Un client ne signifie pas forcément une seule personne à bord puisque lorsque nous prenons un taxi, nous pouvons le prendre à plusieurs, avec en général un maximum de 4 à 7 places disponibles. Néanmoins, le véhicule réalise une seule course, il ne prend pas d'autres clients en cours de route. Le prix demandé est généralement calculé en fonction de la course, quel que soit le nombre de personnes transportées. A noter que ce principe est également valable pour le transport public français. Les services individuels français concernent principalement les taxis, sous toutes leurs formes, hors taxis collectifs ou taxis illégaux. Ce sont pour la plupart des services privés comme nous allons le voir ci-après.

1.2 La notion de public et de privé

Le terme « transport public » est plutôt commun en France. Nous parlons très fréquemment de transport public et de service public de transport sans vraiment faire de distinction. Cela n'est pas étonnant dans la mesure où la quasi-totalité du transport public est financée et organisée par les pouvoirs publics, contrairement aux pays en développement, où le service public de transport est limité. La notion de transport public ne se confond pas avec celle de service public de transport : les transports ouverts à tout public ne sont pas forcément tous organisés par des autorités publiques. Certains peuvent être de nature privée, comme c'est le cas pour la plupart des services sénégalais. Selon l'article L. 1000-3 du code des transports, le transport public en France rassemble « tous les services de transports de personnes ou de marchandises, à l'exception des transports qu'organisent pour leur propre compte, des personnes publiques ou privées » (Ministère du Développement durable 2012).

« Le transport public relève d'une activité professionnelle de prestation de transport pour compte d'autrui. Le transport public routier de personnes comprend (articles 25, 26 et 32 du décret n° 85-891 du 16 août 1985) :

- les services publics réguliers de transport routier de personnes qui sont des services offerts à la place dont le ou les itinéraires, les points d'arrêt, les fréquences, les horaires et les tarifs sont fixés et publiés à l'avance ;
- les services publics à la demande qui sont des services collectifs offerts à la place, déterminés en partie en fonction de la demande des usagers et dont les règles générales de tarification sont établies à l'avance et qui sont exécutés avec des véhicules dont la capacité minimale est fixée par décret ;
- les services occasionnels, c'est-à-dire soit les circuits à la place, dont chaque place est vendue séparément et qui ramènent, sauf dispositions particulières, les voyageurs à leur point de départ, soit les services collectifs qui comportent la mise d'un véhicule à la disposition exclusive d'un groupe ou de plusieurs groupes d'au moins dix personnes. Ces services occasionnels ne peuvent être exécutés que par les entreprises inscrites au registre des entreprises de transport public de personnes » (CERTU 2006).

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

En France le service public de transport a deux objectifs majeurs :

- répondre aux besoins de mobilité des populations que ce soit en milieu urbain, périurbain et rural, avec une certaine qualité de service (confort, sécurité, pollution), et pour des coûts raisonnables ;
- contrer la dépendance automobile en proposant des modes de déplacement efficaces et alternatifs à la voiture particulière. La volonté étant bien sûr de mutualiser les déplacements, autrement dit de réduire les flux urbains et limiter les nuisances (congestions, pollution, accidents, etc.).

La Loi n° 82-1153 d'orientation des transports intérieurs (LOTI) est la loi fondamentale qui régit l'organisation du transport public en France. Elle a été publiée dans sa version initiale le 30 décembre 1982. La version en vigueur au moment de la rédaction de ce mémoire est la version consolidée du 1^{er} janvier 2013. La LOTI clarifie les relations entre autorités organisatrices et opérateurs en imposant la passation d'un contrat entre les deux parties (Legifrance 2013). La loi SRU du 13 décembre 2004 encourage aussi l'intégration de la réflexion sur les transports dans une stratégie d'ensemble pour le fonctionnement des agglomérations urbaines, et encourage les rapprochements institutionnels entre les Autorités Organisatrices de Transport (AOT). Il est expliqué dans la LOTI que « le plan de déplacements urbains (PDU) définit les principes de l'organisation des transports de personnes et de marchandises, de la circulation et du stationnement, dans le périmètre de transports urbains ». Le périmètre de transports urbains correspond au territoire d'une commune, ou à l'étendue territoriale d'un établissement public ayant reçu comme mission d'organiser le transport public de personnes.

La distinction entre transport public ou privé repose donc sur le fait que le service est organisé par une personne pour le compte d'autrui (transport public) ou pour son propre compte (transport privé). Aussi, comme pour le transport public et les services publics de transport, il ne faut pas confondre transport privé et service privé de transport. Le transport privé ne relève pas d'une profession : il constitue une activité. Ce sont, par exemple, toutes les personnes qui se déplacent chaque jour avec leur voiture particulière pour aller au travail, ou des parents qui emmènent leurs enfants à l'école, etc. Ils sont libres, sous réserve du respect de la police générale, de l'ordre public, de la sécurité et bien entendu du Code de la route. Selon l'article 2 du décret n° 87-242 du 7 avril 1987, le transport privé concerne aussi les moyens de transport organisés par les collectivités publiques, les entreprises et les associations pour les besoins normaux de leur fonctionnement, notamment pour le personnel et leur membre (excluant les déplacements de nature touristique). Le transport doit être effectué à titre gratuit, avec des véhicules appartenant ou loué par l'organisateur, et servir au bon fonctionnement de l'établissement qui l'organise (Legifrance 2013).

Les services privés de transport destinés au public sont relativement peu développés en France, en comparaison aux pays africains. Cela s'explique, entre autres, par la très forte réglementation du secteur. En dehors des possibilités de délégation de service (cf. Partie 1 Chapitre 4.1), la LOTI empêche toute forme de concurrence avec les services publics de transport, ce qui laisse très peu de marge de manœuvres pour les opérateurs privés. En France, les services privés de transport les plus connus sont les taxis. Ce sont des sociétés individuelles (quelques personnes) qui souvent se regroupent en association ou en groupement d'intérêts économiques (GIE) pour être plus compétitifs et mieux s'intégrer à l'offre de transport globale.

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

Encore aujourd'hui, certaines sociétés essayent, avec beaucoup de difficultés, de se frayer un chemin dans le secteur des transports. Par exemple, le service *low-cost* de la société Easy Take, dans le sud de la France, ont été confrontés à une série de procès pour concurrence déloyale envers les taxis, jusqu'à la liquidation de l'entreprise (Fauvet 2012; Lucas 2012). Le principe était d'offrir un service à la personne, sur réservation et à moindre prix. Pour avoir un ordre d'idée, il était possible de se déplacer à Avignon pour moins de 5€. Ce faible coût était compensé par un affichage publicitaire important à la fois sur les véhicules et dans l'habitacle (avec des écrans vidéo). Ce service indépendant a rapidement pris de l'ampleur, notamment pour la desserte de la gare de TGV qui est relativement excentrée à Avignon et qui constitue un lieu de desserte très prisé par les taxis. Il œuvrait aussi à la sortie des boîtes de nuit et réalisait des bons taux de remplissages des véhicules.

1.3 Secteur formel et informel

Au Sénégal, la réglementation et le fonctionnement des transports sont sensiblement différents. Nous ne parlons pas vraiment de services publics de transport dans la mesure où les services publics, tels que nous les observons en France, n'existent pas au Sénégal. Cela s'explique par leurs coûts de fonctionnement importants et par les difficultés de gestion qu'ils entraînent. La grande majorité du transport public à Dakar est gérée par des opérateurs privés. Seule la société de bus Dakar Dem Dikk bénéficie d'un fonctionnement mixte (privé-public). Cette notion de service public n'étant pas adaptée au contexte sénégalais, nous qualifions les services de formels ou d'informels.

D'après la définition du dictionnaire, un transport formel est un service « dont la forme est déterminée » (Robert & Rey 2001), c'est-à-dire dont le fonctionnement est parfaitement défini, délimité, maîtrisé par les autorités organisatrices de transport. Dans la pratique, cette définition est à nuancer, car le contrôle est rarement absolu et il arrive parfois que des transporteurs du secteur formel adoptent des comportements dis informels, c'est-à-dire qui dépassent le cadre réglementaire (modification imprévue d'itinéraire, surcharge des véhicules, etc.). Néanmoins, nous pouvons considérer comme service de transport formel tout service officiellement autorisés (disposant d'une licence) et fonctionnant globalement selon les accords fixés avec les pouvoirs publics. Les opérateurs du secteur formel à Dakar sont la compagnie d'autobus, Dakar Dem Dikk (DDD), les récents minibus de l'Association de Financement des Professionnels du Transport Urbain De Dakar (AFTU), qui ont pour objectif de remplacer les anciens minibus du secteur informel, la compagnie du Petit Train de Banlieue, complétés par les opérateurs autorisés de taxi (légalement enregistrés) (DTT 2007).

Pour comprendre les spécificités du secteur des transports à Dakar il nous semble nécessaire de faire une rapide rétrospective sur l'évolution du cadre institutionnel et de préciser les réglementations en vigueur :

« Dès son accession à l'indépendance, le Sénégal s'est doté d'instances et d'outils chargés d'organiser et encadrer les transports terrestres. Ainsi sont nés dès le début des années 1960 diverses commissions consultatives, un code de la route et une réglementation portant sur les transports routiers publics et privés de marchandises et de voyageurs. Jusqu'au milieu des années 80, les transports

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

routiers en général et le sous-secteur du transport urbain en particulier semblent avoir fait l'objet d'une réglementation abondante, mais sans cohérence apparente en termes d'intégration. Durant les années 80 est apparue la nécessité d'une réforme en profondeur des transports urbains résultant notamment de l'inadéquation du cadre institutionnel et réglementaire. La composante institutionnelle de cette réforme initiée en 1992 et le renforcement des capacités sont à l'origine de la création du Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD) en 1997 et de la révision de l'organisation et des attributions des services en place. Un nouveau cadre d'action et de concertation de tous les acteurs intéressés, tant publics que privés, a été concrétisé notamment par la Politique du sous-secteur des transports urbains, la Politique de Sécurité routière, la Charte de la mobilité urbaine et l'adoption d'une loi définissant l'orientation générale et de développement du secteur (2003). Bien que cette réforme du cadre institutionnel et réglementaire ait influé positivement sur la mobilité urbaine, force est de constater que certains objectifs n'ont pas à ce jour été atteints et que de nouveaux dysfonctionnements sont apparus » (GMAT 2007)

Aujourd'hui, les licences de véhicule et les agréments de transport sont délivrés par le Ministère des Transports du Sénégal. Les prix sont officiellement déterminés par le Ministère des Finances. La planification et la coordination du secteur sont assurées par le Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar. Le CETUD est un conseil autonome sous tutelle du Ministère des Transports. « Il regroupe au sein de son organe de décisions et de délibérations des représentants de l'État, des collectivités locales (2/3 au total) et du secteur privé, notamment les professionnels du secteur (1/3) » (Bertholet 2004). « Ses opérations sont financées par le Fond de Développement des Transports Urbains [...] Il peut conclure des accords de concession avec les opérateurs autorisés, assigner des itinéraires et peut proposer les limites d'un accord de compensation avec les opérateurs si les prix officiels ne couvrent pas le coût » (IBIS 2008). Le CETUD joue donc le rôle d'autorité de régulation de la mobilité urbaine à Dakar. Il est le seul organe de cette envergure au Sénégal pour la planification des transports urbains. Ainsi, même si sa mission est centrée sur la région de Dakar, son expérience se veut profitable à l'échelle du pays. Il agit aussi en tant que réceptacle pour l'aide internationale (Diagne & Stucki 2012).

Malgré tous ces efforts, le déclin de l'ancienne Société de TRANsport en Commun (la SOTRAC) à la fin des années 90 a entraîné un fort développement du secteur informel. Lors du recensement de 1997, on estimait que le secteur informel couvrait entre 70 % et 80 % des déplacements à Dakar (IBIS 2008). La majorité de la population voyageait à bord de minibus Renault et Mercedes, appelés communément « cars rapides » (cf. illustration 5) et « Ndiaga Ndiaye ». Beaucoup de ces véhicules circulent encore aujourd'hui. Ils sont très vieux et souvent vétustés. Leur circulation pose de nombreux problèmes de congestion, de sécurité, et de pollution. Une autre composante du secteur informel à Dakar concerne les taxis collectifs. Ils fonctionnent pour la plupart en toute illégalité, c'est pourquoi nous les nommons communément les taxis « clandos » (cf. illustration 5). Des initiatives ont été prises par les autorités pour limiter leur circulation en banlieue, mais ces taxis sont aujourd'hui présents dans toute la métropole dakaroise, ainsi que dans les principales villes du Sénégal (Thiès, Saint Louis, etc.).

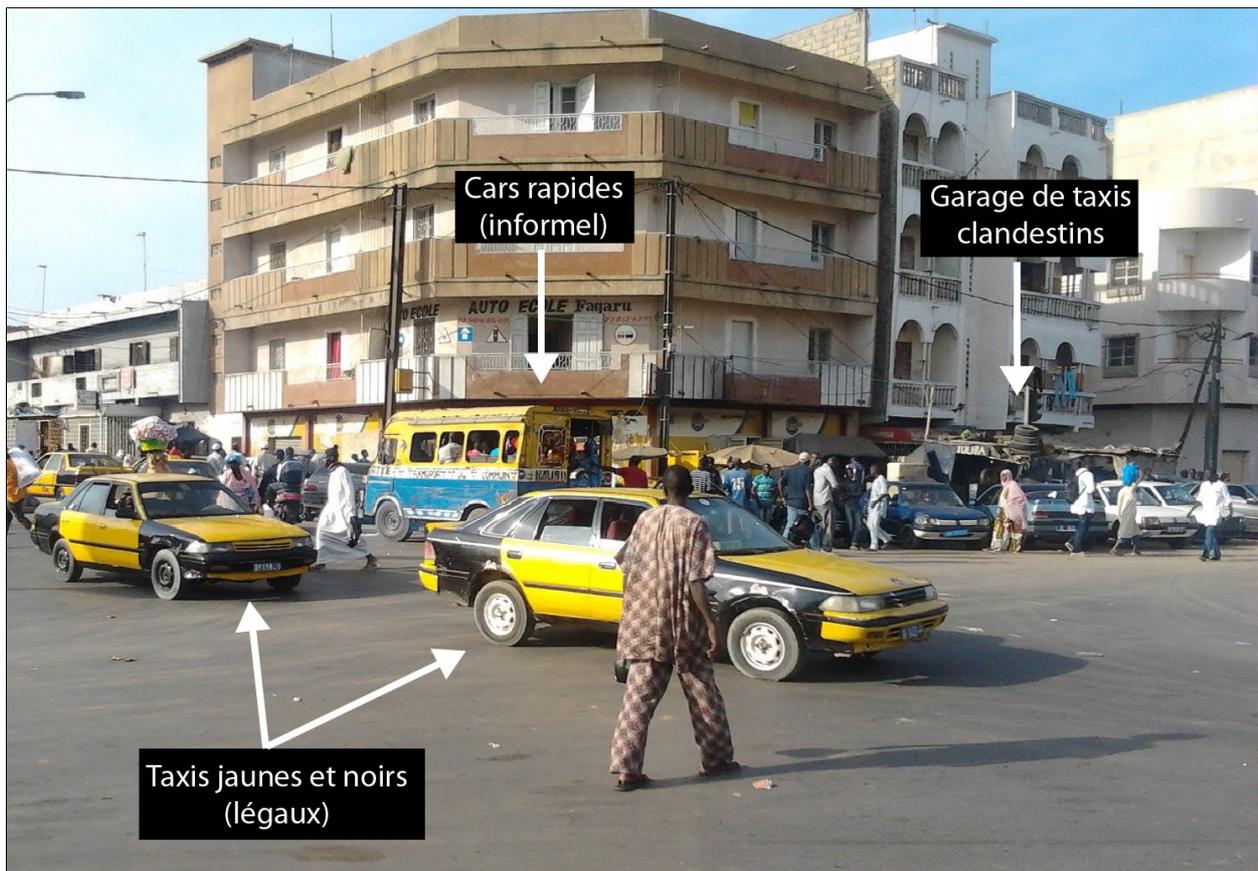


Illustration 5 : Tally Boumack à Pikine : un carrefour majeur en banlieue dakaroise
(Cliché : Adrien Lammoglia, 12/2011).

Le transport informel n'est pas une catégorie de transport parfaitement identifiée. Ce n'est pas non plus un principe que nous pouvons définir en quelques lignes en faisant référence à une loi ou un décret. L'informel est un domaine très vaste qui regroupe une multitude de services de transport à travers le monde (Cervero 2000). Nous verrons néanmoins qu'il est possible de spécifier les modes de fonctionnement et donc de différencier les services. Le transport informel regroupe tous les services de transport destinés au public n'étant pas strictement régis par une autorité organisatrice de transport, ou plus largement, échappant en partie, au contrôle des puissances publiques (Godard 2002). Il existe une grande variété de systèmes informels dans les pays en voie de développement, mais aussi dans une moindre mesure dans les pays développés. En Europe, nous les qualifions de clandestins (Philibert 2008) car leur activité est strictement interdite. Vue l'étendue du sujet, nous ne détaillerons pas dans cette thèse toutes les formes de transport informel existant, mais nous précisons ici les caractéristiques que nous pensons les plus significatives.

Le transport informel opère en effet en toute illégalité, mais la tolérance des autorités publiques varie selon les pays et selon les services. Alors que certains sont considérés comme totalement illégaux et sont réprimandés par les forces de l'ordre, d'autres peuvent être tolérés, voire reconnus comme une véritable composante du système de transport. Ce sont généralement des opérateurs de petite ou moyenne taille. Parfois, un propriétaire peut disposer de plusieurs

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

véhicules et donc employer plusieurs dizaines de personnes (chauffeurs⁴, apprentis⁵, receveurs⁶). Dans d'autres cas, le propriétaire emploie simplement un chauffeur, ou il est lui-même le chauffeur du véhicule. D'où la définition du transport artisanal que nous allons voir ci-dessous. Le transport informel est intrinsèquement flexible puisqu'il n'obéit qu'à une seule loi : celle du marché de l'offre et de la demande. La plupart de ces services se sont développés pour combler les déficits des transports publics, dans une optique de rentabilité, souvent au détriment de la qualité de service. Cette flexibilité est d'ordre spatial (organisation de la desserte), temporel (adaptation au rythme des populations), tarifaire (négociation des prix). Les véhicules utilisés sont toujours de petite taille (moto-cycle, voiture) à taille moyenne (mini-bus). Le remplissage des véhicules est très souvent maximum, voire même excédentaire. Ce qui nous emmène à leur dernière caractéristique : ces services sont souvent perçus comme de moindre qualité à cause des véhicules en mauvais état et du non-respect du Code de la route, induisant une réelle dangerosité des voyages et une faible qualité de service ((Cervero & Golub 2007).

1.4 L'artisanat dans le secteur des transports

« Le transport artisanal désigne l'exploitation à une échelle individuelle de véhicules de transport public dont la propriété est atomisée, c'est-à-dire répartie entre de nombreux propriétaires. Cette exploitation peut s'intégrer dans des règles collectives plus ou moins contraignantes élaborées par des organisations professionnelles. Mais la responsabilité de l'exploitation des véhicules est confiée largement au chauffeur, qui apparaît comme l'exploitant » (Godard 2008b)

Transport artisanal et informel sont souvent confondus car ils correspondent à des services n'étant pas planifiés par une autorité (organisation de haut niveau), mais plutôt par un ensemble d'individus qui s'organisent individuellement d'abord et collectivement ensuite (pour qu'il n'y ait pas de conflits d'intérêts). Pourtant si l'on s'en tient à la définition de Xavier Godard, tous les transports artisanaux ne sont pas forcément informels. Le meilleur exemple est celui des taxis légaux français et sénégalais qui opèrent en toute légalité en accord avec les autorités publiques. Ils n'en demeurent pas moins des artisans du transport. En questionnant les chauffeurs de taxi à Dakar, nous nous sommes rendu compte que le comportement et le mode de fonctionnement des clandestins et des légaux sont d'ailleurs très proches. Les services de transports artisanaux sont des systèmes bien organisés, qu'ils soient légaux ou non, car leur rentabilité quotidienne en dépend. Chaque acteur (chauffeur, propriétaire, etc.) s'organise du mieux qu'il peut dans le but de maximiser ses profits. Ce sont des systèmes auto-organisés, ce qui signifie que leur bon fonctionnement dépend de la responsabilité de chacun des acteurs. Ce sont aussi des systèmes avec de fortes capacités d'adaptation (Godard 2008a). C'est pourquoi ils présentent un intérêt particulier pour cette thèse. De manière générale, nous pouvons observer trois catégories

- 4 Pour la plupart des transports informels, le chauffeur se limite à la conduite du véhicule. Il suit un itinéraire plus ou moins défini et il répète cet itinéraire tout au long de la journée. Le chauffeur s'arrête pour prendre ou faire descendre des clients à la demande de l'apprenti. Pour les taxis collectifs, le chauffeur opère seul. Sa responsabilité est donc accrue : il définit les itinéraires, il appelle les clients et il encaisse les courses.
- 5 L'apprenti joue un rôle majeur dans le fonctionnement d'un service. Il est chargé d'appeler les clients et de leur indiquer la destination du véhicule. Il est au contact des clients puisqu'il s'occupe du paiement, et il informe les chauffeurs des arrêts demandés. Les apprentis se situent généralement à l'arrière des minibus, agrippés à la porte. Ils descendent à chaque arrêt pour faire monter ou descendre les clients. C'est un métier très fatigant, très dangereux ; ce sont généralement des jeunes qui effectuent ce travail en attendant de devenir chauffeur.
- 6 Dans certains cas, il peut y avoir un receveur, en plus de l'apprenti. Le receveur s'occupe du paiement et de la vente des tickets (s'ils en disposent).

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

d'exploitation artisanale. Les catégories dépendent en fait du nombre de personnes impliquées dans un service :

- pour la plus petite exploitation, une personne à elle seule est responsable du service. C'est le cas des chauffeurs de taxi qui sont aussi les propriétaires du véhicule. Ce mode de fonctionnement est très courant chez les taxis formels (France et Sénégal) comme chez les taxis illégaux de Dakar. Pour beaucoup d'entre eux, le véhicule de fonction est aussi le véhicule personnel. Ce mode de fonctionnement est *a priori* le plus rentable pour les chauffeurs ;
- une deuxième catégorie d'exploitation concerne les propriétaires qui emploient un ou deux chauffeurs. Ils se mettent d'accord pour garantir la rentabilité de l'investissement du propriétaire et un salaire minimum pour les employés. Généralement, le chauffeur utilise en permanence le véhicule (comme s'il le louait) et il en est responsable (entretien, essence). Lorsque deux chauffeurs sont employés, le second est généralement un suppléant permettant de faire fonctionner le taxi presque 24h/24h. Il arrive parfois que le chauffeur lui-même (non-propriétaire) emploie de manière informelle un chauffeur suppléant. Le propriétaire, quant à lui, attend simplement son versement quotidien ;
- enfin, pour les exploitations de plus grande taille, un propriétaire peut acheter plusieurs véhicules et employer de nombreux chauffeurs. Ce système ne semble pas être le plus fréquent pour les opérateurs de taxi, car il nécessite de grosses capacités de financement et augmente le risque de rencontrer des problèmes. En revanche, c'est un mode de fonctionnement très commun pour les minibus informels. Les chauffeurs employés se mettent d'accord et se répartissent des lignes, plus ou moins strictes. En dehors des chauffeurs et des propriétaires, d'autres acteurs sont généralement impliqués comme les receveurs et les « coxeurs »⁷.

1.5 Comment composer avec toutes ces termes ?

Les limites entre les services présentés sont parfois floues et les définitions varient selon les contextes sociétaux (entre la France et le Sénégal par exemple) et selon le cadre professionnel (chercheurs, aménageurs, politiciens, employés et artisans du secteur). De plus, les services de transport, notamment ceux étudiés dans cette thèse, n'entrent pas toujours dans une case bien délimitée. Par leurs caractéristiques, ils sont parfois à la frontière entre plusieurs définitions. Les « cars rapides » et les Ndiaga Ndiaye illustrent bien ce constat. D'après nos échanges avec les personnes du CETUD, ces systèmes ont parfois été considérés comme informels, parfois comme formels depuis leur apparition. Cela dépendait en fait du contexte socio-économique et politique en vigueur, alors que leur principe de fonctionnement était inchangé.

De ce fait, nous proposons, dans les chapitres suivants, de combiner ces définitions pour caractériser les services de transports français et sénégalais (cf. illustration 6). L'objectif est de proposer des regroupements cohérents afin de bien expliciter les spécificités de chacun. Cela nous semble aussi nécessaire pour justifier, à la fin de cette partie, les services de transport sélectionnés pour les simulations. Nous proposons ainsi trois ensembles. Le premier (i) renvoie au transport en commun de type occidental tel que les bus, les tramways, etc. Ce sont des

⁷ « Les « coxeurs » sont des acteurs du transport qui officient dans les gares routières et au niveau des arrêts où ils monnaient leur service en procédant au remplissage des cars » (Seck, 2006)

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

services publics (formels) et collectifs, ou dans certains cas semi-collectifs (e.g. le TAD). Un second regroupement concerne les transports artisanaux formels. Ils sont en règle générale individuels et de gestion privée. C'est en réalité une catégorie très restreinte puisqu'elle concerne essentiellement les opérateurs de taxis légaux français et sénégalais. Enfin, le dernier regroupement (iii) concerne le transport artisanal informel, qui est bien souvent semi-collectif. De par leur nature, ces divers services sont relativement peu connus et donc difficiles à caractériser. Néanmoins, vu leur forte capacité d'adaptation, ils vont être au cœur de nos préoccupations tout au long de ce rapport. Au croisement de ces trois catégories, les limites sont floues. Par exemple, certains services individuels et formels comme les taxis légaux de Dakar ont parfois tendance à pratiquer le taxi collectif. Ou encore, les transports informels dakarois de type minibus sont tellement intégrés à l'offre de transport en commun qu'ils sont parfois considérés comme formels.

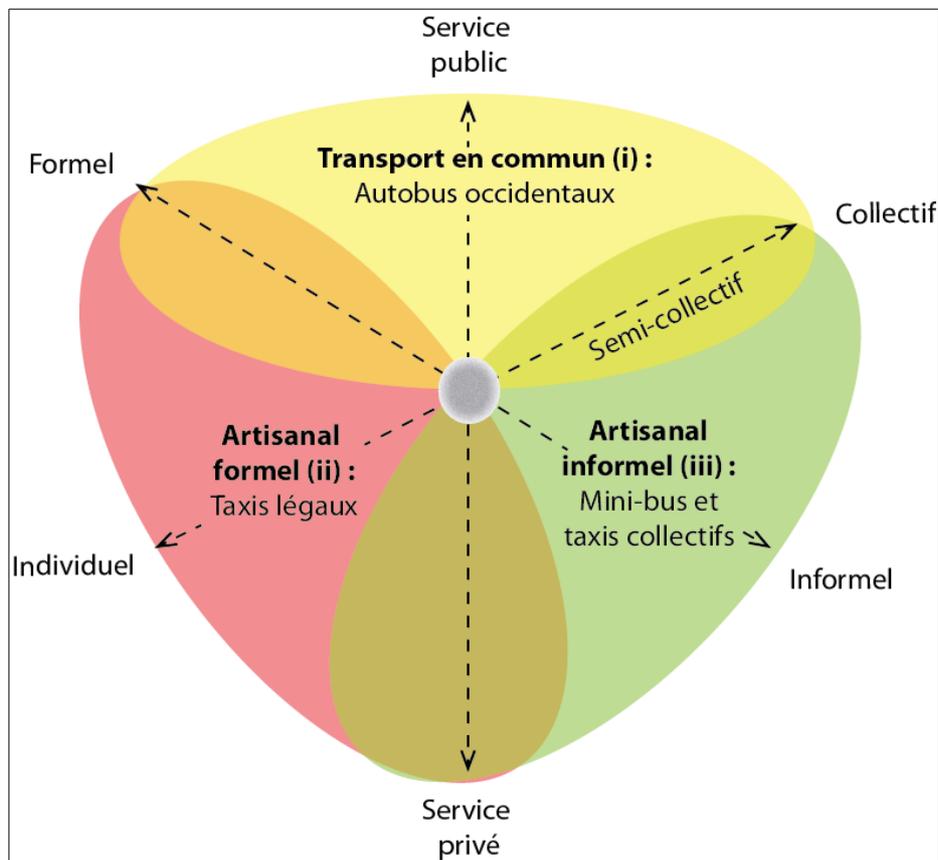


Illustration 6 : mosaïque inter-pénétrante des services de transport (France et Sénégal).

Chapitre 2. Les services réguliers ou peu flexibles

En France, les services réguliers de transport public sont définis dans le Décret n° 85-891 du 16 août 1985. Selon l'article 25, « les services publics réguliers de transport routier de personnes sont des services offerts à la place dont le ou les itinéraires, les points d'arrêt, les fréquences, les horaires et les tarifs sont fixés et publiés à l'avance » (Ministère du Développement durable 2012). Régi par l'article L. 213-11 du code de l'éducation et de l'article L. 3111-7 du code des transports, les transports scolaires sont également des services publics réguliers. Ces services correspondent donc à toutes les dessertes régulières, urbaines ou extra-urbaines. Ils constituent en réalité la très grande majorité de l'offre de transport dans nos villes et nos régions.

Au Sénégal, le transport régulier, tel qu'il est défini ci-dessus, est minoritaire. La plupart des services sont assez peu réguliers, étant informels et/ou artisanaux. Même pour les services de bus et de minibus fonctionnant sur arrêts et horaires fixes, il n'est pas toujours facile de maintenir une réelle régularité. Il existe plusieurs raisons à cela. D'abord, les services manquent de moyen et d'encadrement, ensuite les infrastructures sont insuffisantes (absence de voie dédiée) et tous les modes de transport sont quotidiennement confrontés aux problèmes de congestion qui ne cessent de s'amplifier dans l'agglomération dakaroise. Néanmoins, on constate une véritable volonté de la part des autorités d'améliorer la planification du secteur des transports et de renforcer la régularité des services. À Dakar, il existe une compétition parfois féroce entre les services formels réguliers et flexibles. C'est pourquoi nous jugeons utile de nous y intéresser quelque peu, en fournissant des éléments historiques indispensables pour bien comprendre l'état actuel de l'offre de transport.

2.1 La prédominance du transport de masse régulier en France

L'objet de cette thèse étant le transport flexible, nous ne présenterons pas de manière exhaustive tous les services de transport publics réguliers français. Il faut savoir qu'aujourd'hui toutes les collectivités sont équipées d'un service de transport public régulier plus ou moins développé et que les services demeurent relativement similaires en termes de fonctionnement, d'organisation et d'infrastructures. Néanmoins, le transport flexible se positionne en complémentarité avec les services réguliers. Nous jugeons donc utile de présenter de manière synthétique le fonctionnement des services les plus courants.

2.1.1 L'autobus

Il est bon de différencier les autobus, dédiés au transport en commun en milieu urbain, et les autocars, dédiés au transport public interurbain. Les véhicules sont très différents puisque les autobus roulent beaucoup moins vite (il leur est interdit de prendre les autoroutes), et ils possèdent relativement peu de places assises. Cela leur permet d'embarquer un maximum d'usagers (environ 100 personnes maximum). Les services d'autobus constituent aujourd'hui la catégorie dominante au sein des réseaux de transport en commun urbain. Elle regroupe l'ensemble des véhicules routiers soumis à la réglementation du Code de la route et opérant dans le cadre de la LOTI. Les dimensions et le poids des véhicules sont fixés par décret. De manière simplifiée, la largeur maximale est de 2,55 m et la longueur varie entre 12 mètres, pour les véhicules d'une seule caisse, jusqu'à 24,5 mètres pour des véhicules articulés de trois caisses. Ces

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

derniers sont soumis à autorisation préfectorale qui fixe leurs conditions de circulation et leurs itinéraires (CERTU 2004).

L'autobus est un service de transport relativement ancien. Il est apparu au début du 20^e siècle mais n'est devenu un standard dans nos villes qu'à partir des années 1950. Depuis lors, le matériel roulant a largement évolué. Par exemple, le plancher des bus s'est abaissé pour optimiser les flux d'entrée et de sortie, mais aussi pour permettre aux Personnes à Mobilité Réduite (PMR) d'utiliser les services (Dejeammes et al. 1992). La mécanique s'est modernisée dans un souci de confort, d'économie d'énergie et de réduction d'émission de polluants. Enfin, on voit de plus en plus de véhicules dotés de systèmes de communication et de géolocalisation, permettant de fournir aux usagers une information la plus précise possible sur l'état du service. En revanche, les services ont assez peu évolué en matière d'organisation. Le principe reste le même : les bus se déplacent d'arrêt en arrêt sur le réseau routier, en essayant de respecter les horaires de passages prévus. L'ensemble des arrêts à desservir constitue des lignes, qui sont préalablement définies et parfaitement identifiées par l'opérateur et les usagers. La principale évolution que nous avons pu constater a été la création de voies réservées, dans l'optique d'améliorer la régularité du service, les fréquences et la vitesse commerciale des véhicules. L'objectif est de rendre les transports en commun prioritaires et compétitifs par rapport à la voiture particulière. Ces services sont appelés Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) (Rabuel 2000) ou *Bus Rapid Transit* dans la littérature anglaise (Levinson et al. 2003; Moyer 2009). Ils font partie de la catégorie des Transports en Commun en Site Propre (TCSP).

2.1.2 Les TCSP

Suite à la disparition progressive du tramway (dans les années 1950) dans la quasi-totalité des villes françaises, et ce, concomitamment à l'essor de la circulation automobile, les années 70 voient le retour des transports en commun en site propre dans les agglomérations de plus d'un million d'habitants (Marseille en 1977, Lyon en 1978 puis Lille en 1983). On opte alors pour le métro qui semble bien adapté à la taille de ces métropoles. Les premiers systèmes de métro étaient assez proches des tramways, en termes de fonctionnement. Il ne faut pourtant pas les confondre.

Le métro possède deux spécificités. La première concerne la voirie puisque la circulation se fait exclusivement en site dédié : soit en souterrain, soit sur des viaducs. La longueur des stations est souvent irréalisable au sol. Les fréquences de passage et la vitesse des véhicules sont également impossibles à obtenir avec une voie partagée, c'est-à-dire avec des croisements entre les différents modes (bus, automobiles, piétons). Depuis les années 1980, les innovations technologiques ont aussi permis le développement du pilotage automatique des rames ce qui rend l'exploitation toujours plus performante. La deuxième spécificité concerne le matériel roulant. Les véhicules offrent des débits horaires beaucoup plus importants avec, soit une grande capacité unitaire, soit une capacité modeste couplée à une vitesse élevée de déplacement. En France, six villes seulement sont équipées de métro (Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse et Nantes). Aujourd'hui, la tendance semble être portée vers le tramway qui est beaucoup plus simple à mettre en place et moins onéreux (environ 2,5 fois moins cher, (CERTU 2004)). Il bénéficie par ailleurs d'une certaine image auprès des décideurs, mais aussi des citoyens.

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

Le tramway n'est réapparu en métropole que dans les années 80 avec Nantes (1985) et Grenoble (1987) qui ont été les premières villes à mettre en place de nouveaux tramway. Ces premiers projets connurent tous un succès dépassant largement les prévisions. Depuis, nous assistons à un retour particulièrement remarqué de ce service. Le tramway est une forme de transport en commun urbain ou interurbain circulant sur des voies ferrées équipées de rails plats. Il est lui aussi implanté en site propre, ce qui ne l'empêche pas de partager la voirie avec les autres modes. Les véhicules sont aujourd'hui tous électriques, ce qui rend le service à la fois peu polluant et silencieux. L'alimentation se fait via des câbles aériens ou par le sol avec un troisième rail dédié. Par souci d'esthétique, certains tramways bénéficient aussi de batteries qui leur permettent de circuler pendant un certain temps sans recharger et ainsi traverser des espaces dépourvus de câbles. La vitesse commerciale des tramways est intermédiaire à celle des métros et à celle des autobus classiques. Leur débit est estimé à 7 000 passagers par heure au maximum contre plus de 12 000 pour le métro. Le tramway suscite beaucoup d'intérêt pour les collectivités et de plus en plus de villes prévoient de mettre en place un service. Certaines sont en cours de construction de leur première ligne, et ce, malgré un coût non négligeable pour la collectivité, en comparaison aux systèmes de bus en site propre (jusqu'à dix fois plus cher (CERTU 2004)). Malgré cet enthousiasme, force est de constater que globalement le nombre de lignes de tramways en France reste limité, contrairement à certains pays comme l'Allemagne qui n'a jamais démantelé l'ensemble de son réseaux. Les villes françaises dotées de plus de deux lignes de tramways demeurent plutôt rares.

Les BHNS, quant à eux, sont encore relativement peu fréquents en France. Ils connaissent pourtant un engouement croissant dans d'autres régions du monde comme l'Amérique latine qui ont su tirer profit de ces systèmes peu coûteux, dotés d'une vitesse commerciale élevée (environ 20 km/h) et surtout d'une bonne capacité d'adaptation aux sites accidentés. Les BHNS se caractérisent par une forte fréquence (5 à 10 min en heures pleines et moins de 15 min en heures creuses), une amplitude horaire qui peut être élevée (circulation la semaine, en soirée et le week-end), des parcours intégralement ou partiellement en site propre (70 % minimum) bénéficiant de systèmes de priorité aux feux tricolores et aux ronds-points. Il existe aujourd'hui une grande variété de systèmes. Les différences s'observent principalement au niveau des véhicules. Ils peuvent être plus ou moins volumineux, à énergie fossile ou électrique, guidés ou non, etc.

En tant que modes de surface, on s'aperçoit que le tramway et les BHNS présentent une double finalité. Ils sont utilisés pour modifier le partage de la voirie. Des axes pour automobiles sont généralement supprimées au profit du TCSP et des modes doux. Ils permettent aussi de réaliser des aménagements urbains importants (comme la modernisation des canalisations, l'installation de réseaux de communications, le réaménagement d'une place publique, etc.). C'est pourquoi le projet d'aménagement d'un TCSP s'intègre généralement dans des projets de modernisation urbaine de plus ou moins grande envergure. Les municipalités aiment d'ailleurs s'en servir pour procurer une image de modernité et de qualité de vie à leur ville.

2.1.3 Des systèmes en perpétuel développement

Dans ce premier paragraphe, nous avons fourni un bref aperçu des systèmes de transport réguliers français. En réalité, cette thématique est très vaste. Les services de grande capacité se développent un peu partout à travers le monde. Les pays en voie de développement sont très demandeurs de ce type de système, car ils sont généralement confrontés à une forte croissance de

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

population et/ou à un déséquilibre important entre l'offre de transport et la demande de mobilité. Une étude de faisabilité pour un BHNS à Dakar devrait d'ailleurs être lancée. L'objectif serait de désengorger la presque île en limitant les congestions sur les deux axes principaux : la voie de dégagement nord et l'autoroute urbaine.

Nous proposons de garder à l'esprit tous ces éléments à titre de comparaison. Ils nous permettront par la suite de mieux positionner l'offre de transport flexible au sein des systèmes de mobilité. Dans la section suivante, nous proposons d'expliquer un peu plus en détail le seul et unique service de grande capacité sénégalais. Cela nous permettra de mieux comprendre pourquoi et comment se sont développés les services artisanaux dans la capitale.

2.1.4 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, encadré par la LOTI
Principe d'organisation	Haut niveau d'organisation, planification par l'AOT
Objectif du service	Répondre aux besoins de masse, mutualiser les déplacements, concurrencer la VP
Gestion	Service public avec délégation de service à un opérateur
Objectif de l'opérateur	Répondre au cahier des charges
Capacité des véhicules	Collectif, grande capacité : 40 places et plus
Rapidité	Rapide à très rapide (TCSP)
Tarification	Service public, prix du ticket fixé par l'AOT (< 2 €)
Sécurité	Très bonne
Nuisances	Faible à très faible
Exemples	Autobus, BHNS, tramway, métro

Tableau 1 : Fiche signalétique des services français de grande capacité.

2.2 Le service de bus de grande capacité Dakar Dem Dikk

Il existe à Dakar un service de bus très proche des services classiques français : le Dakar Dem Dikk, qui signifie en wolof « aller et revenir ». Sa couverture s'étale sur Dakar et les villes satellites, avec un monopole de service au Plateau, le quartier des affaires. La société est apparue après la liquidation de la Société de transport du Cap-Vert (SOTRAC) en 1998. La SOTRAC, créée en 1971, était « l'opérateur public historique des bus de Dakar qui a vu ses parts de marché s'effriter continuellement dans les années 1980 et 1990 » (Bertholet 2004). Créée deux ans après la liquidation de la SOTRAC (le 20 novembre 2000 (DTT 2007)), Dakar Dem Dikk est aujourd'hui une société anonyme au capital de 1 500 000 000 CFA détenue majoritairement par l'État (77 %). Elle opère dans un cadre juridique stabilisé depuis décembre 2003 avec la signature d'une convention de concession et d'un cahier des charges.

2.2.1 Matériel roulant

En 2001, l'âge moyen des véhicules de la société était estimé à 19 ans. Le parc a ensuite subi un important rajeunissement avec l'acquisition en 2005 d'un grand nombre de véhicules neufs de l'Inde et de la Suède (GMAT 2007). En 2007, la société disposait d'une flotte de 409 autobus avec un taux de réserve de 20 % pour la maintenance et le remplacement de véhicules accidentés, soit un parc d'exploitation de 327 bus (DTT 2007). Il y avait donc entre 9 et 19 véhicules disponibles par ligne. Le nombre dépendait des créneaux horaires et de la longueur des lignes. La flotte était composée de 60 autobus de marque VOLVO (cf. illustration 7) et de 369 autobus de marque TATA (tous fournis grâce à l'aide officielle au développement (ODA)) (IBIS 2008). La capacité de ces bus est d'environ 80 passagers. Il est difficile de circuler avec ces bus sur des routes étroites et il leur arrive souvent de bloquer la voirie en période de congestion. C'est aussi un handicap lorsque la chaussée est accidentée, ce qui est fréquent à Dakar et notamment en banlieue. La société connaît des difficultés pour maintenir son parc en bon état. Si nous nous basons sur des chiffres plus récents, il semblerait que la flotte soit aujourd'hui réduite à une centaine d'autobus et que la société soit sur le point d'acquérir une centaine de nouveaux véhicules (Seck 2012; CUREM 2012b).



Illustration 7 : autobus Dakar Dem Dikk de marque Volvo

(Source : <http://blog.sustainablecities.net/2011/06/14/dakar-public-transit-choose-your-way/>).

2.2.2 Fonctionnement du service

Dakar Dem Dikk (DDD) est un service de transport régulier. Les bus circulent sur des lignes fixes et s'arrêtent à des arrêts dédiés. C'est d'ailleurs le seul service de Dakar à respecter des arrêts officiels. Il existe un service scolaire avec 12 lignes qui desservent les principaux établissements du secondaire. La société bénéficie depuis peu d'un site internet⁸ sur lequel on peut trouver le tracé de toutes ses lignes, ainsi que leurs arrêts. Le réseau est configuré selon trois types de lignes. Comme nous pouvons le voir sur l'illustration 8, la majorité d'entre elles sont des

⁸ <http://www.demdikk.com/>

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

pénétrantes. Elles partent du terminus le Palais qui se situe à l'extrême sud de la presqu'île. Elles traversent Dakar Plateau, puis prennent les grands axes en direction soit de la proche banlieue puis la lointaine banlieue ; soit des quartiers sud ouest (autour de l'aéroport). Certaines lignes sont aussi circulaires au niveau de Dakar, d'autres jouent le rôle de correspondance, mais ces dernières restent minoritaires.



Illustration 8 : le tracé des lignes Dakar Dem Dikk (axes colorés)
(Source : Google Earth, CUREM 2011).

La longueur des lignes du réseau de Dakar Dem Dikk varie de 2,7 à 35,4 kilomètres (GMAT 2007). En 2006, chaque autobus effectuait en moyenne entre 123 km/j (pour la ligne 13 du réseau urbain et 230 km/j (pour la ligne 15 du réseau de banlieue) (DTT 2007). Ce sont des valeurs élevées, sachant que les bus ne circulent pas sur des voies dédiées et que la circulation est souvent difficile à Dakar. Pourtant, la société souhaite continuer à élargir son offre. Elle a récemment signé une convention avec le CETUD prévoyant un périmètre de concession totalisant 21 lignes et correspondant à 645 km d'itinéraires.

Les bus circulent approximativement de 6 h du matin à 21 h le soir. Les vitesses commerciales actuelles des autobus sont faibles durant les heures de pointe, notamment le long des axes fortement achalandés. En 2012, elle a été estimée à environ 8 km/h en moyenne pour 17

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

lignes enquêtées (CUREM 2012a). Beaucoup de lignes sont relativement longues en distance kilométrique et en temps. D'après nos discussions avec des utilisateurs, certaines personnes font régulièrement des trajets de plusieurs heures pour venir travailler en centre-ville. Les fréquences de passage visées dans le programme de relance des DDD étaient comprises entre 8 minutes et 15 minutes. D'après les dernières enquêtes, la fréquence de passage est aujourd'hui en moyenne de 30 minutes, voire plus, pour de nombreux arrêts (CUREM 2012b).

Le coût moyen d'un déplacement est estimé à 163 FCFA (recette moyenne). C'est un prix relativement bas et abordable pour la quasi-totalité de la population. Les lignes sont divisées en section et le prix du ticket dépend du nombre de sections traversées par le client. Le prix augmentant assez peu d'une section à l'autre (quelques dizaines de FCFA), l'offre est intéressante pour les longs trajets qui sont très coûteux en taxis ou qui nécessitent des correspondances avec les autres modes.

2.2.3 Quelles perspectives pour Dakar Dem Dikk ?

Nos analyses sur le terrain en 2011 ne portaient pas spécifiquement sur la société Dakar Dem Dikk. Nous n'avons pas de bases de données précise décrivant ce service. Néanmoins, en tant qu'utilisateur, il est facile de constater que les autobus en circulation sont assez peu nombreux dans l'agglomération, comparé notamment aux minibus de l'AFTU et des opérateurs informels, très fréquents en ville et en banlieue, exception faite de Dakar plateau où la fréquence de passage des bus DDD est élevée. Cette bonne fréquence au plateau s'explique par la convergence des lignes vers le bout de la presqu'île, qui entraîne une augmentation mécanique de la densité de véhicules dans ce quartier (cf. annexe 2). Dans son ensemble, la faible densité de bus en circulation en ville et en banlieue entraîne généralement de longues attentes aux arrêts et les 20 minutes d'intervalle entre chaque véhicule sont rarement respectées. À tel point que si vous souhaitez prendre un transport à un arrêt (hors Dakar Plateau) vous ne prendrez que rarement les Dakar Dem Dikk, car entre deux passages vous aurez eu de nombreuses occasions de prendre un autre mode. DDD est censé fournir des services sur les itinéraires les plus fréquentés, les services de minibus couvrant les itinéraires moins chargés. Or, en pratique, les services de minibus sont fournis à côté des itinéraires de DDD. Le service proposé semble donc avoir des difficultés à se positionner face à la concurrence féroce des autres modes. D'autant plus que ses concurrents utilisent de manière déloyale ses arrêts et ses terminus.

Comme nous l'avons expliqué, la société est aussi confrontée à de lourds problèmes d'entretien et de renouvellement de sa flotte. En 2010, par exemple, le kilométrage moyen des bus entre deux pannes a été estimé à 1 854,78 km (CUREM 2012b) (sachant que les bus parcourent entre 100 km et 200 km par jour). DDD s'avère donc très coûteux en exploitation et pose de sérieux problèmes de disponibilité. La taille imposante des autobus constitue aussi un désavantage face à la concurrence. Ils sont peu confortables, très bruyants et les chauffeurs ont beaucoup de difficulté à se faufiler en heure de pointe. Ils sont, de plus, relativement lents et s'arrêtent à tous les arrêts ce qui entraîne parfois des détours et des pertes de temps non négligeables.

D'un point de vue financier, l'entreprise est fragile notamment parce qu'elle est dépendante des fonds publics et parce qu'elle n'arrive pas à être rentable. En revanche, bien que ce ne soit pas

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

le service le moins cher, Dakar Dem Dikk offre généralement des services bon marché et avec une couverture spatiale importante à l'échelle de l'agglomération. C'est sa force et la raison pour laquelle beaucoup de personnes continuent d'utiliser ce service.

2.2.4 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, encadré par le ministère des transports et le CETUD
Principe d'organisation	Haut niveau d'organisation : la société + CETUD
Objectif du service	Répondre aux besoins de déplacement importants à Dakar et en banlieue
Gestion	Société mixte privé-public
Objectif de l'opérateur	Équilibre financier
Capacité des véhicules	Collectif, grande capacité : 80 places environ
Rapidité	Relativement lent
Tarifcation	Prix du ticket fixé en accord avec le CETUD (< 400 FCFA)
Sécurité	Relativement faible
Nuisances	Assez fortes (pollution, congestion, etc.)

Tableau 2 : fiche signalétique du service d'autobus Dakar Dem Dikk.

2.3 Les célèbres « cars rapides » sénégalais

Les premiers spécimens de « cars rapides » sont apparus en 1947, pour occuper le vide laissé par la société de transport de l'époque. Malgré la création de la SOTRAC en 1971, qui devait détenir le monopole, les premiers opérateurs ont continué à fonctionner et à se développer si bien qu'en 1973, l'état a proposé d'organiser le secteur de manière à ce que la SOTRAC et les « cars rapides » puissent coexister. Des initiatives ont été prises pour remplacer les véhicules les plus anciens et les transporteurs ont été invités à se regrouper et à s'organiser. C'est donc à la fin des années 70 que se sont concrètement installés les opérateurs de « cars rapides ». Malgré cet effort de coexistence entre les deux services, la SOTRAC n'a jamais vraiment réussi à satisfaire la population. Elle a d'ailleurs été confrontée à une série de difficultés qui ont conduit à sa liquidation, puis à la création de la société Dakar Dem Dikk (Bertholet 2004). Les opérateurs privés ont su profiter de cette période de déclin du transport public pour augmenter de façon significative leur part de marché et se positionner comme numéro un du transport en commun à Dakar.

Les « cars rapides », constituent une offre de transport toujours très prisée par la population de nos jours. C'est un service plutôt populaire, très développé en banlieue, utilisé quotidiennement aussi bien par les adultes que par les jeunes (écoliers et étudiants). Toutefois, le manque d'organisation de ce secteur a eu des répercussions sur la qualité des services offerts aux usagers. C'est pourquoi un vaste programme de remplacement des cars a été lancé à la fin des années 90 (cf. Partie 1.2.4). Aujourd'hui, ils assurent des dessertes urbaines ou des liaisons interurbaines selon le type de leur licence. Leur gestion est toujours de type privé. La tarification

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

est en principe réglementée, mais, dans la pratique, les barèmes officiels sont plus ou moins respectés. Selon le Plan de Déplacement Urbain de Dakar, en 2007 ce moyen de transport détenait toujours la part la plus importante du marché des déplacements motorisés dans la capitale (GMAT 2007).

2.3.1 Un service formel ou informel ?

Il n'est pas évident de catégoriser les « cars rapides ». Nos échanges avec le CETUD nous l'ont bien montré. Depuis leur apparition, les opérateurs ont été considérés par les autorités comme tantôt formels et tantôt informels. Aujourd'hui, il semblerait qu'ils soient simplement « tolérés » par les autorités publiques. Néanmoins, si on se fie aux rapports officiels, les « cars rapides » constituent un service formel. Ils doivent disposer d'une licence pour exercer leur activité en toute légalité. Ils doivent se limiter à l'itinéraire spécifié sur la licence et respecter les prix fixés par le CETUD. Mais la situation est autre au quotidien. Certains chauffeurs exercent sans licence, malgré les contrôles de police. Les itinéraires sont plus ou moins variables. Il n'y a aucun dispositif de contrôle des prix, ce qui laisse une certaine marge de liberté pour la facturation des trajets. De plus, les opérateurs ne reçoivent aucune subvention de l'État et finalement ne rendent aucun compte aux autorités.

2.3.2 Un service flexible ou régulier ?

Malgré la forte volonté d'organiser le secteur, il est difficile de considérer les « cars rapides » comme une offre régulière. Certes, le nombre important de cars en circulation rend le service très accessible en tous lieux et quasiment à tout moment de la journée. Cependant, il y a une faible maîtrise des arrêts desservis, des horaires de passage et des itinéraires. Les chauffeurs peuvent à tout moment dévier de leur trajectoire ou même changer complètement d'itinéraire s'ils jugent que c'est avantageux économiquement. C'est donc un service qui peut se révéler incertain et relativement flexible selon les situations.

Toutefois, nous ne pouvons pas non plus le considérer comme un service flexible à proprement parler, car en règle générale, les opérateurs ont tendance à chercher la régularité. Ils souhaitent gagner leur recette facilement et rapidement. Pour ce faire, ils vont éviter de prendre des risques inutiles en circulant par exemple sur des itinéraires qu'ils ne connaissent pas. À la frontière entre les deux définitions, on peut donc considérer que les cars rapides constituent une offre de transport régulière, bénéficiant d'un certain degré de flexibilité, lorsque les chauffeurs sont contraints de s'adapter à une situation imprévue ou quand une opportunité économique intéressante se présente à eux.

2.3.3 Le parc de véhicules

Il semble difficile de connaître le nombre exact de cars opérant à Dakar, car certains d'entre eux fonctionnent sans licence. Cependant, les dernières enquêtes ont pu estimer entre 2 500 et 3 000 véhicules en activité (IBIS 2008). À l'origine, ce sont des fourgons de transport de marchandises d'occasion importés d'Europe. Une fois sur place, ils ont été convertis en véhicule de transport de passagers dans des ateliers locaux à Dakar. Ce principe résulte directement du régime fiscal à l'importation, qui rendait plus cher l'importation de véhicules de passagers que celle de fourgons ou de camions. Il existe deux grandes catégories de cars : les « cars rapides » à

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

proprement parler et les « Ndiaga Ndiaye », qui portent le nom du premier opérateur qui les a importés au Sénégal.

Les « cars rapides » sont des véhicules de marque Renault. Le modèle SG2 est autorisé pour 25 personnes à bord et le SG3/4 pour 35 personnes, ce qui est relativement élevé vue la taille étroite des véhicules. L'âge moyen est estimé à 25 ans. Ils sont donc maintenant, pour la plupart d'entre eux, dans un état de vétusté avancé. Ces cars, par leur décoration typique ont su affirmer leur image et ils se distinguent facilement de tout autre type de transport en commun à la fois au Sénégal et plus largement en Afrique (cf. Illustration 9). Ils sont d'ailleurs devenus une icône et un produit touristique (en modèles réduits) que l'on trouve sur le marché de Dakar.

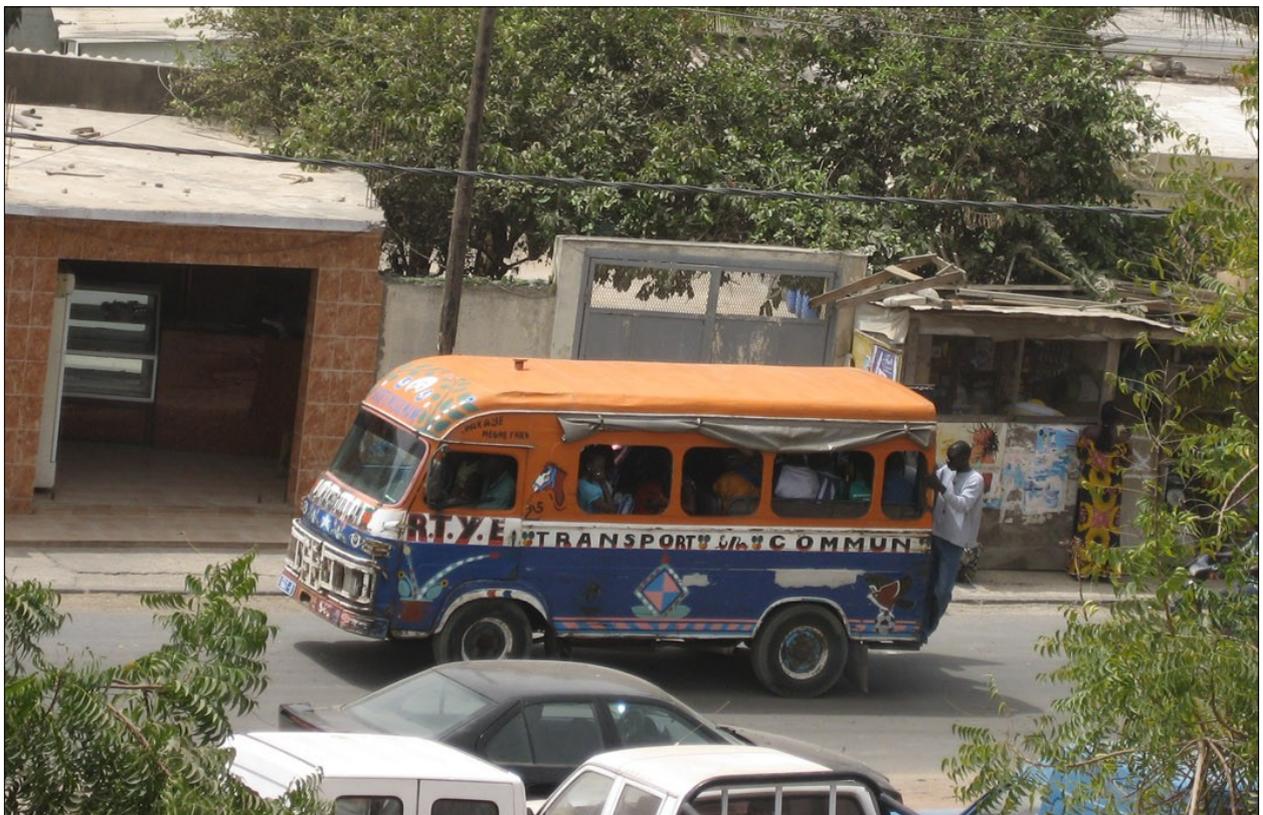


Illustration 9 : un car rapide et son apprenti.

(Source : <http://blog.sustainablecities.net/2011/06/14/dakar-public-transit-choose-your-way/>).

Les « Ndiaga Ndiaye », quant à eux, sont des cars de marque Mercedes (cf. illustration 10). Ils sont un peu plus récents puisque leur âge moyen est estimé à 20 ans. Ils sont aussi plus grands avec une capacité de 35 à 45 places. D'après notre expérience, ces véhicules sont plus confortables que les cars Renault, car la quasi-totalité des clients voyagent assis. Ils circulent sur des itinéraires plus longs et s'arrêtent un peu moins que les « cars rapides ». Ils sont donc généralement perçus comme plus rapides.



Illustration 10 : un Ndiaga Ndiaye et son apprenti.

(Source : <http://blog.sustainablecities.net/2011/06/14/dakar-public-transit-choose-your-way/>)

2.3.4 Fonctionnement du service

Le fonctionnement des deux types de car est très proche. C'est pourquoi ils apparaissent dans les rapports officiels comme un seul et même service sous le nom de « cars rapides ». Les chauffeurs circulent sur des itinéraires relativement bien identifiés par la population. On peut alors parler de ligne sans oublier qu'elles n'ont pas été tracées par les autorités, mais qu'elles ont plutôt émergé de l'interaction entre les pratiques des opérateurs et la demande de mobilité. De ce fait, le nombre de lignes composant le réseau n'est pas connu avec précision. Alors qu'un inventaire datant de 1999 faisait état de 11 lignes, dont trois ayant deux itinéraires différents selon la période de la journée, un plan produit en 2002 sur la base du plan de réorganisation des transports en commun indiquait 26 lignes. Ces lignes relient l'ensemble des gares routières régulières (Petersen, Lat-Dior, Colobane, Pompiers, Parcelles assainies, Thiaroye, Rufisque) mais aussi des têtes de ligne irrégulières (Sahm, Grand Yoff, Esso Port, etc.). La longueur des lignes est estimée entre 3 et 30 kilomètres (aller simple) (GMAT 2007). Si les itinéraires sont relativement bien identifiés, les points d'arrêt et les horaires eux ne sont pas prédéfinis. Les chauffeurs s'arrêtent vraiment à l'endroit qui les arrange (en bord de route, sur un échangeur, sur le trottoir, etc.) pour attendre d'éventuels clients. Ils s'arrêtent aussi à la demande des clients. Les prix sont assez peu respectueux des directives en vigueur, cependant ils ne sont pas ouverts à la négociation comme c'est le cas avec les taxis. Ce sont des prix relativement stables et connus des

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

clients. Comme pour d'autres services informels, les chauffeurs attendent régulièrement que le véhicule soit suffisamment rempli (pour ne pas dire plein) pour démarrer la course. Par conséquent, si un client monte dans un car à une gare en heure creuse, il se peut qu'il attende plusieurs dizaines de minutes avant de commencer son voyage. Le problème ne se pose pas vraiment en heure pleine, car les véhicules se remplissent très rapidement. En moyenne, les cars commencent leur journée à 6 h 30 le matin et cessent aux alentours de 21 h. Certains véhicules circulent aussi en soirée et parfois même jusqu'à l'aube. C'est donc un service accessible presque à tout moment de la journée. La fréquence de passage est bien évidemment ajustée en heure creuse et en heure de pointe, selon le principe de marché entre l'offre et la demande.

Les « cars rapides » sont exclusivement gérés par des opérateurs privés. À l'origine, le service a été créé sur un modèle de transport artisanal. Quelques personnes influentes ont investi dans le secteur en important des véhicules et en employant des chauffeurs. C'est ainsi que sont apparues les premières lignes. Aujourd'hui, le secteur est caractérisé par un nombre important d'opérateurs et une atomisation très forte des professions. Les dernières enquêtes ont recensé environ 1 300 opérateurs, parmi lesquels plusieurs se distinguent. L'entreprise Ndiaga Ndiaye, par exemple, possède à elle seule près de 10 % du parc (environ 300 véhicules) et l'entreprise Mboup gère environ 200 véhicules. Ces opérateurs sont devenus au fil du temps des entreprises de grande envergure, mais un grand nombre d'opérateurs modestes persistent également. Il existe des situations où le propriétaire possède un seul « car rapide » et finance en parallèle le fonctionnement d'un ou plusieurs taxis.

Les propriétaires emploient un équipage composé au minimum d'un chauffeur et d'un « apprenti ». Pour les plus développés, ils peuvent disposer de plusieurs équipages par véhicule, permettant ainsi un roulement entre les employés. Les « apprentis » sont généralement des jeunes hommes qui aspirent à devenir chauffeurs, mais la transition ne semble pas si évidente. En réalité, ces jeunes jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement du service. Ils se positionnent à l'arrière et voyagent agrippés au véhicule. Leur travail consiste d'une part à trouver des clients : ils demandent au chauffeur de s'arrêter dès qu'ils aperçoivent des clients potentiels. Ils n'hésitent pas alors à les appeler, à leur demander leur destination et à les convaincre de monter à bord. D'autre part, ils jouent le rôle du receveur puisque c'est eux qui encaissent les clients en cours de route. Ils constituent enfin l'intermédiaire entre les clients et les chauffeurs. Lorsqu'une personne souhaite descendre, elle en informe « l'apprenti » qui va avertir le chauffeur en tapant sur la carrosserie du véhicule. Ces jeunes exercent un métier difficile et éprouvant physiquement. Ils sont sollicités en permanence et doivent toujours rester attentifs. C'est aussi un métier très dangereux, car les accidents de cars sont malheureusement fréquents à Dakar et les « apprentis » sont directement exposés aux chocs. À l'inverse, le rôle du chauffeur est finalement assez limité. Il ne descend jamais du véhicule et se contente de conduire d'arrêt en arrêt, en communiquant avec « l'apprenti ».

2.3.5 Coûts, rendement et rentabilité

Le voyage en « car rapide » est bon marché. Le coût moyen calculé sur la base de l'enquête EMTSU-2000 s'établit à 137 FCFA pour les Ndiaga Ndiaye et à 99 FCFA pour les « cars rapides » (GMAT 2007). C'est une des raisons pour laquelle ils sont devenus aussi populaires, que ce soit en ville ou en banlieue. Les « apprentis » ne disposent pas d'une grande marge de manœuvre tarifaire, car la concurrence est importante et les clients sont très exigeants. Il peut

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

arriver que des clients essayent de négocier notamment lorsque l'équipage tente de sectionner le trajet de manière abusive, mais la négociation est assez rare avec ce service.

Une étude récente basée sur des entrevues avec les conducteurs a montré que les taux de remplissage des véhicules étaient généralement très élevés, avec plus d'un passager payant par siège pour chaque voyage (IBIS 2008). On sait aussi que les vitesses commerciales des véhicules sont faibles, notamment pendant les heures de pointe dans les secteurs fortement achalandés (minima de 9,8 km/h en ville). En 2004, des enquêtes ont montré que les « cars rapides » effectuaient moins de voyages aller-retour par jour que les Ndiaga Ndiaye, car ils s'arrêtent plus souvent et roulent plus doucement. Les revenus par section semblaient aussi légèrement inférieurs. Les Ndiaga Ndiaye sont donc potentiellement plus rentables : ils effectuent plus de voyages, tout en transportant plus de clients, à un prix légèrement supérieur (Bertholet 2004). Des revenus théoriques pour les opérateurs ont été estimés à partir des détails fournis par les conducteurs sur les prix pratiqués, le nombre de sections par itinéraire et des rotations par jour. D'après les enquêtes, les revenus des propriétaires semblent sensiblement inférieurs, étant donné que les équipages gardent une partie des recettes qu'ils collectent. La société FIDECO a notamment établi une estimation des frais d'exploitation et des revenus en 2008. Selon cette étude, le carburant a constitué en 2005 approximativement 35 % de coûts totaux, alors que les amendes et autres frais officieux représentaient 17 % (FIDECO 2008). Avec les prix du carburant de 2005, les « cars rapides » semblaient produire un bénéfice brut d'exploitation relativement substantiel. Les prix actuels du carburant ayant approximativement doublé, il est probable que la plupart des opérateurs aient actuellement des difficultés à équilibrer leurs comptes.

2.3.6 Les problèmes posés

Le point noir des « cars rapides » est sans aucun doute l'insécurité. À la fois par la pratique des « apprentis », la conduite des chauffeurs (qui n'ont pas toujours de permis de conduire) et parfois le comportement irresponsable des clients (il arrive de voir des clients sauter du véhicule en cours de route en plein milieu de la voie). Tout cela reflète bien le caractère informel de ce type de service. C'est, entre autres, pour stopper ce genre de pratique dangereuse, que les institutions tentent de formaliser le secteur. À ces comportements s'ajoute l'état inquiétant du matériel roulant. Selon les opérateurs, les cars sont généralement fiables et rarement hors service. C'est vrai qu'il existe à Dakar un système bien établi d'artisans compétents en mécanique qui peuvent continuer à faire rouler les véhicules par des réparations courantes. Cependant, l'étude de FIDECO, bien que ne présentant aucune statistique sur une expérience opératoire, prétend que les véhicules sont généralement hors service 4 jours par mois (IBIS 2008).

D'après des enquêtes réalisées auprès de clients, il s'avère que les comportements dits informels des chauffeurs et surtout des « apprentis » constituent l'élément le plus contesté. Nous avons vu en effet que les fréquences et la régularité des départs dépendaient pleinement de la décision des opérateurs et de leurs équipages. Ces derniers agissent en fonction de la réalité du moment en essayant de maximiser leurs recettes, d'où l'apparition de pratiques telles que le sectionnement des lignes.

Enfin, ces véhicules posent bien sûr de gros problèmes de pollution dus à leur ancienneté. Visible à Dakar, cet état de fait n'est pas spécifique aux « cars rapides », ni au Sénégal. Il est

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

évident qu'il y a beaucoup à faire en Afrique en matière de pollution atmosphérique mais nous ne disposons que de très peu d'informations à ce sujet.

2.3.7 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Informel, mais tolérés par les autorités
Principe d'organisation	Mixte : haut niveau d'organisation et auto-organisation
Objectif du service	Comblent les carences du transport public, capter les populations les plus pauvres et les plus isolées
Gestion	Opérateurs privés (grosse société ou simple artisan)
Objectif de l'opérateur	Rentabilité financière
Capacité des véhicules	Semi-collectif (25-35 places autorisées)
Rapidité	Assez lent mais variable selon les lignes
Tarifcation	Prix du ticket fixé plus ou moins en accord avec le CETUD (< 300 FCFA)
Sécurité	Faible à très faible selon les véhicules
Nuisances	Très fortes (pollution, congestion, etc.)
Exemples	« cars rapides » Renault, Ndiaga Ndiaye Mercedes

Tableau 3 : fiche signalétique des « cars rapides ».

2.4 Les récents opérateurs formels de minibus

En 1999 a été lancé à Dakar un vaste programme de réorganisation du secteur des transports. L'attention a été portée sur les opérateurs de « cars rapides », qui captaient jusqu'alors la grande majorité des déplacements dans la capitale (DTT 2007). Un programme de renouvellement a donc été mis en place pour remplacer une partie de ces vieux cars par des minibus entièrement neufs, fonctionnant dans un cadre parfaitement formel. Grâce à un crédit de plus de 15 millions de dollars, le gouvernement du Sénégal a permis de financer sous forme de prêt quinquennal 75 % du prix d'achat des nouveaux véhicules. Des spécifications détaillées des véhicules souhaités ont été élaborées et soumises à appel d'offre. La condition était que les véhicules soient assemblés au Sénégal et que la garantie couvre les premières années d'activité. Le contrat a été signé avec l'entreprise indienne Tata, qui a elle-même travaillé en collaboration avec la compagnie locale SENBUS (IBIS 2008). Les opérateurs participants, qui auparavant respectaient assez peu le cadre légal, ont été invités à s'organiser en Groupements d'Intérêts Économiques (GIE), puis à former collectivement l'Association de Financement des professionnels du Transport Urbain de Dakar (AFTU). Au départ, l'association était responsable du suivi du financement des véhicules. Elle joue aujourd'hui le rôle d'intermédiaire entre les autorités (le CETUD) et les GIE. Pour chaque nouveau véhicule acquis, les opérateurs participants ont dû envoyer à la casse un vieux véhicule en activité, pour lequel ils ont reçu des indemnités unitaires (IBIS 2008).

2.4.1 Organisation du système

L'objectif de ce plan de restructuration était d'encourager les opérateurs à évoluer dans un cadre formel. Il paraissait indispensable d'améliorer la qualité de service et de permettre aux autorités d'avoir un minimum de suivi sur leur activité. Ainsi, seuls les opérateurs agréés avec licences et cartes grises en cours de validité ont été autorisés à s'organiser en GIE. Les participants ont été obligés de conclure un accord de concession avec le CETUD, avec qui ils ont spécifié les itinéraires à suivre, le nombre de véhicules à mettre en circulation, les tarifs, et certaines pratiques opératoires importantes. En particulier, ils ont dû s'engager à utiliser et à respecter les arrêts d'autobus officiels, à ne plus dévier leurs itinéraires, à utiliser les sections officielles (définies par le CETUD), à émettre des billets à tous les passagers. L'accord donnait au CETUD le droit de surveiller la disposition de service et exigeait des opérateurs l'accès aux données opérationnelles et financières.

En encourageant les chauffeurs à abandonner leurs pratiques informelles, le programme de restructuration a paradoxalement réduit les formes de flexibilité que l'on pouvait observer dans le fonctionnement des opérateurs de « cars rapides ». Les minibus de l'AFTU offrent aujourd'hui un service relativement régulier. Les départs de véhicules sont planifiés, avec des cadences définies en fonction des créneaux horaires. Néanmoins, les opérateurs gardent la possibilité de s'adapter à l'évolution de la demande de mobilité sur le long terme, en modifiant ou en adaptant les itinéraires, en accord avec le CETUD. Au moment du lancement du programme, le Plan des Déplacements Urbain de Dakar (PDUD) étant en cours d'élaboration, les opérateurs se sont principalement basés sur la connaissance de terrain de leurs chauffeurs et les itinéraires ont été plus ou moins calqués sur les trajets déjà connus des « cars rapides » (qu'ils devaient remplacer). Un article de la presse sénégalaise a récemment retenu notre attention (Ndiaye & Bampoky 2010). Il relate qu'en décembre 2010, lors du lancement des nouveaux véhicules (de marque King Long), on pouvait apercevoir à Dakar une flotte de minibus qui circulait à la recherche de clients, sans itinéraires ni arrêts fixes. Selon l'article, les propriétaires ont demandé aux chauffeurs de trouver eux-mêmes de nouveaux itinéraires rentables, en parcourant la ville à la recherche de clients. Bien évidemment, cet événement a créé de nombreux problèmes de circulation et des contestations de la part des autres opérateurs de transport.

En novembre 2007, on comptait 18 itinéraires en service, employant 341 autobus. Depuis, de nombreuses lignes se sont ajoutées, desservant des espaces jusqu'alors mal desservis par les autres modes. Certaines lignes ont aussi disparu, mais globalement, le réseau de l'AFTU s'est considérablement élargi en 10 ans. On comptabilise aujourd'hui une trentaine de lignes. Le service, très étalé en ville et en banlieue est constitué de lignes assez courtes, mais bien connectées entre elles. Le service est très dense sur les principaux axes de la ville, et malgré les combinaisons intermodales, les véhicules circulent bien remplis en période de pointe. Dans beaucoup de cas, les itinéraires fonctionnent en parallèle aux services fournis par Dakar Dem Dikk, avec des lignes davantage transversales et souvent plus courtes. L'analyse des données fournies par les opérateurs a montré qu'en 2008, la distance moyenne des itinéraires était de 19 km contre 30 km pour Dakar Dem Dikk (IBIS 2008). Aussi, on a pu constater que les minibus de l'AFTU s'accordaient davantage de liberté comparés aux autocars DDD. En effet, certains arrêts normalement desservis par Dakar Dem Dikk sont ignorés par les minibus, car jugés trop contraignants. Il existe, par exemple, des arrêts sur la voie de dégagement nord (VDN) qui obligent les bus à sortir de la route en empruntant des échangeurs (cf. illustration 11) et à

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

s'engager dans des ronds-points régulièrement bloqués par la congestion en période de pointe. La desserte de ces arrêts représente donc une perte de temps considérable pour les clients et les chauffeurs. De plus, la petite taille des véhicules leur permet de s'arrêter à des arrêts non aménagés, mais très fréquentés par les clients, et donc très rentables.



Illustration 11 : un échangeur de la VDN (au dessus) au croisement avec « l'ancienne piste »

(Source : <http://www.groupecse.com>).

Les services fonctionnent approximativement de 6 h 30 du matin à 21 h. Initialement, l'intervalle de service prévoyait 5 minutes aux heures de pointe et de 10 minutes aux heures creuses. Aujourd'hui, l'intervalle se situe à 10 min en heure de pointe et 30 min, en heure creuse (CUREM 2012b), ce qui permet d'effectuer en moyenne environ 4 voyages aller-retour par jour. Les fréquences de passage sont parfois très disparates d'une ligne à l'autre, car elles dépendent en réalité de la rentabilité de l'itinéraire et des investissements du GIE.

En plus d'améliorer la qualité de service, le programme de renouvellement avait pour objectif d'assurer un suivi financier minimum des opérateurs. Pour ce faire, les GIE emploient des receveurs qui travaillent à bord des véhicules. Ils sont chargés de vendre les billets aux clients en cours de route. Les prix sont fixés au préalable, en accord avec le CETUD. Le montant dépend du nombre de sections traversées au cours du voyage. Initialement, les tarifs étaient échelonnés en 7 tranches, partant d'un plancher de 100 FCFA (du centre-ville) et pouvant atteindre jusqu'à 225 FCFA pour rejoindre Rufisque (la banlieue lointaine). Aujourd'hui, les prix ont un peu augmenté à cause de l'augmentation du prix du carburant. En accord avec le CETUD, l'augmentation à été fixée à 50 FCFA environ par ticket. En 2008, des enquêtes ont pu montrer que pour la plupart des déplacements, il était moins coûteux de voyager avec les minibus de l'AFTU, ceci grâce au respect des sections officielles par les opérateurs.

2.4.2 Le matériel roulant et les équipages

Le service de l'AFTU est aujourd'hui constitué d'une flotte d'environ 500 minibus, d'une vingtaine de places assises et d'une quinzaine de places en position debout, nombre qui peut augmenter en période de pointe (Kumar & Diou 2010). Grâce à leur taille compacte, ces minibus sont bien plus rapides que les bus DDD, et que les « cars rapides », maintenant anciens et en mauvais état. Les premiers minibus à avoir été mis en circulation sont ceux de la marque Tata Motors (cf. illustration 12). Bien qu'étant neufs à leur lancement, ces véhicules sont aujourd'hui dégradés. Leur état semble être très dépendant des parcours pratiqués. Les véhicules s'usent par exemple beaucoup plus rapidement en banlieue qu'en centre-ville, car la chaussée est accidentée. Le plus souvent, on constate des vitres brisées, un dysfonctionnement des portes coulissantes et un affaiblissement des amortisseurs. Tout cela génère des problèmes de sécurité, d'autant plus qu'en période de pointe, ces véhicules circulent en état de surcharge.



Illustration 12 : un minibus de marque Tata Motors.

(Source : <http://blog.sustainablecities.net/2011/06/14/dakar-public-transit-choose-your-way/>)

La deuxième catégorie de véhicules rassemble des bus de marque chinoise (King Long) (cf. illustration 13). Ils sont un peu plus spacieux que les TATA et plus modernes, ce qui les rend sensiblement plus confortables. Introduits dans le réseau il y a quelques années seulement, les ils sont aujourd'hui dans un état relativement correct (sauf cas particulier).



Illustration 13 : les récents minibus de marque King Long.

(Source : <http://blog.sustainablecities.net/2011/06/14/dakar-public-transit-choose-your-way>)

Avec le plan de restructuration, les autorités ont aussi essayé de rendre les opérateurs davantage responsables de leur service et de les sensibiliser aux lourds problèmes d'insécurité qui pèsent sur le secteur. Les conducteurs ont bénéficié de formations sur les relations avec la clientèle, sur l'importance de suivre les itinéraires et d'utiliser uniquement les arrêts officiels, sur l'entretien des véhicules et sur la sécurité routière. En 2008, le CETUD déclarait que 420 conducteurs et 35 receveurs avaient été formés, i.e. une majorité des équipages en activité. Néanmoins avec l'augmentation récente des opérateurs, des lignes et donc des équipages, il est délicat d'assurer un suivi rigoureux de ces formations, notamment pour les nouveaux employés.

Les conducteurs sont payés autour de 100 000 FCFA (150 €) par mois, ce qui est plus que ce qu'ils pourraient espérer dans d'autres opérations de transport (telles que le camionnage ou l'emploi privé), mais inférieur à ce que reçoivent les conducteurs des « cars rapides ». Les receveurs, quant à eux, sont payés autour de 65 000 FCFA par mois. Un seul équipage est employé par jour. Le service journalier comprend 15 heures de travail et ils travaillent 5 jours par semaine, ce qui donne une idée de l'état de fatigue des chauffeurs.

2.4.3 Esquisse de bilan

D'après les rapports officiels, les premiers bilans concernant le service de l'AFTU sont assez positifs. La qualité de service s'est assurément améliorée, à la satisfaction du grand public. Les opérateurs respectent en général les horaires de départ et n'attendent pas que les autobus soient remplis pour partir. Les chauffeurs s'arrêtent moins souvent et favorisent les arrêts officiels. Les voyages sont donc plus rapides malgré les problèmes de congestion auxquels restent confrontés

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

tous les services. Le réseau de l'AFTU est aujourd'hui étendu sur toute l'agglomération, ce qui a permis de désenclaver certains espaces autre fois desservis uniquement par les opérateurs informels (« cars rapides », taxis « clandos », etc.). Les coûts globaux au passager sont légèrement plus bas qu'avec les cars informels, car les équipages n'extorquent plus des paiements complémentaires et le principe de sectionnement des prix est scrupuleusement respecté. Pour toutes ces raisons, les minibus de l'AFTU offrent un rapport qualité/prix très intéressant, ce qui explique leur popularité croissante. En témoignent l'augmentation du nombre de lignes et le taux de remplissage très souvent élevé des véhicules. Les illustrations suivantes mettent en exergue cette forte utilisation du service par les dakarois (cf. illustration 14) et encore plus par les habitants de la banlieue. L'illustration 15 montre que pour un itinéraire en banlieue (ligne 52) le véhicule est en état de surcharge sur la majorité du parcours, en heure de pointe comme en heure creuse.

Nombre de passagers en heure creuse ; nombre de passagers en heure pleine ; capacité des véhicules

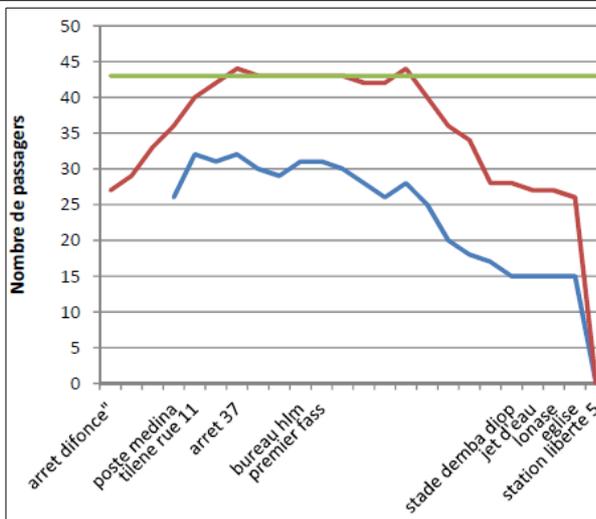


Illustration 14 : exemple de l'évolution du nombre de passagers pour un itinéraire au centre de Dakar (CUREM 2012b)

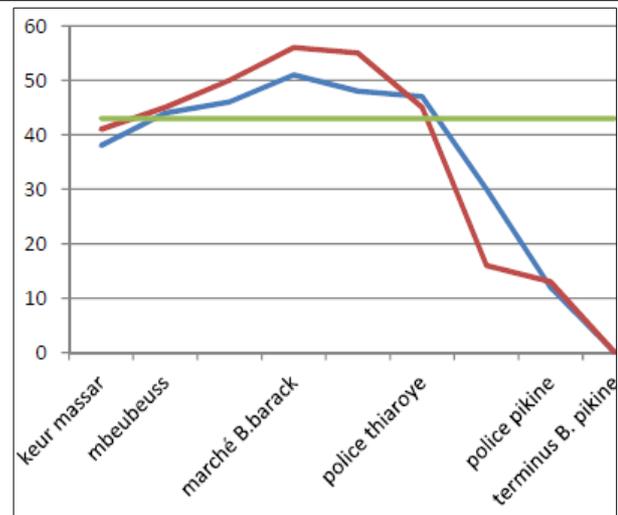


Illustration 15 : exemple de l'évolution du nombre de passagers pour un itinéraire en banlieue (CUREM 2012b)

Le fort taux d'utilisation de ces transports est d'ailleurs devenu un problème majeur pour les opérateurs et les autorités. Les personnes ont tendance à s'entasser bien plus qu'elles ne le faisaient dans les « cars rapides ». Selon les créneaux horaires, les conditions de voyage peuvent donc être extrêmement pénibles. Par exemple, on observe régulièrement en heure de pointe des véhicules en mauvais état et surchargés, avec les portes du véhicule ouvertes pour pouvoir accueillir plus de monde à bord. De plus, en 2008 déjà, les passagers enquêtés affirmaient que la discipline et les bonnes pratiques des chauffeurs avaient tendance à se détériorer (IBIS 2008). Il m'est moi-même arrivé de constater un retour aux pratiques du secteur informel avec, par exemple, des chauffeurs qui changeaient d'itinéraire sans prévenir pour essayer de capter un maximum de clients, ou d'autres qui s'arrêtaient à des endroits dangereux pour prendre ou déposer des clients.

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

Sur le plan financier, le programme d'assistance technique a rencontré des difficultés pour la collecte des données opérationnelles et financières, car peu d'opérateurs se sont montrés disposés à coopérer. Les données comptables sont rares, ce qui rend le suivi par les membres du CETUD délicat. Il semble que l'utilisation de la billetterie ait entraîné une réduction des revenus des équipages, dans la mesure où ils doivent maintenant remettre tous les reçus au propriétaire. En revanche, les données de l'assistance technique et les renseignements fournis par les opérateurs laissent supposer que les revenus perçus par les propriétaires sont beaucoup plus élevés qu'avant (en partie grâce à la réduction des coûts dévolus aux équipages et certains frais officieux qui étaient facturés dans les gares routières, ou par la police). Les bénéfices estimés se situent entre 80 000 et 200 000 FCFA par mois selon les GIE et les itinéraires. Cependant, les coûts totaux sont plus élevés qu'avant, à cause des normes, des coûts d'entretien, et des remboursements des capitaux empruntés. L'augmentation récente du prix du carburant a également réduit la rentabilité des services. En dépit des subventions directes et indirectes, il s'avère que les opérateurs arrivent tout juste à couvrir leurs coûts généraux. On constate notamment que l'état général des véhicules s'est sensiblement détérioré depuis leur introduction, en particulier en ce qui concerne la carrosserie, les feux, les lumières et les pare-brises.

Enfin, il aurait été intéressant d'analyser les conséquences de l'introduction de ce nouveau service sur l'activité des autres modes, qu'ils soient formels ou informels. Le programme n'a pas été conçu pour augmenter la capacité de transport en commun, mais bien pour remplacer l'ancien service. Néanmoins, vu le développement rapide et la popularité du service, il apparaît aujourd'hui que ces minibus ont créé un effet de concurrence important, comme ont pu en témoigner les chauffeurs de taxi (légaux et illégaux) que nous avons interrogés sur place.

2.4.4 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, encadré par l'AFTU et le CETUD
Principe d'organisation	Mixte : haut niveau d'organisation et auto-organisation
Objectif du service	Remplacer les « cars rapides » dans toute l'agglomération
Gestion	Privé : GIE
Objectif de l'opérateur	Rentabilité financière, rationalisation de l'offre
Capacité des véhicules	Semi-collectif (environ 40 places autorisées)
Rapidité	Assez rapide
Tarification	Prix du ticket fixé en accord avec le CETUD (< 400 FCFA)
Sécurité	Assez bonne si la capacité maximale est respectée
Nuisances	Relativement faibles (dépend de l'état du véhicule)
Exemples	Minibus TATA et King Long

Tableau 4 : fiche signalétique du service de minibus de l'AFTU.

Chapitre 3. Les services flexibles semi-collectifs

Dans ce chapitre nous présentons un exemple de service flexible dans leur contexte. Malgré les contrastes, nous pensons qu'ils présentent un certain nombre de similitudes, notamment en termes de fonctionnement. Ce sont tous deux des services souples, typiquement à la demande, avec de réelles capacités d'adaptation. En revanche, les deux systèmes diffèrent sur d'autres points. Ils n'ont pas les mêmes finalités et ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. En France, le Transport à la Demande est soumis à une forte réglementation, il bénéficie d'innovations technologiques et de moyens de financement importants. Au Sénégal, les taxis collectifs exercent en toute illégalité. Ils profitent alors d'une certaine « liberté » de fonctionnement. Ils opèrent en complémentarité ou en concurrence avec les autres modes de transport selon les zones desservies.

3.1 Les transports à la demande (TAD)

Le transport à la demande (TAD) est un transport collectif terrestre de personnes, dont le service est activé seulement à la demande des usagers (Banos & Josselin 1999; Le Breton et al. 2000). Par son fonctionnement, on dit parfois qu'il se situe à mi-chemin entre le transport collectif de masse (de type bus) et le transport individuel (de type taxi). « Né au milieu des années soixante-dix, le transport à la demande (TAD) visait initialement à assurer des dessertes au niveau des zones rurales peu denses et à offrir une alternative de déplacement aux personnes à mobilité réduite » (CERTU 2006).

Depuis plus de 20 ans, les sociétés industrialisées sont confrontées aux problèmes de l'augmentation importante des déplacements, à la dispersion des origines/destinations et à l'accroissement des voitures personnelles en circulation. Tous ces phénomènes ont entraîné un regain d'intérêt pour le transport en commun et ont favorisé l'émergence de nouveaux modes de transport. Des initiatives ont été prises pour sortir du schéma traditionnel des transports et le TAD a pu profiter de cette dynamique. Depuis plus de dix ans en France, et plus largement en Europe, il a donc évolué et a pu se développer sous différentes formes. Aujourd'hui, les TAD investissent de nouveaux territoires, aussi bien dans les réseaux urbains, périurbains que les espaces ruraux. Les prestations qu'ils proposent se caractérisent par une variété d'offre et de fonctionnement, qui pour certains d'entre eux, témoignent d'une innovation technologique (Castex 2007). À l'international, il est aussi possible d'observer une grande variété de services avec « des systèmes empiriques à large portée (de type taxis collectifs) aux « *shuttles* » présents aux États-Unis autour des grandes villes et d'aéroports, intégrant des Technologies de l'Information (GPS et/ou logiciel d'optimisation de trajets) » (Josselin & Genre-Grandpierre 2005).

3.1.1 Définitions

En France, les TAD sont définis dans la Loi d'Orientation de Transports Intérieurs (LOTI). Selon l'article 26 du décret n° 85-891 du 16 août 1985, ce sont des « services collectifs offerts à la place, déterminés en partie en fonction de la demande des usagers et dont les règles générales de tarification sont établies à l'avance, et qui sont exécutés avec des véhicules dont la capacité minimale est fixée par décret » (Ministère du Développement durable 2012). Conformément aux dispositions du décret d'application du 31 décembre 1985, ce seuil est fixé à une capacité

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

supérieure ou égale à quatre places, y compris le conducteur (Legifrance 2013). Le transport à la demande fait partie intégrante des transports publics, et, à ce titre, tombe sous le joug des autorités organisatrices des transports (A.O.T.). Sa singularité réside dans le fait qu'il se veut collectif et qu'il ne fonctionne que sur demande. Il est donc soumis à une réservation préalable, qui doit être passée plus ou moins longtemps à l'avance selon les services.

En complément, Élodie Castex propose dans sa thèse, une définition davantage fonctionnelle du transport à la demande. En France, « tout TAD est marqué par une AOT commanditaire et un exploitant (même s'il arrive que ce soit l'AOT qui assume ce rôle) qui, ensemble, participent à la gestion du TAD. L'espace support et la clientèle visée (restreinte ou non à une catégorie de personnes) contribuent à définir la cible du TAD. Enfin, le fonctionnement du service dépend de l'offre de transport qui conditionne les déplacements possibles en TAD au sein du territoire » (Castex 2007).

3.1.2 Les objectifs du TAD

Le TAD apparaît comme une réponse adaptée aux besoins croissants de flexibilité dans la mobilité des usagers, en zones urbaines et périurbaines. En effet, on observe dans les agglomérations françaises un accroissement de la variété des déplacements et de l'irrégularité des flux. La part des déplacements domicile-travail semble être en baisse dans la mobilité totale au profit d'autres motifs comme les loisirs. On constate des déplacements qui évoluent rapidement, du point de vue des horaires, des origines, des destinations, des itinéraires et qui se singularisent. Tout cela contribue à augmenter la variabilité des déplacements. Avec l'évolution des rythmes de vie et la forte dépendance automobile, il devient donc nécessaire de promouvoir des transports publics plus souples, capables de s'adapter à une mobilité de plus en plus éparse dans le temps et l'espace.

Dans son rapport de 2006, le CERTU a répertorié six objectifs du TAD :

- fournir une offre de transport dans les zones rurales isolées ;
- fournir une complémentarité aux transports en commun réguliers (soit complémentarités spatiales soit remplacement de lignes régulières en heures creuses) ;
- participer au désenclavement de certains quartiers inscrits dans la politique de la ville (objectif social) ;
- desservir les équipements/zones particuliers ;
- subvenir aux besoins de mobilité de la clientèle PMR ;
- subvenir aux besoins d'une « clientèle de nuit ».

De plus, à l'heure où l'on parle de façon récurrente d'intermodalité, « les TAD apparaissent comme un maillon possible d'une chaîne de déplacements multimodaux. Ils introduisent aussi, d'une certaine façon, le concept de transport public collectif individualisé » (Josselin & Genre-Grandpierre 2005). En effet, si plusieurs voyages sont combinés en utilisant un véhicule avec plusieurs sièges (monospaces, minibus), le service commence à entrer dans le champ du transport collectif à la demande, même si le service ne fonctionne pas en porte-à-porte. Le fait de transporter simultanément plusieurs voyageurs entraîne une baisse du coût par voyage. Si une autorité organisatrice finance le service (par exemple pour des raisons sociales), elle tentera

d'optimiser le service afin de minimiser les coûts. Une autorité locale peut soutenir de tels services, car ils représentent une alternative aux taxis conventionnels et contribuent aux économies d'énergie, à la limitation de la congestion grâce à la réduction de l'usage de la voiture individuelle (CERTU 2006).

3.1.3 Les différents types de TAD et leur mode de fonctionnement

On observe aujourd'hui une grande variété de transport à la demande en France. Sa remarquable progression ces dernières années permet désormais de toucher tous les types d'espace (urbains, périurbains, ruraux). Les autorités semblent reconnaître qu'il est réducteur de le cantonner à un seul type de milieu comme cela a été fait par le passé. Le transport à la demande présente désormais une large gamme de prestations s'adressant à un public varié. Néanmoins, la flexibilité n'est pas prédominante contrairement à ce que l'on pourrait penser.

Une analyse de 153 transports à la demande a permis de définir une typologie de l'offre proposée à cette époque (Banos & Josselin 1999). Les variables retenues pour élaborer cette classification étaient (i) les contraintes spatio-temporelles (principe de liaison, niveau de souplesse des arrêts et des horaires, type d'espace géographique desservi) ; (ii) le système opérant (population cible, type de transporteur réalisant le service, positionnement par rapport aux autres services, type de véhicule utilisé, mode de tarification) ; et (iii) l'efficacité (taux de couverture financière Recettes/Dépenses ou R/D, déficit Recette-Dépenses ou R-D, taux de remplissage des véhicules). Pour notre part, nous distinguons les TAD selon leur degré de souplesse en identifiant quatre niveaux de flexibilité.

Niveau 1 : les systèmes proches des transports collectifs classiques, mais avec des dessertes réalisées par des véhicules semi-collectifs.

Ce niveau constitue le degré \emptyset de l'innovation. Les services concernés sont à l'extrême limite de la définition du TAD. En effet, les arrêts sont fixes (plus ou moins ceux des lignes de bus), les horaires de passages également, les tarifs sont identiques à ceux du réseau de transport en commun. Ces services se substituent souvent aux lignes de bus qui présentent des taux d'utilisation trop faibles et des coûts d'exploitation trop élevés. Ils correspondent souvent à des logiques de rabattement de clients sur le réseau de transport public principal (e.g. Buxi à Montbéliard).

Niveau 2 : les TAD relativement flexibles utilisant des lignes virtuelles, créées suite à une réservation préalable.

Pour ces services, la ligne est activée dans son ensemble par une unique demande nécessaire et suffisante, avec une séquence d'horaires et d'arrêts fixes. Le service est donc bien à la demande, mais la flexibilité est toujours relativement faible. Les expériences relevées correspondent essentiellement à des logiques de substitution. Il s'agit là aussi de remplacer un bus par des taxis ou des véhicules légers en zones peu denses ou en milieu périurbain. Sous ses différentes formes, ce type de systèmes correspond à une part importante de TAD en Europe (environ un tiers des services en 2007, (Castex 2007)) (e.g. TAXITUB à Saint-Brieuc, France).

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

Le pouvoir d'*ubiquité*⁹ des TAD à ce niveau est généralement faible, de même que son *immédiateté*¹⁰ puisque l'on oblige le client à réserver à l'avance (souvent la veille). L'*instantanéité*¹¹ est sensiblement identique à celle d'une ligne de bus régulière, même si elle s'améliore à cause du faible taux de pénétration de ces services. En revanche, on assiste souvent à une baisse sensible de l'*informativité*¹² : le client n'a pas la certitude du passage du véhicule même en connaissant les horaires *a priori*, sauf si lui-même déclenche le service. Le point fort du service est la continuité lorsqu'il est utilisé seul (Castex & Josselin 2007).

Niveau 3 : les services sans horaire fixe et sans ligne virtuelle.

Dans ce cas, les itinéraires sont créés en fonction de la demande, grâce à une centrale de réservation et des logiciels d'optimisation de plus court chemin (Garaix 2007; Chevrier 2008). Ces systèmes de TAD proposent des services nettement plus attractifs pour les voyageurs et l'efficacité, au regard des exigences de la mobilité, est généralement améliorée. Ils présentent une forte ubiquité, grâce à une forte densité de points de prise en charge et une certaine souplesse des chauffeurs qui peuvent acheminer les usagers jusqu'à la porte du domicile. En revanche, l'immédiateté est relativement faible, car bien souvent il est indispensable de réserver son voyage la veille du départ. L'instantanéité peut être considérée comme moyenne. Elle va dépendre en réalité des procédures d'optimisation des tournées et des résultats obtenus. L'*informativité* nous semble supportable puisque le syndicat mixte s'engage à réaliser le service sur une période importante de la journée (obligation de service). Enfin, la continuité¹³ est importante puisque le client est pris en charge à proximité de son point de départ et déposé quasiment au lieu de destination (desserte en porte-à-porte. Il ne change donc que rarement de véhicule. Certains services fonctionnent aussi en convergence vers un (ou plusieurs) générateur (s) de flux (gare, zone industrielle, etc.). Les sociétés de transport et les compagnies de taxis se partagent la réalisation de ces services, parfois complémentaires aux services publics, suivant des tarifs spécifiques adaptés aux conditions locales (e.g. Ginko Gare à Besançon). Pour ce type de système, les véhicules utilisés sont généralement des minibus. On peut faire aussi appel à des taxis sous-traitants.

Le transport à la demande « Tadou » qui est un TAD point à point dans le Pays du Doubs Central (120 communes, environ 30 000 habitants) est un bon exemple (Garaix et al. 2007). « Dans cette fédération de communautés de communes, seuls les transports scolaires et les taxis innervaient le tissu rural. Le Pays a mis en place en 2005-2006 un TAD tout public desservant toutes les communes sur la base d'un semis d'arrêts très dense. Aucune ligne n'est définie *a priori*, les trajets et l'assignation des véhicules (taxis en l'occurrence) sont optimisés jour après jour » (Castex & Josselin 2007).

9 L'*ubiquité* est la capacité d'un service à être disponible et présent en tout point de l'espace indépendamment du temps (Dupuy 1991).

10 L'*immédiateté* est la capacité d'un service à être disponible sans délai et sans intermédiaire (Dupuy 1991)

11 L'*instantanéité* est la capacité d'un service à être rendu à destination sans délai (Dupuy 1991).

12 L'*informativité* est la « propriété d'un support, d'une technologie ou d'un service à émettre une information dont le récepteur ou l'utilisateur peut s'emparer aisément pour améliorer ses connaissances et sa capacité de décision » (Castex & Josselin 2007)

13 « La *continuité* comme nous l'entendons, mesure la capacité d'un service à interconnecter efficacement une série de modes ou de véhicules. Elle se traduit en temps » (Castex & Josselin 2007)

Niveau 4 : les TAD très souples proposant une desserte point à point en quasi temps réel.

Cette dernière catégorie de système vise à atteindre des niveaux élevés d'efficacité et concurrencer sérieusement l'automobile. L'objectif est de fournir au service une grande souplesse d'utilisation tant au niveau spatial, qu'au niveau des réservations et ainsi se rapprocher le plus possible des avantages du véhicule personnel. Pour ce faire, on a recours à des technologies avancées comme la géolocalisation des entités mobiles, l'utilisation de réseaux de communication sans fil, etc. Un état des lieux du transport à la demande au États-Unis montre qu'en 2005 déjà de nombreux systèmes opérationnels avaient tendance à s'orienter vers des solutions de réservations en temps réel (Desiderio 2005). Aujourd'hui, plusieurs services souples avec des délais de réservations très courts existent. L'université de Maryland (US), par exemple, propose un service de TAD point-à-point réservé aux étudiants et au personnel de l'université. Le service de réservation en ligne (*Paratransit Application*¹⁴) leur permet de réserver des courses une heure à l'avance. En France, le service Flexo Mégarama¹⁵ de Montbéliard permet aux cinéphiles d'assister à la dernière séance et de les reconduire après à l'arrêt le plus proche de leur domicile. Avec ce système l'itinéraire est créé dynamiquement à chaque fin de séance en fonction de la demande des clients. De nos jours, que ce soit en Europe, en Asie, en Amérique du nord et du sud, de nombreuses équipes de recherche mettent au point des méthodes de gestion et d'optimisation de tournées toujours plus dynamiques (Zargayouna & Zeddini 2012; Enrique Fernández L. et al. 2008; Wong et al. 2012; Sadeh & Kott 1996).

Pour illustrer un peu plus cette catégorie de service, nous présentons ici le prototype de TAD dynamique initialement proposé en 2005 (Josselin & Genre-Grandpierre 2005) et développé dans le projet ANR Modulobus (Guillas & Josselin 2012). Le Modulobus est l'idée d'un taxi collectif qui optimise ses trajets en permanence en fonction de la demande. C'est donc un transport à la demande souple, modulaire et réactif, qui vise à la fois à répondre au mieux à la demande et à regrouper les voyageurs dans les véhicules.

La modularité du Modulobus se traduit à différents niveaux (cf. illustration 16) :

- « réservation du service sans délai : seule la disponibilité des véhicules et des places contraint le service (recherche de réactivité) ;
- horaires et lieux de prise en charge : le service peut être utilisé à tout moment et en tout point, sans horaires ni lieux prédéfinis (recherche d'ubiquité) ;
- regroupement de passagers : le TAD optimise les trajets en regroupant « à la volée » les usagers dans les véhicules, tout en respectant les « contrats » de niveau de service passés avec chaque usager (temps maximal d'attente et de trajet) (recherche d'efficacité économique) ;
- choix entre des alternatives : le système propose, dans la mesure du possible, pour un même trajet, des alternatives de prix, de temps de trajet et de types de véhicules en termes de rapidité, de confort, de prestations (recherche d'adéquation à la demande) ;
- variabilité de la tarification : le prix est calculé en fonction de la rentabilité économique immédiate du véhicule et du taux de remplissage, des temps de trajet et des modalités de

14 <http://www.transportation.umd.edu/paratransit.html>

15 <http://www.ctpm.fr/fr/accueil/arborescence-principale/pratique/lignes-de-bus-plans-services-specifiques/flexo-megarama.html>

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

prise en charge et de l'effort de partage du transport par les clients (incitation au regroupement volontaire) » (Josselin & Genre-Grandpierre 2005).

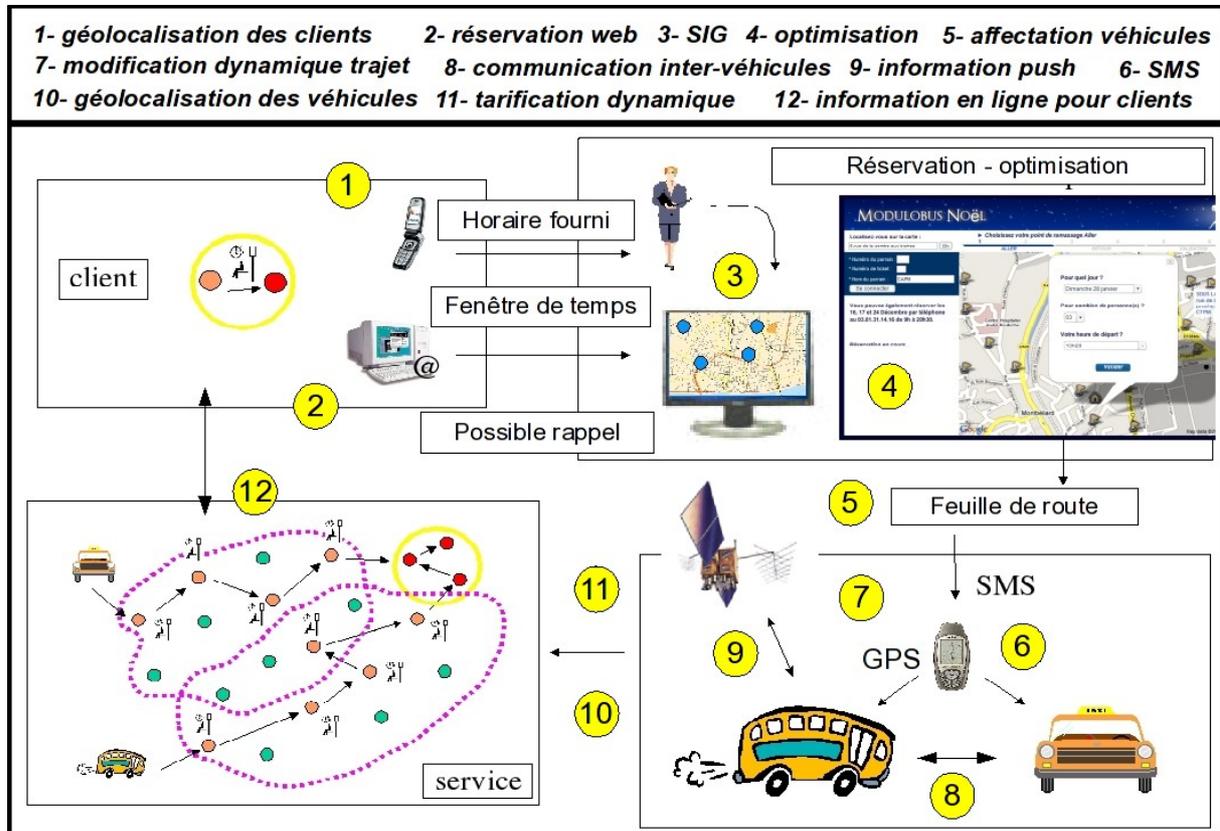


Illustration 16 : fonctionnement du prototype Modulobus (Guillas & Josselin 2012)

Un système de transport dynamique très proche du concept du Modulobus à été modélisé au cours de cette thèse. Il reprend les quatre premier niveaux de modularité présentés ci-dessus. Seul le coût et la tarification variable n'ont pu être pris en considération. En revanche, nous avons pu approfondir le principe d'interaction entre clients et véhicules. Dans nos simulations, les deux entités mobiles peuvent communiquer. Nous détaillons le fonctionnement du modèle dans la deuxième partie et nous présentons tout un ensemble de résultats de simulation dans la dernière partie.

« Le Modulobus tente de se rapprocher des avantages avérés de l'automobile personnelle. Il demeure un moyen de transport collectif (individualisé, car proche de la demande du client) et fait donc partie des transports publics à part entière.

L'enjeu est triple :

- remplir au maximum les véhicules en minimisant les distances parcourues et les coûts, dans un cadre de fonctionnement dynamique (objectif d'efficacité) ;
- rendre le mieux possible le service demandé (objectif de qualité de service) ;

- réduire le nombre maximum des véhicules roulant et par voie de conséquence les gaz à effet de serre (objectif environnemental) » (Guillas & Josselin 2012).

3.1.4 Les centrales de réservation

Les centrales de réservation (centres d'appel) pour les TAD ressemblent souvent à celles utilisées par les opérateurs de taxis. Leurs principales fonctions restent la réservation des tournées, la planification des courses, le suivi clientèle, la gestion de la flotte (avec parfois des outils de cartographie et de géolocalisation) et la facturation du service. Dans certains cas, les opérateurs ont recours à des logiciels spécifiques, développés en interne ou par une société spécialisée (e.g. Prorentsoft¹⁶) ayant pour objectif de mieux optimiser le fonctionnement et la gestion du service. Ces logiciels d'optimisation (noyaux d'optimisation) peuvent prendre en compte plusieurs critères selon leur niveau de complexité. Les objectifs demeurent la maximisation du remplissage des véhicules, la réduction des distances parcourues, la minimisation des coûts d'exploitation et des coûts d'utilisation. Des travaux visent aussi à évaluer les performances environnementales de TAD (Prud'homme et al. 2011; Prud'homme et al. 2012).

L'illustration 17 présente les quatre composantes d'une centrale de réservation et leur fonction au sein du système. Nous expliquons ici les fonctionnalités les plus répandues sur le marché, même si elles ne sont pas toujours toutes présentes au sein d'un même service.

1. L'opérateur se situe à l'interface entre les usagers et le service. Il gère la saisie des réservations et de leurs caractéristiques (adresses de prise en charge et de dépose des clients, temps de prise en charge, type de facturation, handicaps, etc.). Les réservations peuvent être réceptionnées par une personne, via un serveur vocal interactif ou via internet.

2. La plate-forme informatique permet à la fois de stocker et d'organiser les réservations et les fiches clients dans un serveur. Elle a aussi pour fonction le calcul des itinéraires optimaux via un noyau d'optimisation qui va calculer les plus courts chemins selon différentes contraintes (horaires, coûts, temps de parcours, etc.).

3. Le gestionnaire se situe à l'interface entre le service et les transporteurs. Chaque véhicule est identifié (dépôt, affectation à des zones géographiques, mode de transmission des courses, horaires de service, capacité du véhicule, configuration de l'espace véhicule, type de véhicule, etc.). Suite au calcul des itinéraires optimaux, il va identifier et informer les chauffeurs de leur emploi du temps en fonction des feuilles de route générées. Il est aussi souvent responsable de la facturation du service.

4. Enfin, une dernière composante, qui devrait se développer dans les années à venir, concerne les suivis statistiques (clients, véhicules, réseau de transport, réservations, temps de parcours, kilométrages, etc.) et surtout le suivi cartographique, qui nécessite des logiciels de localisation GPS et des systèmes informatiques embarqués. L'objectif est au minimum de visualiser la zone de couverture du service grâce au géo-codage des arrêts, et, dans le meilleur

16 <http://www.prorentsoft.com/fr/index.php>

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

des cas, de connaître en temps réel la localisation des entités mobiles et d'évaluer les temps de parcours. Certaines de ces technologies ont pu être mises en œuvre avec le projet Modulobus et nous pensons qu'elles sont indispensables pour proposer à l'avenir des modes de transport réellement flexibles.

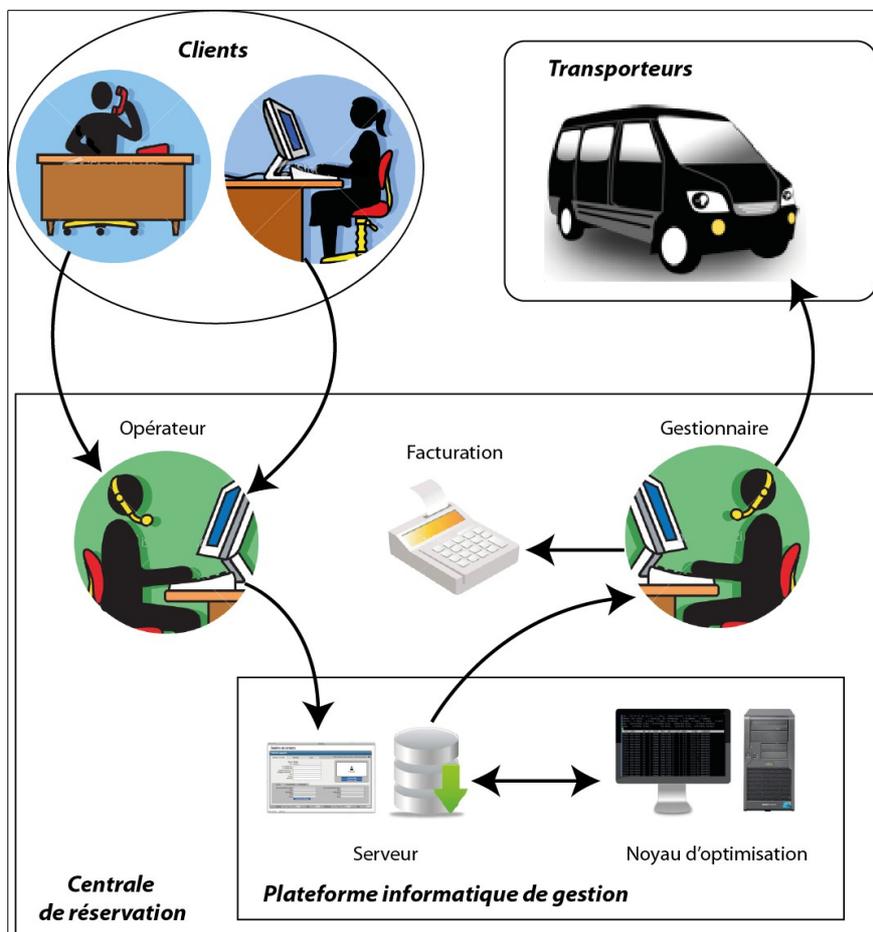


Illustration 17 : fonctionnement d'une centrale de réservation pour les TAD.

Les centrales de réservation permettent aux entreprises d'optimiser leurs services afin de répondre le mieux possible à la demande des clients. En particulier, pour le transport de PMR, il est possible, avec les logiciels de gestion, d'intégrer un grand nombre de paramètres individuels et ainsi de fournir une réponse individualisée pour une meilleure qualité de service. Le but est aussi de bénéficier d'une bonne gestion du service et de fournir une information précise aux usagers, fondamentale pour maintenir une bonne qualité de service. Le recueil de données statistiques a aussi pour objectif de mieux cerner les besoins des clients et de leur proposer des services (amplitude horaire par exemple) mieux adaptés aux déplacements. « L'enquête nationale des TAD révèle que 17 % des services de TAD ruraux et périurbains utilisent actuellement des logiciels de gestion » (CERTU 2006). On peut néanmoins espérer que la croissance des services, le besoin d'optimisation dans la gestion et la compétition entre les modes de transport engendreront une utilisation accrue de ces systèmes.

3.1.5 Quelles perspectives pour le TAD en France ?

Porteur d'innovations technologiques, le transport à la demande est un moyen moderne de s'adapter aux nouvelles exigences des populations. L'objectif est d'améliorer la réponse du transport public à la demande de mobilité et donc de renforcer la place du transport en commun. L'adaptation des véhicules (taille, accessibilité, etc.) et une gestion optimisée du service, grâce à la présence de centrales de réservation et de logiciels de gestion performants, sont autant d'éléments qui montrent les capacités d'adaptation et la souplesse du service. Le TAD constitue une alternative pour assurer le droit au transport en zones peu denses. Il apporte aussi une réponse en zones périurbaines, face à un étalement urbain toujours croissant. Nous pensons qu'il doit être considéré comme une alternative d'avenir qui s'inscrit en complément des lignes régulières, voire en substitution, offrant dès lors au voyageur une gamme de services de mobilité diversifiée. Le potentiel de clientèle est important puisqu'il s'adresse aussi bien aux personnes âgées qu'aux Personnes à Mobilité Réduite (PMR), aux jeunes non motorisés, aux adolescents, et aux actifs (CERTU 2006).

En 2005, dans un premier article permettant de tracer les contours du projet Modulobus Didier Josselin et Cyrille Genre-Grandpierre ont évoqué les principaux atouts des TAD face aux exigences des autorités organisatrices de transports. L'idée qui ressort de leurs travaux est que le TAD propose des perspectives intéressantes pour les aménageurs et les élus. Il a l'avantage d'être relativement facile à déployer sur un territoire. Il est possible de calibrer le service pour répondre à un besoin identifié. Enfin, il présente des coûts adaptables à la fois aux autorités et aux usagers. Néanmoins, pour qu'un service de TAD soit efficace, il est indispensable qu'il y ait un minimum de fréquentation.

Une enquête publiée par l'Union des Transports Publics (UTP) en 2005 a fourni une base de données relativement précises sur les TAD français. Deux ans plus tard Élodie Castex a repris ces chiffres en nous fournissant une analyse intéressante de la situation du TAD en France.

« Pour les réseaux urbains dotés d'un TAD, la fréquentation de ce service par rapport à la fréquentation totale du réseau urbain (au sein du PTU) reste marginale, le TAD représentant en moyenne 0,3 % des voyages [...] Les taux d'usage¹⁷ [...] sont généralement très inférieurs à 1 voyage par an par habitant. Les relations domicile-travail ou spécifiques comme la desserte aéroportuaire ont les taux d'usage généralement les plus élevés [...] le taux de remplissage est inférieur à 2 clients par course, soit une moyenne de 1,9 client pour une fourchette de 1,25 à 3,75 » (Castex 2007)

Suite à cette enquête, le CERTU a publié un état des lieux du TAD en France. Malgré les faibles résultats évoqués ci-dessus, le rapport fait état d'une évolution relativement encourageante de la situation du TAD sur quelques années seulement.

« Les fréquentations observées font apparaître des volumes de clientèle très variables qui généralement ne dépassent pas les 100 000 voyages/an [...] La fréquentation des TAD urbains semble liée à la taille de l'agglomération avec un

¹⁷ Le taux d'usage correspond au nombre de voyages annuels rapporté à la population du secteur desservi

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

saut net de fréquentation moyenne entre les villes de moins de 250 000 habitants et celles de plus de 250 000 habitants [...] Les TAD périurbains sont en très forte hausse de fréquentation, plus 45 % entre 2001 et 2003 (sept cas) et plus 20 % entre 2002 et 2003 (neuf cas), car l'offre de transport régulier ne peut pas toujours couvrir des territoires urbains de plus en plus étendus, notamment au niveau des communes situées en bordure des PTU [...] Même si une bonne part de la clientèle demeure constituée par des personnes âgées et les scolaires, les services de TAD s'adressent de plus en plus fréquemment à l'ensemble de la population. » (CERTU 2006)

Le TAD semble avoir encore du chemin à parcourir, beaucoup de choses restant à faire en termes de transport flexible en France. Nous pensons que ces modes de transport souffrent d'une part d'un manque de connaissance de la part de la population. Celle-ci n'évalue pas toujours très bien les avantages de ce type de service et surtout les désagréments de la voiture personnelle à laquelle on reste finalement toujours très attaché. D'autre part, beaucoup s'accordent sur le fait que les systèmes de TAD doivent encore évoluer et se moderniser en intégrant toujours plus de flexibilité et de spontanéité. Cette avancée semble indispensable pour pouvoir sérieusement concurrencer le véhicule personnel.

3.1.6 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, définis par la LOTI
Principe d'organisation	Haut niveau d'organisation, planification par l'AOT et fonctionnement dirigé par la centrale de gestion ou de réservation
Objectif du service	Compléter les TC, mutualiser les déplacements dans les espaces de faible densité, proposer un service économique, concurrencer la VP
Gestion	Service public avec délégation de service à un opérateur
Objectif de l'opérateur	Répondre au cahier des charges
Capacité des véhicules	Semi-collectif (4 à 30 places environ)
Rapidité	Rapide
Tarifcation	Service public, prix du ticket variable, fixé par l'AOT
Sécurité	Très bonne
Nuisances	Très faible
Exemples	Tadou (Doubs), Filéo (Roissy Paris CDG), Flexo (Montbéliard), Paratransit (Maryland), etc.

Tableau 5 : fiche signalétique des Transports A la Demande français.

3.2 Les taxis collectifs sénégalais

Après avoir présenté les TAD, exemple de transport flexible en France, nous présentons maintenant un système sénégalais également adapté à la demande : les taxis collectifs. Ils se sont développés initialement à la périphérie de Dakar, d'où l'appellation « taxi de banlieue »

(Bertholet 2004). Aujourd'hui, ces taxis se sont imposés dans toute l'agglomération dakaroise (Tremblay & Ndiaye 2008). Ils exercent leur activité partout où ils le peuvent, sans licence officielle, parfois même sans permis de conduire, ni assurance. C'est pourquoi les sénégalais les appellent communément les taxis « *clandos* ». Ils ne sont pas spécifiques au contexte sénégalais. En effet, on trouve un grand nombre de services informels plus ou moins similaires dans les grandes villes d'Afrique noire (Godard 2002; D'hondt 2009; Kassi-Djodjo 2010), en Afrique du Nord avec les taxis inter-cités (Boubakour & Merazga 2006; Le Tellier 2007), et aussi en Asie et en Amérique latine (Barter 1999; Kumarage et al. 2010). La taille et le type de véhicule diffèrent d'un pays à l'autre et ils sont plus ou moins collectifs. Néanmoins, certaines caractéristiques sont similaires, à savoir le faible coût du trajet, la relative rapidité de déplacement, la capacité d'adaptation, mais aussi le risque d'accidents et les nombreuses nuisances associées telles que la congestion, la pollution, le désordre sur la voirie, etc.

3.2.1 Formes d'organisation

Informels et artisanaux, les taxis « *clandos* » ne sont pas soumis à des règles d'organisation strictes. Pourtant, comme c'est souvent le cas avec ce type de service, et contrairement à ce que l'on pourrait penser, le système est relativement bien organisé. Chaque personne (chauffeur, propriétaire, etc.) s'organise du mieux qu'elle peut dans le but de maximiser ses profits. Ce n'est donc pas un système qui fonctionne avec une organisation de haut niveau, mais plutôt grâce à la responsabilité et l'autonomie de chacun des acteurs.

À l'échelle de l'entreprise, nous avons observé trois catégories d'exploitation. (i) Pour la première, une seule personne au minimum est impliquée dans le service. Le propriétaire est donc aussi le chauffeur du taxi. Les véhicules ne nécessitant pas de signe ou d'aménagement particulier, ces chauffeurs utilisent simplement leur voiture personnelle. Très souvent, ce mode d'exploitation est le plus souple et le plus rentable pour les chauffeurs. Certaines personnes font du *clando* temporairement, en vue de devenir *taxi man*¹⁸ ou en attendant de trouver un autre emploi. Mais il semblerait que de nombreux chauffeurs opèrent de cette manière depuis plusieurs années. (ii) Une deuxième catégorie d'exploitation concerne les propriétaires de véhicule qui emploient un chauffeur. Les deux personnes se mettent d'accord pour garantir la rentabilité de l'investissement du propriétaire et un salaire minimum pour le chauffeur. Généralement, le chauffeur utilise en permanence le véhicule, il en est responsable et le propriétaire attend simplement son versement quotidien. (iii) Enfin, pour les exploitations de plus grande taille, trois personnes ou plus sont impliquées : un propriétaire peut acheter plusieurs véhicules et employer plusieurs chauffeurs. Ce système ne semble pas être le plus fréquent, car il nécessite de grosses capacités de financement et il augmente les chances de rencontrer des problèmes. En dehors des chauffeurs et des propriétaires, d'autres acteurs peuvent être impliqués dans le fonctionnement des taxis clandestins, comme les chauffeurs suppléants. Ils permettent d'assurer un fonctionnement en continu des véhicules et de maximiser sa rentabilité. Généralement, les chauffeurs cherchent à gagner assez d'argent pour payer le versement au propriétaire et le carburant, puis se partagent le reste. Cette pratique pourrait être considérée comme « de l'informel dans l'informel ». Elle témoigne en fait de l'importance de l'entraide au sein de la société sénégalaise, car les suppléants sont généralement des proches à la recherche d'un emploi ou des chauffeurs momentanément dépourvus de véhicule.

18 Généralement on emploie le terme de *taxi man* pour les chauffeurs de taxis jaunes et noirs (légaux)

3.2.2 Fonctionnement des « garages »¹⁹

Même si les chauffeurs travaillent de manière artisanale, il est possible d'analyser leur fonctionnement à un niveau agrégé. Les chauffeurs ont l'habitude de s'organiser en « garage », points de convergence et de rassemblement des taxis (point de départ et d'arrivée). La plupart du temps, ils ne sont pas matérialisés, leur espace n'est pas aménagé. Les véhicules investissent la zone, en se garant sur les trottoirs ou au bord de la route. Ces garages représentent également les points de rencontre entre les clients et les véhicules (cf. illustration 18). Pour les plus organisés, le garage peut être géré par une association de taxis. C'est le cas du garage de « Case-bah » situé aux Parcelles Assainies (cf. 1. annexe 3), un des plus gros carrefours modaux à la frontière entre Dakar et sa banlieue. Pour utiliser le garage, les *taxi man* doivent payer une cotisation. Au cours de notre entretien, le responsable du garage nous a expliqué qu'ils possédaient un compte bancaire avec des règles d'utilisation communautaires. L'argent déposé dans le compte permet d'aider les chauffeurs en difficulté (accident, panne, etc.). Les chauffeurs qui opèrent dans ces garages bénéficient souvent du service des « coxeurs »²⁰. Ces personnes permettent de rassembler les clients et de les regrouper dans les véhicules en fonction de leur destination, et de l'ordre d'arrivée des véhicules. Chaque fois qu'un taxi prend la route, il paye le *coxeur* (entre 50 et 200 FCFA). Les « coxeurs » sont souvent des chauffeurs sans véhicule. Ils travaillent au garage en attendant de pouvoir trouver un véhicule. L'emploi des « coxeurs » est une autre forme d'entre-aide à l'échelle des garages. Pour les chauffeurs les moins organisés, un garage peut simplement être un arrêt pour les véhicules et les clients. Les chauffeurs attendent leur tour pour embarquer les clients. Il n'y a pas de réelle coopération, mais simplement une entente entre les chauffeurs. L'inconvénient de ces garages est que lorsque la police investit les lieux, ils ne peuvent plus travailler. C'est le cas du garage de Poste-Fann (cf. 2. annexe 4) en plein centre-ville qui est régulièrement bloqué, car situé à proximité de bâtiments ministériels. Les garages organisés en association ont généralement moins de problèmes avec la police, car ils sont plus structurés et mieux ancrés dans leur territoire. Il semblerait d'ailleurs que certains policiers investissent dans les taxis clandestins, ce qui permet aux conducteurs et aux garages d'être protégés.

19 Un garage de « clandos » est un espace où les véhicules se rassemblent pour attendre les clients. Ce sont donc les lieux de départ et de destination des chauffeurs et des clients. Ils constituent en quelque sorte des gares routières informelles dédiées aux « clandos ». Ils sont localisés un peu partout dans l'agglomération, sur des points stratégiques du réseau.

20 « Les « coxeurs » sont des acteurs du transport qui officient dans les gares routières et au niveau des arrêts où ils monnaient leur service en procédant au remplissage des cars » (Seck, 2006)

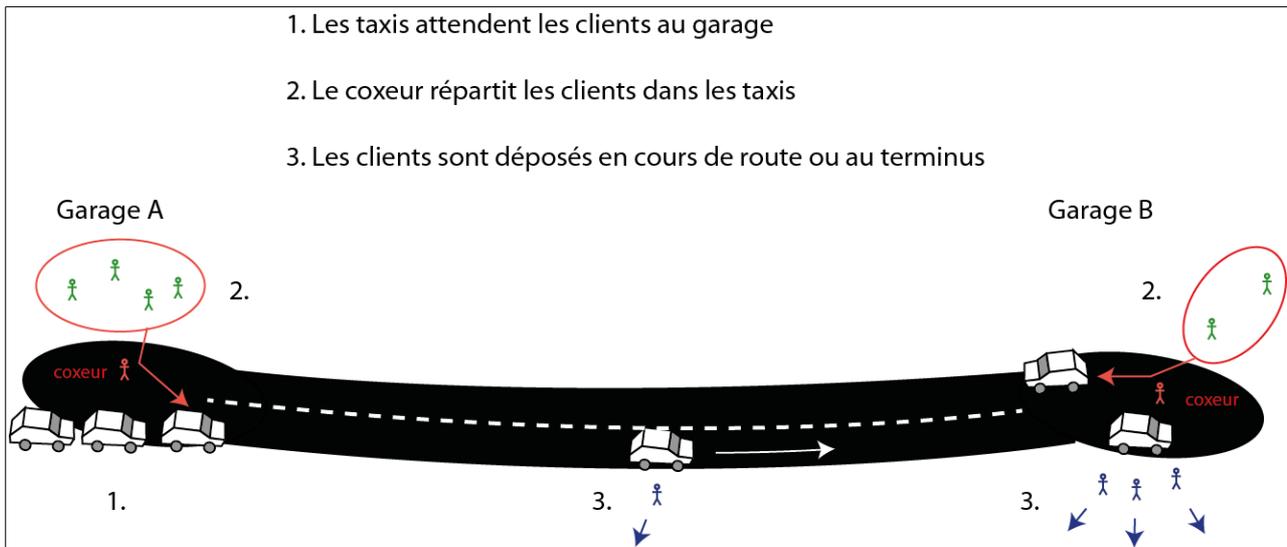


Illustration 18 : le fonctionnement des garages de « clandos ».

3.2.3 La couverture spatiale du service

A priori, un taxi « clando » peut accepter une course vers n'importe quelle destination, tant que le chauffeur et le(s) client(s) s'entendent sur le prix. Ils n'ont pas vraiment de contrainte dans leur itinéraire. Que ce soit en centre-ville ou en banlieue, ils peuvent desservir n'importe quel espace, même si les autorités publiques voudraient les contenir en banlieue. Les itinéraires sont donc relativement étalés à l'échelle de l'agglomération. Ils opèrent en concurrence, là où les autres modes de transport sont insuffisants, ou bien en complémentarité, sur les routes non desservies par les autres opérateurs. Leurs tournées sont relativement connues et prédéfinies, non pas parce qu'ils sont contraints, mais parce que les chauffeurs évitent le plus possible de s'engager sur des itinéraires qu'ils ne maîtrisent pas, de peur de compromettre la rentabilité de leurs courses. En effet, de nombreux imprévus peuvent survenir : se faire contrôler par un policier, rester bloqué dans des embouteillages, rouler sur des routes en mauvais état et donc dangereuses. Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait penser, le « clando » n'est pas un transport informel au sens morphologique du terme, car les itinéraires sont très récurrents et bien structurés. Les chauffeurs vont donc systématiquement chercher des lignes assez peu variables et surtout rentables. Il y a toujours des points de départ et d'arrivée : les garages, et les chauffeurs changent de route seulement en cas d'obligation. Les axes desservis et la localisation des garages sont bien connus par la population, ce qui est fondamental pour l'optimisation du système.

3.2.4 Les pratiques et la forme des tournées au niveau local

Bien qu'elle soit peu variable sur le temps long, la forme des tournées est ajustable et elle diffère selon les zones desservies. L'avantage de ce transport collectif est justement de pouvoir facilement s'adapter aux besoins de déplacement des citoyens. Ainsi, certains trajets, notamment en centre-ville, peuvent être très courts (moins de 10 minutes), par exemple le trajet au départ de la Poste de Fann (cf. 2. annexe 4) et à destination de l'École Supérieure Polytechnique (ESP) (cf. 3. annexe 4) de Dakar. Ce type de trajet s'effectue généralement sur de petits axes à l'intérieur des quartiers, en complémentarité ou en concurrence avec d'autres modes. Les taxis attendent au garage que le véhicule soit plein, puis ils rejoignent le garage de destination pour déposer

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

généralement la totalité des clients (certains peuvent descendre en cours de route). Les trajets des « clandos » peuvent aussi être relativement longs, par exemple les taxis partant de Case-bah (proche banlieue de Dakar : cf. 1. annexe 4) en direction de la commune de Guediawaye (banlieue lointaine de Dakar : cf. 4. annexe 4). Les longs trajets s'effectuent davantage sur les gros axes. Ils sont quasiment toujours en concurrence avec les autres services, qu'ils soient collectifs ou non, autorisés ou non. Au cours de ces trajets, le chauffeur peut partir du garage à vide, car il sait qu'il va déposer et reprendre d'autres clients en cours de route. Cette pratique est appelée la « maraude »²¹, elle permet aux clients d'utiliser les « clandos » avec autant de spontanéité que les taxis légaux. Pour prendre un taxi « clando », il suffit de se mettre au bord de la route et de faire un signe de la main au chauffeur pour que ce dernier s'arrête (cf. illustration 19). D'après nos entretiens, même si tous les chauffeurs ont insisté sur le fait qu'ils travaillent sur des itinéraires fixes, certains d'entre eux ont aussi indiqué qu'ils peuvent, en complément de leur desserte habituelle, desservir certains lieux, soit spontanément, soit pour des événements particuliers. Par exemple, un des chauffeurs de la banlieue nous a signalé qu'il passait régulièrement devant la discothèque proche du garage pour embarquer ou déposer des clients. Mais ce genre de pratique est très ponctuel, et en général les chauffeurs ne s'aventurent pas sur des dessertes risquées, comme les grands rassemblements politiques, les événements sportifs, car le risque de rencontrer des difficultés est accru (présence de la police, embouteillage, émeutes et dégradation du véhicule, etc.)

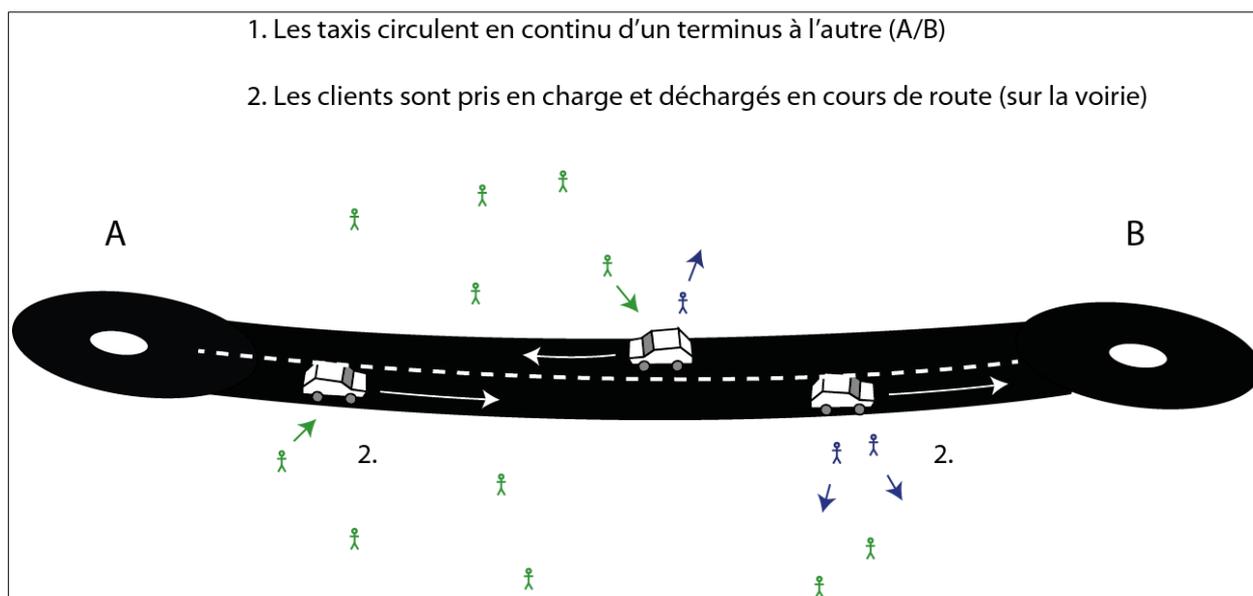


Illustration 19 : le principe de « maraude » à Dakar.

3.2.5 Une rentabilité calculée au jour le jour

Les chauffeurs de « clando » connaissent le potentiel de fréquentation des garages, et avec précision le coût des trajets d'un garage à un autre. Les principaux frais pour les chauffeurs au cours de la journée sont les achats de carburant. Ils ont, pour la plupart d'entre eux, tendance à acheter le strict nécessaire en carburant, ce qui les oblige à passer à la pompe plusieurs fois par

²¹ Les chauffeurs recherchent leurs clients sur la voirie, sans utiliser de station d'arrêt (Godard 2002). Ils peuvent s'arrêter à tout moment sur le bord de la route, et n'hésitent pas à klaxonner pour interpeller les clients potentiels.

jour. Ils font très rarement le plein, sauf en début de journée. Un des chauffeurs enquêté nous a précisé : « Si je fais le plein et que je n'utilise pas toute l'essence c'est la station qui a gagné sa journée et pas moi ! ». Les chauffeurs calculent donc précisément leurs frais et leurs recettes pour garantir la rentabilité de leur travail. Prenons l'exemple du trajet Poste de Fann/ESP qui est une ligne directe, sans arrêt et sans maraude. Selon nos investigations, le déplacement d'une voiture d'un garage à un autre est rentable à partir de deux clients embarqués (150 FCFA par client). Un chargement complet (4 personnes) permet donc de rentabiliser un aller-retour. Ainsi, un chauffeur peut faire un trajet avec le véhicule plein, puis repartir à vide au garage de départ s'il n'y a aucun client au garage de destination. Selon les chauffeurs, ils peuvent aussi démarrer la course à partir de deux ou trois clients pour que ces derniers n'attendent pas trop longtemps dans le véhicule (20 minutes, une demi-heure au maximum). Cela témoigne d'une certaine qualité de service ou du moins d'une certaine attention vis-à-vis du client. Avec les taxis « clandos », il y a très peu de marge de négociation. Les prix sont forfaitaires et généralement fixés en fonction de la longueur de la tournée. Nous avons pu observer que dans ce secteur artisanal, les chauffeurs avaient tendance à évaluer la rentabilité de leur travail à la journée. Ils travaillent pour atteindre un objectif de rentabilité, celui-ci étant fonction des besoins financiers du moment. Ils arrêtent leur journée une fois que leur objectif de recette est atteint, ou dès qu'ils sentent qu'ils sont trop fatigués. Le rythme de travail est donc relativement variable.

3.2.6 Des tournées limitant les incertitudes et adaptées aux besoins de mobilité

Les chauffeurs privilégient toujours les trajets qu'ils connaissent et qu'ils maîtrisent. Contrairement aux taxis légaux, les clients ont du mal à reconnaître les « clandos » en dehors de leur circuit habituel, car les véhicules n'ont pas de signe distinctif. Dans cette situation, il leur est difficile de trouver des clients et d'être compétitif avec les autres modes. D'après nos entretiens, les chauffeurs opèrent souvent dans des quartiers qu'ils connaissent très bien (souvent des espaces vécus), ce qui leur permet de minimiser les déplacements vers leur domicile et de rester attentifs au rythme et aux besoins des populations. Les « clandos » s'appuient également sur toutes sortes de réseaux sociaux (garagistes, policiers, « coxeurs », etc.) pour faciliter leur travail.

À Dakar, et encore plus en banlieue, les populations sont soumises à des migrations pendulaires très importantes en semaine. Avec sa presque île en forme d'entonnoir, le centre-ville voit arriver le matin et repartir le soir des milliers de personnes quotidiennement. Il est impératif pour les chauffeurs de s'adapter à ces flux de masse, ce qui implique un fonctionnement différent en heure creuse et en heure pleine. Les besoins de mobilité varient aussi en week-end ce qui les oblige à adapter leur offre, sachant que la plupart des chauffeurs travaillent tous les jours de la semaine. Concernant les rythmes de travail, nous pouvons distinguer le cas du centre-ville et de la banlieue. En effet, à Dakar-centre, la desserte est moins dépendante des heures creuses et des heures pleines, car l'activité y est importante quasiment tout au long de la journée. Il y a toujours des pics de densité de clients, mais globalement les chauffeurs n'ont pas besoin de modifier leur offre en cours de journée. Selon les créneaux horaires, ils auront simplement plus ou moins de travail. En revanche, les chauffeurs sont obligés de modifier leur offre en week-end, car les besoins de déplacement sont alors très différents. Ce sont moins des besoins de déplacement domicile-travail que des déplacements de loisir. Les taxis desservant l'université en semaine nous ont par exemple expliqué que, pendant le week-end, ils se tournaient vers les hôtels ou les lieux de loisir. C'est donc une toute autre clientèle, mais les circuits restent toujours dans leur zone

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

habituelle et dès qu'un trajet semble rentable, le « clando » s'y attelle. À l'inverse, les heures creuses et les heures pleines ont une réelle importance en banlieue, car la densité de clients varie considérablement selon les périodes. Des chauffeurs en banlieue nous ont expliqué qu'en heure pleine, la densité de clients est telle qu'il n'y a aucune attente aux garages. Les voitures font des allers-retours sans arrêt et fonctionnent en maraude. Ils sont certains de remplir le taxi très rapidement, soit aux garages, soit en prenant des clients sur le bord de la route. Sur ce créneau horaire, les chauffeurs sont donc « rois ». Ils choisissent des tournées fixes qui les arrangent et les prix ne sont pas négociables. En heure creuse, la tendance est complètement inversée. Les clients se font rare, et les chauffeurs vont faire le maximum pour pouvoir prendre quelques clients. En heure creuse, la maraude est quasi inexistante, car non rentable (risque important de rouler à vide). Les chauffeurs attendent aux garages que les clients se regroupent. Les destinations demandées sont plus variées, ce qui induit d'intenses négociations entre les « coxeurs », les chauffeurs et les clients. Dans ce cas de figure, le transport est bien « à la demande » des clients.

3.2.7 Un taux de remplissage toujours proche des 100 %

Les taxis clandestins sont des services de transport collectifs, mais de petite taille, généralement pour 4 ou 5 personnes au maximum. C'est une spécificité qui les différencie des autres modes que ce soit les minibus qui sont généralement surchargés (plusieurs dizaines de personnes) ou les taxis légaux qui sont individuels. De nombreux chauffeurs de taxis jaunes et noirs refusent d'ailleurs de prendre plusieurs clients sur une même course, pour bien se distinguer des « clandos », et ainsi préserver une certaine image et une haute qualité de service. Ce n'est évidemment pas le cas de tous les chauffeurs, car bon nombre d'entre eux pratiquent le taxi collectif pour augmenter leur rentabilité. Les chauffeurs de « clandos », quant à eux, cherchent à rentabiliser leur course avant tout. Dans la majorité des cas, ils roulent avec 3 ou 4 clients, mais parfois ils peuvent aussi démarrer une course avec 1 ou 2 clients. Soit parce qu'ils pensent pouvoir trouver d'autres clients en route, soit parce qu'ils ne veulent pas perdre leur client. Le taux de remplissage minimum pour une tournée est parfaitement évalué. La petite taille de ces transports collectifs est un avantage certain, car le remplissage du véhicule est rapide, les coûts en carburant restent relativement faibles et les déplacements relativement confortables pour les clients, comparés aux autres modes disponibles à Dakar.

3.2.8 Immédiateté et rapidité : le temps c'est de l'argent

Un autre avantage de ces taxis est l'immédiateté et la disponibilité du service. En dehors des heures creuses où effectivement le chauffeur peut attendre plusieurs dizaines de minutes au garage avant de remplir sa voiture, les chauffeurs font toujours le nécessaire pour embarquer des clients le plus rapidement possible. Lorsque les « coxeurs » travaillent, les chauffeurs, à peine arrivés au garage, voient leur taxi se remplir et peuvent repartir immédiatement. Lorsqu'il n'y a pas de *coxeur*, ils vont eux-mêmes chercher leurs clients en les appelant ou en faisant un signe de la main. Lorsqu'ils pratiquent la maraude, le remplissage est encore plus rapide, car les chauffeurs s'arrêtent à n'importe quel moment et à n'importe quel endroit sur la route. En quelques secondes une voiture peut faire descendre des clients et en embarquer de nouveau. De plus, les véhicules étant généralement des berlines (et non des minibus), leurs déplacements sont relativement aisés. Les chauffeurs peuvent donc faire plusieurs dizaines d'allers-retours dans une même journée.

3.2.9 Un exemple de système basé sur l'interaction des individus

Les services de taxi clandestins sont optimisés grâce au comportement des individus et à l'interaction entre les chauffeurs et les clients. Il n'existe aucune structure logistique intermédiaire. Chaque personne va chercher à maximiser son intérêt tout en trouvant un compromis avec son prochain. On peut alors parler de principe d'auto-organisation (cf. Partie 2, Chapitre 1.2.2) du système. Les chauffeurs ont tous le même objectif : rentabiliser leur journée. Pour cela ils doivent toujours être attentifs à l'évolution de la demande de mobilité et adapter leur offre quasiment au quotidien. Les clients, quant à eux, veulent se déplacer à faible coût, le plus rapidement possible et avec un maximum de confort. Aujourd'hui ce système de taxi collectif auto-organisé apparaît comme une véritable offre de transport à l'échelle de l'agglomération (Tremblay & Ndiaye 2008; Bertholet 2004).

D'après nos entretiens avec les acteurs du système, il n'y a pas de véritable coopération entre les chauffeurs. La principale coopération concerne les chauffeurs et les « coxeurs », car les deux fonctions sont complémentaires. Mais les « coxeurs » ne sont pas indispensables. Ils apportent une simplification dans le travail. Cependant, même si nous ne pouvons pas réellement parler de coopération, il est important de préciser que le système nécessite une bonne entente entre les chauffeurs. Ils ont intérêt à maintenir de bonnes relations pour ne pas gêner leurs affaires. On observe même souvent un soutien moral et parfois financier entre les chauffeurs d'un même garage. Cette caractéristique est plus d'ordre culturel et sociétal, car on retrouve plus ou moins cette entraide à tous les niveaux de la société sénégalaise. Ainsi, il ne faut pas négliger le rôle de la communication entre les différents acteurs (chauffeurs, clients, « coxeurs », etc.) et donc le poids des réseaux sociaux. Nous savons par exemple qu'un chauffeur peut informer d'autres chauffeurs si un policier est positionné sur le trajet ou si des clients attendent à un autre garage, mais, *a priori*, il n'y a pas de règle stricte concernant le partage d'information. D'après les témoignages, quand il s'agit de clients, les chauffeurs préfèrent rester discrets. Une phrase qui revenait souvent dans les discussions est : « C'est chacun pour soi ! ». Les chauffeurs ne cherchent donc pas à se répartir les clients, mais bien à en capter le plus possible, tant que le respect mutuel entre les travailleurs est préservé.

3.2.10 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Informel, peu toléré
Principe d'organisation	Auto-organisation
Objectif du service	Comblent les carences des autres services, en périphérie notamment
Gestion	Artisanale
Objectif de l'opérateur	Rentabilité financière
Capacité des véhicules	Semi-collectif, (4 à 7 places)
Rapidité	Assez rapide
Tarification	Prix du voyage fixé en fonction du nombre de clients à bord et de la distance à parcourir
Sécurité	Faible à très faible selon les véhicules et la conduite des chauffeurs
Nuisances	Non négligeables : encombrement de la chaussée, accidents, etc.
Exemples	Taxis « clandos », taxis de banlieue

Tableau 6 : fiche signalétique des taxis collectifs à Dakar.

Chapitre 4. Le transport public individuel

A priori, le transport public individuel n'est pas l'objet central de cette thèse. Nous nous plaçons dans une optique de mobilité durable et nous œuvrons donc pour le regroupement des personnes et la mutualisation des déplacements. Néanmoins, les services que nous présentons ici nous paraissent intéressants par leur fonctionnement. En expliquant leurs spécificités, nous souhaitons interpeller le lecteur sur les différences qui existent entre les services français et sénégalais. Nous pensons que ces différences ont des répercussions importantes sur l'état actuel des systèmes de mobilité.

4.1 Les taxis français

Si les taxis en France constituent un service relativement bien connu par la population, on ne peut pas dire qu'ils soient très populaires et très fréquentés au quotidien. La raison première semble être les prix élevés pratiqués. Selon le site internet des Taxis de France²², il faut compter au minimum 6,6 € pour le déplacement le plus court (un kilomètre) et sans bagage. Le taxi demeure un service souvent perçu comme luxueux ou du moins réservé à une certaine catégorie de personnes : soit des personnes qui recherchent le confort et qui bénéficient d'un certain niveau de vie (par exemple des hommes d'affaires, les touristes) ; soit des personnes contraintes d'utiliser ce service (par exemple des personnes malades ou invalides, ou ayant des besoins de mobilité urgents), soit des personnes voyageant à plusieurs (réduction des coûts). Ainsi, une grande partie du marché est constituée par les courses réservées à la santé et remboursées par le système de santé français.

4.1.1 Organisation et fonctionnement du service

Le taxi est une réponse spontanée et individualisée aux besoins de mobilité. Ses caractéristiques sont (i) un traitement individuel du client (une course peut être réalisée avec plusieurs personnes à bord, mais elle ne concerne qu'une seule demande de déplacement) ; (ii) une réponse rapide et la possibilité de se déplacer de n'importe quelle origine à n'importe quelle destination (que ce soit en milieu urbain, périurbain et rural) ; (iii) des tarifs relativement élevés en comparaison avec les services de transport public et même avec le véhicule personnel. En France, « ce qui les distingue des autres modalités de transports particuliers, c'est d'être les seuls autorisés à prendre des clients qui les hèlent dans la rue » (Darbéra 2010). Les tarifs administrés par les opérateurs de taxis sont fixés par arrêté du ministre de l'Économie et par arrêté préfectoral pris dans chaque département (Attali 2008). Ils sont mesurés avec un compteur horokilométrique (taximètre) qui équipe obligatoirement chaque taxi. Le fonctionnement du taximètre est identique à tous les taxis, en revanche l'application des termes kilométriques, ainsi que des horaires diffèrent selon les départements. Lors d'une réservation auprès d'une borne, d'un central radio ou d'une entreprise, l'approche est facturée au départ de la station ou selon un barème déposé en préfecture. Comme en Afrique, le secteur des taxis en France est très fragmenté. Certains opérateurs sont des artisans qui ne possèdent qu'une licence et qui conduisent leur propre voiture. D'autres peuvent posséder plusieurs dizaines de licences qu'ils louent à des chauffeurs ou qu'ils utilisent en embauchant des salariés. À Paris, par exemple, deux entreprises et une coopérative possèdent ensemble quelque 2 500 licences (Darbéra 2010).

22 <http://www.taxis-de-france.com/professionnel/tarifstaxis.htm>

4.1.2 Cadre légal

Les taxis français constituent une activité de transport particulier de personnes. Pour pouvoir être chauffeur de taxi, il convient d'attester la réussite à l'examen professionnel de chauffeur de taxi, d'acquiescer une autorisation de stationnement sur la voie publique (soit gratuitement auprès de la mairie, soit à titre onéreux auprès d'un chauffeur de taxi qui cesse son activité) et de respecter les tarifs maximum officiels (Attali 2008). L'activité demeure régie par une législation spécifique, celle de la loi n° 95-66 du 20 janvier 1995. Cette déconnexion du régime de la LOTI est significative d'un souci de préserver l'autonomie relative de cette activité vis-à-vis notamment du transport public. Cependant, ils peuvent être intégrés à l'offre de transport public et constituer une voie pour répondre aux « besoins des usagers dans les conditions économiques et sociales les plus avantageuses pour la collectivité » (art. 1 de la LOTI). Des rapports de coopération permettent d'intégrer les taxis au transport public. Le cadre juridique permet la pratique d'une activité mixte pour les opérateurs, par exemple effectuer du TAD en plus de leur activité classique. Néanmoins, l'intégration de ces artisans dans l'exploitation des services publics demeure subordonnée à la satisfaction de certaines conditions. En effet, les chauffeurs ne peuvent assurer de services publics de TAD que s'ils sont inscrits au registre de transport public de personne, conformément aux dispositions de l'article 7-I de la LOTI, et qu'ils exercent cette activité accessoirement à leur activité principale de taxi.

4.1.3 Quel rôle à jouer pour les taxis en France ?

Pour répondre à de nouvelles demandes, les pouvoirs publics tentent de mobiliser les taxis soit directement, soit dans le cadre de partenariats avec les entreprises de transport public. L'objectif étant d'offrir des services subventionnés à leurs citoyens. Dans certains cas, les taxis sont invités à se regrouper et à créer un GIE (Groupement d'intérêt économique), qui est un moyen d'assurer une certaine coresponsabilité. Le service de transport à la demande TADOU est un bon exemple de coopération entre des opérateurs de taxi et les services publics (CERTU 2009). Mais la capacité des taxis à répondre à de tels besoins dépend largement du cadre régulateur qui régit leur activité. En France, ces services subventionnés restent marginaux par rapport à l'ensemble de l'offre des transports publics et même par rapport à l'activité du secteur des taxis (Darbéra 2010)

Dans son « Rapport de la Commission pour la libération de la croissance française », Jacques Attali se prononce sur la situation des taxis en France. Son constat est que l'offre de taxi est insuffisante (par exemple 1 taxi pour 360 habitants à Paris et en proche banlieue) et non-adaptée aux besoins diversifiés de mobilité, notamment en milieu urbain. Dans ce rapport, l'auteur préconise une libéralisation de l'activité. Pour augmenter le nombre de taxis, il propose un ensemble de mesures comme octroyer gratuitement des licences, assouplir les règles de tarification et d'exploitation des licences, mais aussi créer des voies réservées et supprimer les restrictions territoriales. En complément, il insiste sur l'importance de diversifier l'activité de taxi. L'auteur propose d'introduire sur le marché des « véhicules de petite remise » (VPR) spécialisés sur certains segments du transport urbain, avec là aussi une tarification beaucoup plus souple (Attali 2008).

4.1.4 La dérive des chauffeurs dans l'illégalité

Les mesures proposées par Jacques Attali pourraient aussi aider à résoudre le problème des taxis clandestins. En effet, il existe en France de nombreuses personnes qui pratiquent le taxi en toute illégalité comme en témoignent ces articles de presse : (Chemin 2011; Guéguen 2010; Philibert 2008). D'importantes mesures sont mises en place pour lutter contre ce phénomène, car d'une part, ces taxis représentent des concurrents déloyaux envers les compagnies de taxi légales, d'autre part parce qu'ils posent de nombreux soucis de sécurité. Il est intéressant de noter que la pratique des taxis clandestins en France est très différente des taxis dakarois. Alors que les « clandos » sénégalais s'organisent entre eux et proposent une offre intermédiaire et complémentaire avec les autres offres de transport, les clandestins français tentent plutôt de paraître identiques aux taxis légaux. Ils conservent les mêmes pratiques avec les mêmes prix (voire supérieure) et n'hésite pas à mentir aux clients quant à leur statut. À Paris, ces chauffeurs rodent fréquemment autour des discothèques en fin de soirée, car les clients sont fatigués et l'offre de transport y est trop peu développée (le service de métro est terminé et les bus sont relativement rares).

4.1.5 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, encadré par la loi
Principe d'organisation	Individuel, auto-organisation
Objectif du service	Offrir un service souple et de qualité : rapide et très confortable
Gestion	Artisanale, GIE
Objectif de l'opérateur	Rentabilité financière
Capacité des véhicules	Service individuel (une réservation = une course), 4 à 7 places
Rapidité	Très rapide
Tarification	Prix d'une course calculée avec un compteur horokilométrique, tarifs fixés par décret selon les départements
Sécurité	Très bonne
Nuisances	Faible
Exemples	Taxis G7 (Île-de-France), Allo Taxi (Grand Lyon), Taxis d'Avignon, etc.

Tableau 7 : fiche de signalétique du taxi français.

4.2 Les taxis artisanaux sénégalais

Selon le dernier recensement de 1997, il y avait à cette époque approximativement 10 000 taxis légalement enregistrés à Dakar (IBIS 2008). Malheureusement, nous n'avons pas de données précises récentes, mais tout le monde s'accorde sur le fait que leur nombre a beaucoup augmenté ces dernières années. Le secteur semble aujourd'hui saturé ou du moins souffrir d'un manque de contrôle et de régulation. Cette même étude a montré que les services de taxi captaient approximativement 10 % du transport total de passagers (IBIS 2008). Les taxis étant pour la plupart individuels, c'est-à-dire qu'ils ne transportent qu'un client par tournée, ce chiffre

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

illustre bien la quantité de taxis qui circule chaque jour à Dakar. En effet, le taxi constitue un élément important des habitudes de mobilité des dakarois, et ce malgré son coût nettement supérieur à ceux des autres modes. Il apparaît comme le mode de déplacement public le plus rapide, le plus confortable et le plus sûr (GMAT 2007), même si ces éléments sont à nuancer vu l'état des véhicules. Les citoyens privilégient le taxi lorsqu'ils doivent se déplacer en urgence ou en sécurité (par exemple quand ils transportent de l'argent).

4.2.1 Des artisans du transport

Au même titre que les taxis « clandos », les taxis légaux opèrent de manière artisanale. Pour les chauffeurs les plus fortunés et les plus anciens, ils sont eux-mêmes propriétaires de leur véhicule. Pour les autres, notamment les plus jeunes, ils utilisent la voiture d'un propriétaire, moyennant un versement fixe quotidien ou hebdomadaire. Il existe très peu d'informations officielles sur les chauffeurs de taxi à Dakar. D'après nos entretiens, les profils sont assez variés. On y observe beaucoup de jeunes qui bien souvent font l'objet d'une reconversion professionnelle, mais aussi un certain nombre de personnes qui pratiquent ce métier depuis de nombreuses années. On a aussi pu interroger des retraités qui pratiquaient le taxi pour compléter leur retraite (souvent assez faible), parfois propriétaires de plusieurs taxis conservant un véhicule pour se promener, surveiller les employés et surtout garder le contact avec le milieu.

Les chauffeurs ont relativement peu de contraintes de la part des autorités. Ils peuvent circuler la nuit comme le jour, n'importe où dans l'agglomération, même si une tentative de partager les zones de desserte avait été lancée. Chaque conducteur organise donc sa desserte comme il l'entend. Certains travaillent pendant les périodes de pointe uniquement. D'autres fonctionnent en continu la journée, parfois même la nuit pour capter une certaine catégorie de clients (par exemple les jeunes qui sortent de soirée). Certains chauffeurs emploient aussi un suppléant pour permettre au taxi de fonctionner 24h/24h.

4.2.2 Mode de fonctionnement

En règle générale, il n'y a pas de réservation avec les taxis légaux de Dakar (mis à part avec les taxis de la société CCBM (cf. Partie 1 Chapitre 4.3). Il est toujours possible de demander le numéro de téléphone mobile d'un chauffeur, mais cette pratique semble marginale. En centre-ville, la densité de taxis est telle qu'il suffit de quelques minutes pour prendre un taxi. Il est facile de les reconnaître car ils sont de couleur jaune et noire (cf. illustration 20). Certains taxis sont aussi jaunes unis (appelés les taxis iraniens) ou alors bleus unis (les taxis de la CCBM). Pour demander un taxi, il suffit aux clients de faire un geste de la main. Le chauffeur s'arrête sur le bas côté de la chaussée et la négociation peut alors commencer.

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal



Illustration 20 : un taxi jaune et noir de Dakar.

Source : <http://www.planete-senegal.com>

Les taxis circulent en ville principalement, à la recherche de clients ou bien attendent à des lieux stratégiques (aéroport, université, etc.). Lorsque la demande de mobilité est forte, les chauffeurs préfèrent rester sur les grands axes car ils y circulent plus facilement, où ils peuvent coordonner les courses rapidement. En revanche, quand la demande est faible, on peut voir des taxis s'aventurer dans les petites rues du centre-ville, ou pénétrer dans les quartiers résidentiels à la recherche de clients. Le taxi est le service de transport le plus spontané à Dakar. En théorie, les taxis fonctionnent en porte-à-porte. Vous pouvez aller où vous voulez et quand vous voulez en taxi, du moment que vous payez le prix demandé par le chauffeur. En pratique, ce n'est pas toujours le cas. Tout va dépendre du point de départ et d'arrivée et du moment de la journée. Les contraintes spatiales et financières font que les chauffeurs privilégient toujours certains quartiers de la ville et qu'ils en excluent d'autres. Il est par exemple beaucoup plus facile de trouver un taxi devant chez-soi lorsqu'on habite en plein centre-ville. Dans les quartiers résidentiels, il est préférable de se diriger vers les grands axes en période de pointe pour trouver un taxi rapidement. Pire encore, si vous habitez en banlieue il vous sera très difficile de trouver un taxi ou de convaincre un taxi de vous prendre à destination de la banlieue, car même s'il y a une forte densité de population, peu de personnes là-bas ont les moyens de prendre le taxi, d'autant plus que le trajet pour aller en centre-ville est long et très coûteux. En pratique, la flexibilité de ce service est donc à relativiser. Les chauffeurs interrogés nous ont précisé qu'ils avaient un trajet journalier type et qu'ils évitaient le plus possible de sortir de leur itinéraire ou de leur zone de desserte, même lorsque la course était intéressante. D'ailleurs, quand un chauffeur vous donne un prix vraiment excessif et qu'il refuse de négocier, c'est que la destination demandée ne l'arrange pas et qu'il refuse implicitement la course.

4.2.3 Une tarification flexible

Contrairement aux taxis français, les taxis dakarois fonctionnent sans compteur kilométrique. Les prix sont donc évalués et négociés en fonction de la course demandée. Les prix peuvent aussi dépendre de l'expérience du *taxi man* et/ou de l'état de son véhicule. Généralement quand un chauffeur possède une bonne voiture, il annonce un premier prix assez élevé et il négocie très peu. En réalité, les prix dépendent principalement des besoins et des moyens financiers de la population. D'après nos entretiens avec les chauffeurs, ils varient au cours de la journée et au cours des mois.

Au cours de la journée, l'activité est très variable. Elle dépend largement des heures creuses et des heures de pointe, qui sont calées sur le rythme de travail des habitants. À Dakar, la plus forte demande se situe entre 8 h et 10 h. Durant cette période les chauffeurs prennent peu de temps pour négocier et exigent des prix élevés. De 10 h à 13 h, c'est la période creuse, les clients sont beaucoup plus rares et les courses demandées très variables. Les *taxi man* pratiquant la maraude se précipitent sur le moindre client. Les prix sont intensément négociés et relativement variables. Il y a quelque flux entre 12h et 14h avec les personnes qui se déplacent pour aller manger. À partir de 14 h recommence la période creuse avec quelques flux occasionnels. Certains chauffeurs s'arrêtent d'ailleurs de travailler, ou attendent à des endroits stratégiques pour ne pas gaspiller leur essence. Enfin, l'activité reprend aux alentours de 16 h et jusqu'au soir avec toutes les personnes qui rentrent de leur travail. Selon les chauffeurs, il est aussi possible de distinguer trois périodes au cours d'un mois. Les dix premiers jours correspondent à la période la plus intéressante pour les *taxi man*. La demande est forte car ce sont les jours de paye pour les salariés. Au milieu du mois la demande est très variable, mais les chauffeurs arrivent à trouver des clients, notamment s'ils connaissent bien leur terrain. Enfin, les dix derniers jours correspondent à la période difficile, car les ménages ont moins d'argent. Les clients se font rare, ils sont très exigeants, ce qui entraîne une baisse générale des prix.

Enfin, l'activité des taxis est largement dépendante des grandes fêtes religieuses comme la période de Noël et du jour de l'an, et surtout la célèbre fête de la Tabaski (Aïd al-Kabîr en arabe). Durant ces périodes, la ville est très perturbée car les familles partent des villages et arrivent à Dakar en grand nombre. Les ménages doivent davantage se déplacer pour faire des achats et pour rendre visite à des membres de la famille. Malgré les fortes dépenses des familles pour financer les fêtes la demande est tellement forte que les chauffeurs peuvent se permettre de négocier des prix élevés.

4.2.4 La pratique du taxi collectif chez les opérateurs formels

Aujourd'hui il semble y avoir de plus en plus de chauffeurs qui pratiquent le taxi collectif, et notamment en heure de pointe où l'offre de transport est quotidiennement saturée. Plusieurs chauffeurs interrogés nous ont informé qu'il faisait du taxi collectif tous les matins et tous les soirs en desservant des zones de forte densité comme la place de l'indépendance à Dakar plateau. À cette place, comme à d'autres endroits à Dakar, des « coxeurs » rassemblent les clients pour remplir les taxis en échange d'une pièce de monnaie. D'autres chauffeurs qui habitent la banlieue nous ont précisé que tous les matins ils partaient de chez eux avec le taxi plein à destination de Dakar plateau et inversement le soir. Cette pratique est de plus en plus courante à Dakar (IBIS 2008). Elle s'avère rentable car le prix total de la course, calculé en fonction du nombre de clients

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

à bord, est toujours très correct. De nombreux chauffeurs se laissent donc tenter même si un grand nombre d'entre eux demeurent toujours réticents à cette pratique. Ils perçoivent ça comme une dévalorisation de leur travail.

4.2.5 Quel avenir pour ces taxis ?

Il est difficile d'évaluer le niveau de service offert par les taxis, vu l'absence de statistiques fiables et suffisantes. Nous savons, en revanche, qu'il y a un nombre croissant de véhicules en circulation, ce qui provoque une surabondance de l'offre. Cette concurrence interne oblige les chauffeurs à baisser les prix et donc à faire des économies souvent sur sur l'entretien du véhicule. Les chauffeurs doivent aussi travailler plus longtemps pour atteindre leur objectif de recette, ce qui accroît leur fatigue et rend les voyages toujours plus dangereux. S'ajoute à cela la concurrence avec les autres modes de transport, qui pour certains se sont bien développés au cours des dix dernières années. On notera les problèmes de concurrence déloyale avec les taxis « clandos », qui captent une part non négligeable des déplacements ; mais aussi la concurrence avec les services de transport en commun qui ont des prix beaucoup plus abordables pour la population. Les récents minibus de l'AFTU, par exemple, sont aujourd'hui très prisés par les dakarois, d'autant plus qu'ils circulent presque partout dans l'agglomération. La plupart des chauffeurs interrogés ont paru pessimistes quant à l'évolution de leur métier. Certains envisageaient de chercher un travail dans un autre domaine et tous s'accordaient sur le fait que le secteur manquait d'encadrement, d'aide, de soutien et de régulation par les autorités publiques.

4.2.6 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, licence délivrée par le ministère des transports
Principe d'organisation	Auto-organisation
Objectif du service	Offrir un service rapide et confortable
Gestion	Artisanale
Objectif de l'opérateur	Rentabilité financière
Capacité des véhicules	Service individuel (une réservation = une course), pratique du taxi collectif pour certains chauffeurs, 4 à 7 places
Rapidité	Rapide
Tarifcation	Prix de la course négocié en fonction de la distance à parcourir, du lieu à desservir et d'éventuels embouteillages sur la route
Sécurité	Correct à bonne selon les véhicules et la conduite des chauffeurs
Nuisances	Assez faibles
Exemples	Taxis jaunes et noirs, taxis jaunes

Tableau 8 : fiche signalétique des taxis formels de Dakar.

4.3 Des taxis avec réservation téléphonique à Dakar

Les informations que nous exposons dans cette section sont issues des entretiens avec Mr Malang Faty, responsable du département transport et automobile de la société CCBM, Mme Aissatou Soumare responsable de la centrale d'appel et Mamadou Ndiaye, un des plus anciens chauffeurs de la société, utilisant régulièrement le *call-center*.

4.3.1 Une société qui cherche à se différencier

Créé en 1992 sur les bases de l'entreprise familiale, le Groupe CCBM (Comptoir Commercial Bara Mboup) est une société privée à capitaux sénégalais employant près de 800 salariés. L'objectif du groupe est de mettre à disposition des produits de consommation et des services de qualité à des prix compétitifs. Les activités de la société sont aujourd'hui variées, de la vente et la location d'automobiles, à l'investissement dans l'agroalimentaire, en passant par l'immobilier, la logistique et la vente d'appareils électroménagers.

Après une première tentative en 2006, c'est en 2008 que le groupe a réussi à créer sa filiale dédiée au transport public : la SOTRAM (SOCIÉTÉ de TRANsport Moderne). Elle propose aujourd'hui plusieurs formes de service de taxi, chacun étant adapté à une catégorie de population. La majorité des chauffeurs employés sont des *taxi man* qui exercent leur métier de la même manière que les taxis jaunes et noirs. À la différence près qu'ils sont en contrat avec la société. Certains de ces chauffeurs sont sollicités pour faire des courses sur réservation, grâce à un centre d'appel dont nous allons préciser le fonctionnement ci-après. La SOTRAM s'est aussi récemment lancée dans le ramassage scolaire en employant des femmes. On peut voir ces *taxi woman* circuler en ville dans des voitures économiques et de petite taille (modèle Cherry QQ, cf. illustration 21) et faire le taxi à la sortie des écoles. On les appelle communément les taxis *sister*. Les familles passent un contrat avec la société pour que les enfants soient déposés et récupérés à leur école quotidiennement.



Illustration 21 : un taxi *sister* de Dakar
(Source : <http://yveslebelge.skynetblogs.be/>).

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

En matière d'exploitation, la SOTRAM présente deux avantages certains pour les *taxi man*. D'abord, la société permet à ses employés d'acquérir, à terme, leur véhicule. Pour ce faire, elle propose des crédits qui sont remboursés, en général, au bout de 4 ans de travail. Au départ, le chauffeur fait un apport (qui se situe entre 300 000 FCFA et 500 000 FCFA). Ils peuvent aussi solliciter des investisseurs externes. Le groupe complète ensuite la somme pour l'achat du véhicule et grâce à ce procédé, les chauffeurs se retrouvent donc relativement rapidement propriétaires de leur taxi. Ils peuvent ensuite exercer en toute liberté. Le deuxième avantage est que la CCBM, grâce à son réseau et à son expérience dans le secteur de l'automobile, propose des véhicules neufs, à bon marché. La plupart des voitures sont des Volkswagen ou, plus récemment, des voitures chinoises assemblées au Sénégal. Lors de nos entretiens (décembre 2011), la société disposait d'une flotte de 184 véhicules. Les véhicules sont variés puisque l'on passe des petites citadines, comme la Chery QQ (marque chinoise), au volumineux quatre-roues motrices tout terrain Amarok de chez Volkswagen. Les véhicules les plus nombreux étant les Parati break Volkswagen. Ce sont donc des véhicules récents et de bonne qualité. Ils sont d'ailleurs pour la plupart équipés de climatiseurs contrairement aux taxis indépendants.

En complément de leur apport pour l'achat du véhicule, les chauffeurs sous contrat doivent s'acquitter d'un versement quotidien de 10 000 FCFA environ. Ils sont ensuite payés chaque mois entre 200 000 et 300 000 FCFA. Les prix dépendent du véhicule qu'ils utilisent. Les frais d'assurance et d'entretien étaient à l'origine pris en charge par la CCBM. En raison de coûts trop importants auxquels devait faire face l'entreprise, ce sont aujourd'hui les chauffeurs qui ont en charge l'entretien du véhicule (ce qui a entraîné une légère baisse du versement).

4.3.2 Un service organisé sur deux niveaux

Les chauffeurs fonctionnent de la même manière que les taxis jaunes et noirs. Ils n'ont pas de contraintes spatiales particulières, ils peuvent circuler où bon leur semble. En général, ils ont eux aussi des trajets types sur lesquels ils ont l'habitude de trouver des clients. Ils fonctionnent en maraude pour la plupart, certains font du taxi collectif en heure de pointe, d'autres non. Ils n'ont pas de contraintes horaires non plus et s'organisent comme ils l'entendent.

La particularité de la CCBM est de disposer d'un centre d'appel auprès duquel les clients peuvent réserver des courses. Trois véhicules sont entièrement dédiés au *call-center* : un tout terrain (pour les courses en brousse à destination des villages), une Volkswagen *break* et une *berline*. Lorsque ces véhicules sont indisponibles, la responsable, Mme Soumare fait appel aux taxis en circulation. Les *taxi man* doivent toujours être disponibles pour répondre à une réservation, sauf bien sûr s'ils sont en pleine course. En pratique, une vingtaine de chauffeurs seulement sont régulièrement sollicités par le centre d'appel. Ce sont, selon les mots de la responsable, les chauffeurs les plus sérieux, avec lesquels ils ont l'habitude de travailler.

La centrale de réservation fonctionne de la manière suivante (cf. illustration 22) :

- les clients réservent une course par téléphone via un numéro gratuit ou par *email*. Le service fonctionne du lundi au samedi de 8 h à 2 h du matin. Il est préférable de réserver au minimum 2 heures à l'avance pour être sûr d'avoir un chauffeur disponible ;
- le prix de la course est donné lors de la réservation. Il est calculé en fonction du temps et de la distance à parcourir ;

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

- l'assistante s'occupe d'enregistrer les réservations et la responsable se charge de les redistribuer aux chauffeurs. Mme Soumare nous a avoué optimiser les courses à « l'instinct ». En fonction de la course demandée (localisation, horaire), elle va contacter en priorité tel ou tel chauffeur. Elle semble très bien connaître ses chauffeurs, ou du moins leurs parcours, ce qui lui permet de savoir de manière relativement précise leur localisation en fonction de l'heure de la journée. L'entreprise a d'ailleurs essayé d'utiliser un système de géolocalisation des véhicules par GPS, mais selon Mme Soumare le système ne fonctionnait pas bien ;
- selon son expertise et en fonction de la disponibilité des taxis, la responsable transmet les courses aux chauffeurs. La communication se fait simplement par téléphone mobile.

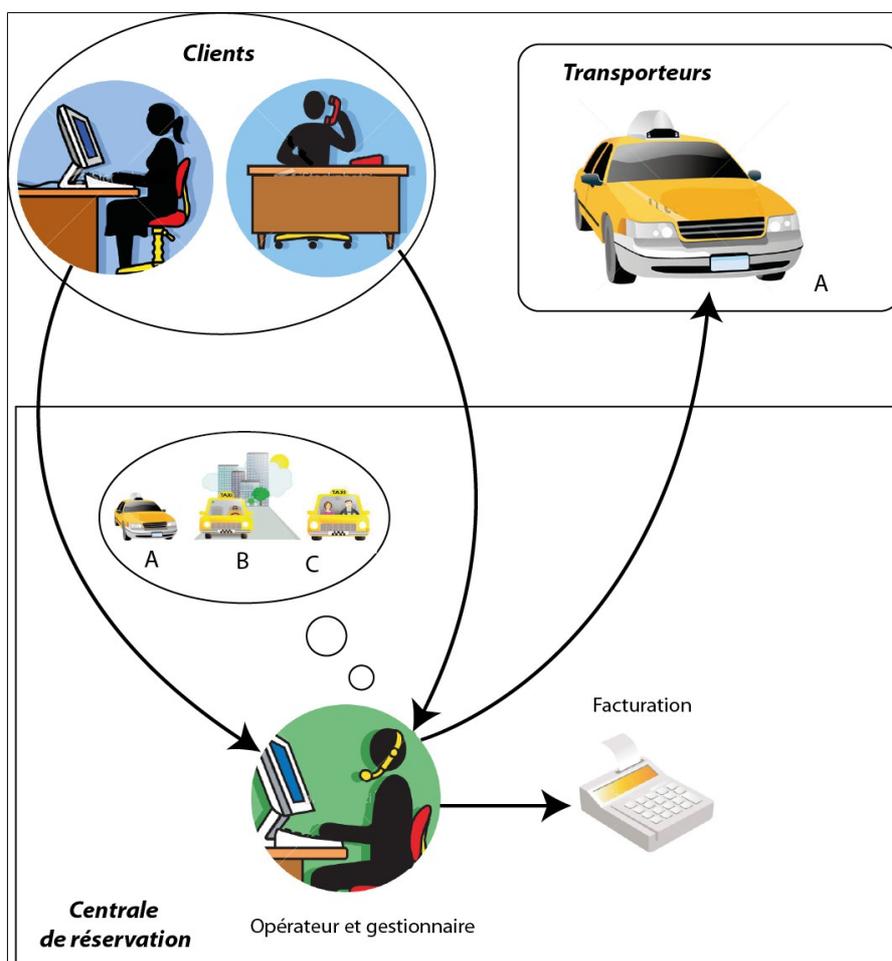


Illustration 22 : centrale de réservation de la CCBM.

En plus du versement quotidien, les chauffeurs étant sollicités par le centre d'appel doivent s'acquitter d'une commission supplémentaire. Malgré ça, le service reste bénéfique pour eux, car généralement il leur permet d'atteindre plus rapidement et plus facilement leur objectif de recette. Selon les chauffeurs, les courses transmises par le centre d'appel sont très variées. Elles concernent toutes sortes de déplacements à l'échelle de l'agglomération de Dakar, et dont certains sont parfois très éloignés. Des chauffeurs peuvent par exemple être sollicités sur plusieurs jours pour faire des excursions en région.

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

La combinaison de la flotte de taxi et du centre d'appel fait qu'aujourd'hui l'offre de transport de la CCBM est la plus flexible et la plus polyvalente de Dakar. C'est en effet pleinement un transport à la demande. Grâce aux moyens mis en œuvres, l'entreprise est capable de répondre à quasiment n'importe quel besoin de déplacement, nuit et jour, sept jours sur sept. Le service semble performant avec une bonne qualité de service, mais il y a un prix à payer.

4.3.3 Les tarifs du centre d'appel et la clientèle ciblée

Pour avoir un ordre d'idée, une course de l'aéroport vers Dakar-plateau coûte 5 000 FCFA. Nous estimons que cette course, avec un taxi indépendant, coûte entre 3 500 FCFA (pour un dakarais habitué à négocier) et 10 000 FCFA (pour un étranger peu expérimenté en négociation). Pour donner un autre exemple, la société facture 5 000 FCA la réservation d'un véhicule et son chauffeur pour une heure, quelque soit le lieu de déplacement. Si le client dépasse les cinq heures, le prix est réduit à 3 500 FCFA de l'heure. Pour une réservation sur plusieurs jours, le coût s'élève à 50 000 FCFA la journée et le client doit prendre à sa charge le carburant. La réservation d'un aller simple à Saint Louis, par exemple, coûte 60 000 FCFA. Avec un taxi indépendant, le prix est au minimum de 45 000 FCFA et il peut aller bien au-delà. Pour les professionnels ayant souvent recours à leur service, des abonnements sont proposés. Sans être excessifs, les prix ne sont pas à la portée de toutes les bourses. Ils sont abordables pour un Sénégalais avec de bons revenus, très abordables pour les professionnels et les étrangers des pays du nord. Leur offre de transport se positionne donc comme un service de qualité intermédiaire, mais non de luxe.

Les personnes s'adressant au *call-center* sont diverses. Les clients sont des particuliers comme des professionnels, les réservations sont aussi bien individuelles que collectives. En effet, les chauffeurs assurent souvent le déplacement de petits groupes de personnes. Ce sont généralement des professionnels qui viennent à Dakar pour des séminaires. Il arrive aussi aux taxis de transporter des familles qui viennent faire du tourisme. La société travaille aujourd'hui avec de grands organismes et des entreprises étrangères de renommée. Beaucoup de leurs réservations concernent d'ailleurs l'accueil de clients à l'aéroport. Le chauffeur attend la personne directement à la sortie de l'aéroport ce qui est agréable, pratique et sécurisant pour un client étranger. Selon eux, la plupart des clients sont maintenant des habitués, parfois exigeant mais satisfaits du service.

4.3.4 Un modèle de réussite pour les transporteurs dakarais ?

Le système mis en place par la CCBM présente un certain nombre de qualités et d'avantages. Concernant les chauffeurs, il leur permet d'acquérir au bout de quelques années des véhicules achetés neufs. Étant en contrat avec la société civile, ils bénéficient d'une certaine assurance dans leur travail (ils sont payés chaque mois) et d'une certaine protection (ils n'ont pas de soucis de corruption avec la police). Enfin, le centre d'appel est une source de travail non négligeable pour les chauffeurs concernés, avec des courses et des clients très rentables. Concernant les utilisateurs, même si nous n'avons pas eu le temps de réaliser des enquêtes précises auprès des clients, le service semble être de qualité. C'est sans aucun doute le service le plus souple et le plus confortable. Gardons toutefois à l'esprit qu'avec les tarifs pratiqués, l'offre est adressée à une certaine catégorie de population. Même si les prix sont guère plus élevés que les taxis jaunes et noirs, la grande majorité des sénégalais n'auront pas les moyens d'utiliser le *call-center*. En effet,

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

le recours à un taxi conventionnel représente déjà une forte dépense pour une grande majorité d'entre eux.

Aussi, le système mis en place n'est pas sans faille. Tout d'abord, il semble que les chauffeurs sous contrat ne soient pas tous considérés de la même façon. Si on reprend les chiffres, on se rend compte que 10 % seulement des chauffeurs bénéficient de la complémentarité avec le centre d'appel. Qu'en est-il donc pour tous les autres chauffeurs ? Quelle est leur condition de travail ? Le chauffeur interrogé, qui travaillait avec le *call-center* nous a avoué un manque de cohésion et d'entente entre les chauffeurs. Ensuite nous pouvons nous demander quelles sont aujourd'hui et dans les années à venir les capacités de la CCBM à maintenir, voir augmenter sa flotte. En effet, les chauffeurs, au même titre que les taxis jaunes et noirs, sont eux aussi confrontés aux difficultés économiques, à la baisse du pouvoir d'achat des sénégalais, à l'augmentation du prix de l'essence et la forte augmentation du nombre de taxis en circulation. Les prix sont donc pour eux aussi très serrés, ce qui rend le travail de plus en plus difficile. L'état des véhicules est un marqueur intéressant. En effet, pour des véhicules neufs datant de 4 ans tout au plus, leur état semble fortement dégradé. Parfois, la climatisation ne fonctionne plus et les chauffeurs n'arrivent pas à maintenir leur véhicule dans un état correct.

4.3.5 Fiche signalétique

Statut (juridique)	Formel, licence délivrée par le ministère des transports
Principe d'organisation	Mixte : haut niveau d'organisation avec la centrale d'appel et auto-organisation
Objectif du service	Offrir un service de qualité et compétitif
Gestion	Société CCBM, artisanale (chauffeurs propriétaires)
Objectif de l'opérateur	Rentabilité financière
Capacité des véhicules	Service individuel (une réservation = une course), pratique du taxi collectif pour certains chauffeurs, 4 à 7 places
Rapidité	Rapide
Tarification	Prix de la course fixé en fonction de la distance à parcourir, du lieu à desservir, et d'éventuels embouteillages sur la route. Possibilité de réserver un véhicule à l'heure ou à la journée.
Sécurité	Bonne
Nuisances	Assez faibles
Exemples	Taxis bleus, Taxis <i>sister</i>

Tableau 9 : fiche signalétique des taxis de la CCBM.

Conclusion partie 1 : les services flexibles sélectionnés

In fine, cet état de l'art des transports flexibles nous a révélé la grande variété de systèmes opérant en France et au Sénégal. Certes, il existe des différences significatives entre les deux contextes, essentiellement dues au cadre institutionnel, juridique et économique qui diffèrent. Pourtant, en nous focalisant sur les modes opératoires des systèmes, nous avons pu remarquer un certain nombre de similitudes. Par exemple, nous avons constaté qu'après leur indépendance, les autorités sénégalaises n'ont cessé de développer des aides et des solutions pour limiter l'emprise du secteur informel, voire le remplacer, dans l'optique de se rapprocher des systèmes réguliers européens (e.g. Minibus AFTU). À l'inverse, nous avons souligné que depuis une quinzaine d'année, les autorités françaises ont favorisé l'émergence du transport public flexible (e.g. TAD), notamment pour contrer la dépendance automobile. Or des services souples existent depuis de nombreuses années, en Afrique, ils s'avèrent très populaires et particulièrement développés à Dakar.

Cette thèse s'interroge sur l'apport de la flexibilité sur le fonctionnement des systèmes de transports publics collectifs (ou semi-collectifs). Nous proposons par la suite un ensemble de modèles intégrant différents niveaux de flexibilité. Chacun d'entre eux est inspiré de services réels. Pour bien comprendre nos choix conceptuels, nous avons, regroupé dans le tableau 10, les différents systèmes observés selon leur niveau de flexibilité.

En fonction de cette classification, nous avons pu sélectionner les services les plus intéressants pour notre étude, en distinguant ceux qui ont été simulés et analysés de manière approfondie, de ceux qui ont plutôt été utilisés à titre de comparaison. L'illustration 23 schématise notre processus de sélection. Comme nous pouvons le voir, les deux types de service situés au cœur de cette thèse sont les taxis collectifs (type « clandos ») et les TAD dynamiques (type Modulobus). Ils ont été simulés sur toute une variété de territoires virtuels et dans de nombreuses conditions de simulation. Nous nous sommes également intéressés aux services réguliers (type minibus) et aux services individuels (type taxi), à titre de comparaison et pour élargir nos investigations.

Partie 1.L'offre de transport en France et au Sénégal

Niveau 0	Exemple français	Exemple sénégalais
<ul style="list-style-type: none"> - systèmes opérant sur des lignes régulières : transport de masse - arrêts et horaires de passages fixes - capacité d'adaptation sur le temps long uniquement (i.e. ajustement d'un service à l'année) 	<ul style="list-style-type: none"> - Autobus - TCSP - Métro 	<ul style="list-style-type: none"> - Bus Dakar Dem Dikk - Minibus AFTU
Niveau 1	Exemple français	Exemple sénégalais
<ul style="list-style-type: none"> - systèmes opérant sur des lignes régulières : ils bénéficient alors du fort regroupement des clients (rentabilité) - s'autorisent néanmoins des détours et des modifications ponctuels : possibilité de s'adapter relativement facilement à la demande de mobilité - horaires et arrêts indéterminés 	TAD à déclenchement sur lignes régulières	<ul style="list-style-type: none"> - « cars rapides » - Ndiaga Ndiaye
Niveau 2	Exemple français	Exemple sénégalais
<ul style="list-style-type: none"> - pas d'itinéraires fixes - arrêts plus ou moins fixes et horaires déterminés par la demande des clients - couverture spatiale étendue et forte capacité d'adaptation 	TAD optimisé (centrale de réservation)	Taxis « clandos »
Niveau 3	Exemple français	Exemple sénégalais
<ul style="list-style-type: none"> - pas d'itinéraires fixes - arrêts et horaires entièrement déterminés dynamiquement par la demande des clients - couverture spatiale et capacité d'adaptation maximales 	<ul style="list-style-type: none"> - TAD dynamique (Modulobus) - Opérateurs de taxis 	<ul style="list-style-type: none"> - Taxis jaunes et noirs - Taxis de la CCBM

Tableau 10 : l'offre de transport française et sénégalaise regroupée en quatre niveaux de flexibilité.

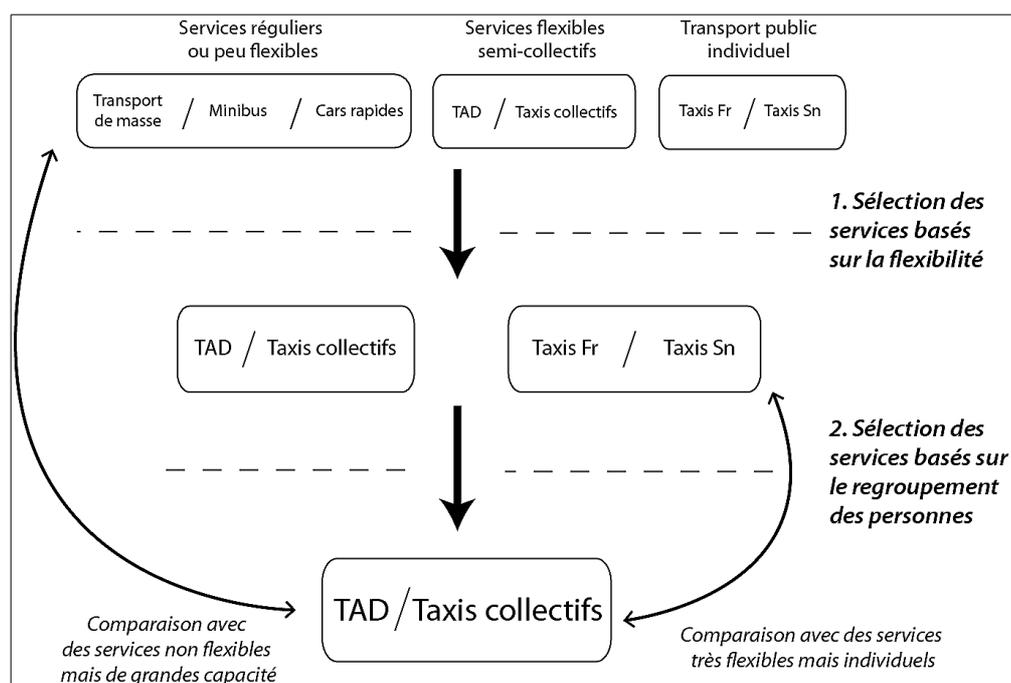


Illustration 23 : les services de transport sélectionnés.

Partie 2.
Modélisation multi-agents
de systèmes de transport

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Après un premier état de l'art thématique, nous exposons dans une deuxième partie tous les fondements méthodologiques de la thèse. Notre recherche est basée sur la modélisation multi-agents de services de transports flexibles. L'objectif est de montrer en quoi la représentation de ces services sous forme d'agents est intéressante et pertinente pour analyser et comparer le fonctionnement de services virtuels.

Notre approche de modélisation s'insère dans le paradigme de la complexité. Par définition, les systèmes multi-agents sont également très liés à la systémique. Nous présentons donc dans un premier chapitre les concepts, théories et méthodes de cette approche.

Dans un second chapitre, nous proposons un état de l'art complet sur la simulation multi-agents appliquée à la thématique du transport. Nous présentons notamment les différentes approches et leurs finalités. Nous justifions aussi notre posture méthodologique en précisant nos choix de modélisation et les différents outils que nous avons mobilisés pour parvenir à nos objectifs.

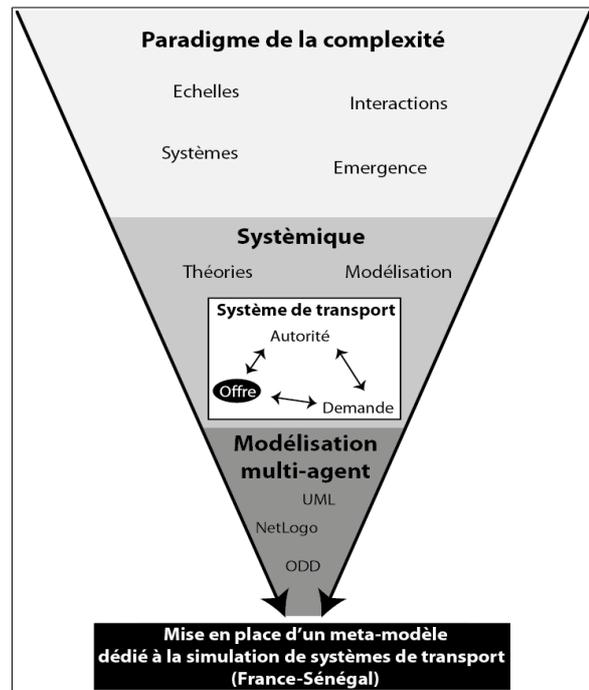


Illustration 24 : fondements méthodologiques.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation du Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS), outil dédié à la simulation de transports flexibles. Nous présentons d'abord la démarche générale qui nous a permis de transcrire des modes de fonctionnement observés en France et au Sénégal en comportement d'agents. Nous expliquons dans un second temps la structure et le fonctionnement du meta-modèle. Nous détaillons ensuite chacun des systèmes de transport modélisés en précisant les principes de fonctionnement auxquels ils renvoient. Enfin, nous présentons les diverses fonctionnalités offertes par le simulateur pour simuler et analyser les modèles.

Sommaire partie 2.

Chapitre 1. Le cadre théorique.....	99
Chapitre 2. Des modèles à base d'agents pour l'étude de systèmes de mobilité.....	111
Chapitre 3. Le Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS).....	131
Conclusion partie 2 : les fondements méthodologiques.....	164

Chapitre 1. Le cadre théorique

1.1 Le paradigme de la complexité

Dans le langage courant, les deux termes « complexe » et « compliqué » sont souvent utilisés sans réelle distinction. Or, dans notre contexte, ils ont des acceptations différentes qu'il est bon de préciser.

« L'existence de très nombreux éléments dans un ensemble n'est pas une condition suffisante à l'émergence d'une propriété complexe. Bien que la combinatoire puisse rapidement engendrer des assemblages compliqués, cette caractéristique peut parfois être maîtrisée par un dénombrement [...] Lorsque l'on ne peut plus totalement diviser un système en parties indépendantes, on glisse du compliqué vers le complexe : les comportements globaux résultants deviennent émergents et l'interdépendance des composants s'exprime dans un réseau d'interaction non linéaires qui est la source de la complexité » (Collard et al. 2013)

1.1.1 Qu'est-ce qu'un système complexe ?

Le mot complexité provient de la racine latine plexus (entrelacement), complexus (connexion) et perplexus (embrouillé) (Le Moigne 1999). Ces trois mots reflètent bien l'importance des relations lorsqu'on se place dans le paradigme de la complexité. Un système complexe est « un ensemble d'éléments en interaction, une totalité organisée, plus ou moins ouverte sur l'environnement » (Dauphiné 2003) ou encore « un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but » (De Rosnay 1997). On dit généralement que le tout d'un système complexe est supérieur à la somme des parties. Autrement dit, le comportement du système dans son ensemble ne peut pas être déterminé « en le divisant et en comprenant le comportement de chacune des parties prises séparément, ce qui est la stratégie réductionniste classique des sciences physiques » (Amblard & Phan 2006).

La complexité résulte donc d'un grand nombre d'éléments en interactions. Nous considérons trois grands types d'interactions :

- les interactions internes, c'est-à-dire entre les différentes entités du système ;
- les interactions entre les composantes d'un système et ses conditions initiales. ces conditions peuvent être formalisées sous forme d'état, de quantité de ressources, etc. ;
- les interactions entre un système et son environnement. L'environnement rassemble tous les éléments qui englobent un système et qui influencent directement, ou indirectement, son évolution. Dans l'environnement peuvent d'ailleurs être inclus d'autres systèmes en interaction.

« La notion de complexité implique celle d'imprévisible possible, d'émergence plausible du nouveau et du sens au sein du phénomène que l'on tient pour complexe » (Le Moigne 1999). Il existe de nombreuses façons d'entrevoir les formes de complexité, les définitions varient quelque peu selon les disciplines et la complexité est une propriété difficilement quantifiable, notamment en sciences humaines et sociales (Ménard & Filotas 2004).

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Elle repose sur la notion d'émergence, qui dépend elle-même de deux principes essentiels :

- le temps : bien qu'à court et moyen termes le comportement de certains systèmes puisse être déterministe, l'accumulation des interactions sur du long terme rend l'évolution d'un système complexe imprévisible ;
- les échelles : à partir d'un environnement donné, et avec des conditions initiales données, le fonctionnement d'un système complexe, connu à un niveau microscopique, peut s'observer à un niveau macroscopique. Les formes d'organisation observées diffèrent selon les niveaux d'observation. Elles résultent pourtant d'un même système défini à une certaine échelle.

La notion d'émergence est souvent discutée et critiquée au sein de la communauté scientifique, toutes disciplines confondues, et son statut épistémologique au sein des modèles paraît ambigu. La définition que nous considérons pour l'émergence s'accorde avec celle proposée par Denise Pumain :

« Dans le monde réel, que ce soit celui du vivant ou celui du social, de la nouveauté est produite, elle émerge véritablement, à partir de ce qui existe. Dans la transcription que nous en faisons dans les ordinateurs, les phénomènes d'émergence que nous savons simuler pour le moment, qui produisent un effet de surprise pour l'observateur, sont le plus souvent liés à la difficulté de celui-ci à concevoir le résultat du jeu des règles qu'il a lui-même introduites dans le modèle. Seule la rapidité de calcul de la machine, en permettant de dépasser les limitations de l'esprit humain, produit un effet de surprise, en réalisant une sorte de compression du temps. Mais la simulation de l'émergence d'une véritable nouveauté au moyen de modèles reste très difficile » (Pumain 2003).

Pourtant les systèmes qui nous entourent et que nous observons ne sont pas tous nécessairement complexes. « Le monde physique est rempli de systèmes qui sont linéaires ou approximativement linéaires. Ce qui signifie que les propriétés du tout sont une agrégation assez simple des parties » (Amblard & Phan 2006). *A contrario*, les systèmes linéaires sont relativement rares en Sciences Humaines et Sociales.

1.1.2 La complexité en Sciences Humaines et Sociales

Les sociétés humaines et leur territoire, objets d'étude privilégiés de la géographie, sont par nature extrêmement complexes, et ce, pour plusieurs raisons. Tout d'abord (i), le fonctionnement et l'évolution d'une société ne sont jamais détachés de son passé, de son histoire. Chaque individu possède une mémoire. Le savoir est transmis au fil des générations par l'intermédiaire de la pensée et par l'empreinte anthropique sur le terrain. Par définition, les territoires²³ sont eux aussi un lieu de mémoire (Piveteau 1995). Ces éléments historiques peuvent être d'ordre religieux, culturel, économique ou même technologique, ils jouent toujours un rôle important dans le fonctionnement et l'évolution d'un système sociétal. Une deuxième raison (ii) est que les individus ont plus ou moins la capacité d'identifier les propriétés émergentes d'une société et d'y répondre (Amblard & Phan 2006). Ils peuvent y répondre positivement, c'est-à-dire en

23 « Portion d'espace terrestre envisagée dans ses rapports avec des groupes humains qui l'occupent et l'aménagent en vue d'assurer la satisfaction de leurs besoins. » (Elissalde 2005)

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

accentuant le phénomène, ce qui peut mener à un changement de phase (basculement du système). Parmi les exemples marquants de l'année 2011, nous pouvons citer les révolutions populaires d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Le courant de révolte lancé par quelques individus a été assimilé et accentué par un nombre croissant d'individus, qui ont fait émerger une révolution sociale à un niveau global, entraînant pour certains pays un basculement du régime (Guidère 2012). Mais ils peuvent aussi répondre négativement et donc contraster avec le phénomène émergent. Ce principe renvoie aux phénomènes d'auto-organisation, de régulation, de stabilité, etc., que nous verrons ci-dessous. (iii) La complexité des sociétés humaines provient aussi du fait que les entités du système (les individus) sont extrêmement dynamiques : ils se déplacent, communiquent, échangent de l'information et évoluent au cours de leur vie, en interagissant avec leur environnement. Même s'il est possible de repérer des invariances et des stabilités sur une courte période, une société est donc intrinsèquement un système complexe dynamique. Enfin (iv), n'oublions pas que les individus sont eux-mêmes de nature complexe. En effet, les Hommes sont caractérisés par des comportements plus ou moins rationnels et logiques, mais ils ne le sont jamais totalement. L'inconscient, la croyance et les sentiments jouent un rôle très important, ce qui rend la prédiction des comportements humains délicats sur le long terme.

En comparaison, les automates (robots) sont à l'inverse intrinsèquement déterministes. Ils sont conçus à partir de programmes plus ou moins sophistiqués. Connaissant le programme, il est parfaitement possible de prédire le fonctionnement d'un automate. Cependant, et c'est ce point qui nous intéresse particulièrement, le fonctionnement d'un nombre important d'automates en simultané dans un environnement peut faire émerger des phénomènes complexes observables à un niveau agrégé, cette fois-ci non déterministe. C'est exactement ce qui est réalisé en simulation multi-agents, comme nous allons le voir ci-après.

1.1.3 La complexité dans les systèmes de mobilité

L'objet d'étude privilégié de cette thèse est le système de mobilité. Il convient donc de définir ici ce qu'est un système de mobilité, et d'expliquer pourquoi il doit être considéré comme complexe. Cela va nous permettre de justifier notre approche de modélisation basée sur l'agent.

Un système de mobilité est composé de plusieurs entités en interaction, plus ou moins organisées en fonction d'un but. Il fonctionne dans un environnement souvent bien délimité : le territoire de desserte, il est en constante interaction avec d'autres systèmes sociétaux comme le système politique, économique, social, etc. Ces systèmes connexes jouent un rôle relativement important et nous nous efforçons de ne pas négliger leur influence. Néanmoins, il est très difficile de prendre en compte tous les paramètres ayant une influence sur un système de mobilité. Ce n'est d'ailleurs pas l'objet de nos modélisations. Au cours de cette thèse, nous nous focalisons plutôt sur les différentes composantes du système de mobilité, que nous distinguons en trois sous-systèmes : la demande de mobilité, l'offre de transport et l'autorité organisatrice de transport, chacun d'entre eux étant plus ou moins complexe (cf. illustration 25). Nous détaillons chaque composante dans les paragraphes suivants.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

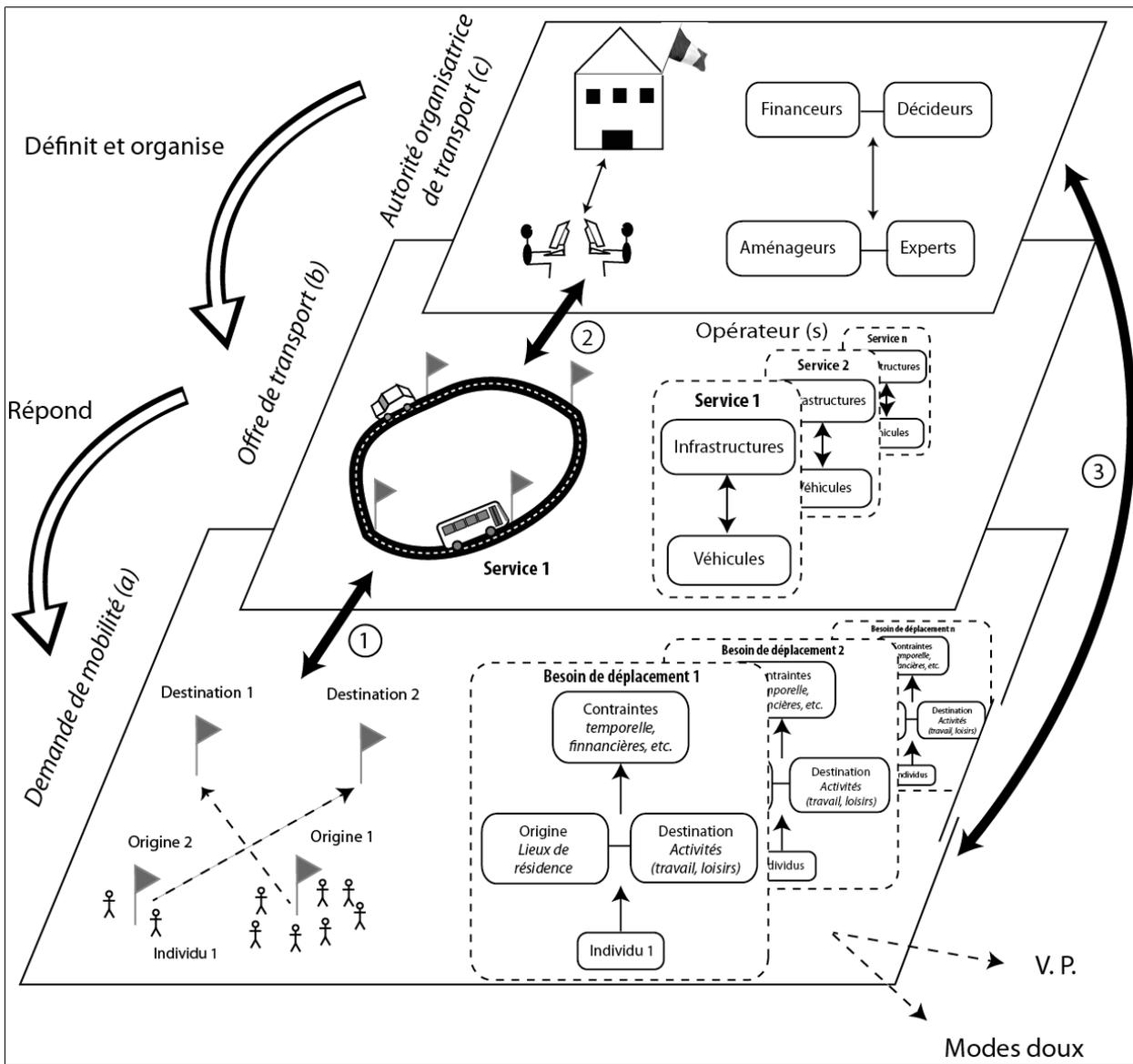


Illustration 25 : interactions et niveaux d'organisation d'un système de mobilité.

La demande de mobilité (cf. (a) dans l'illustration 25)

La demande de mobilité regroupe tous les individus vivant sur un territoire et ayant des besoins de déplacement. Ces besoins vont être fonction des modes de vie, des comportements, des moyens financiers, etc. D'un point de vue technique, nous pouvons caractériser ces besoins de déplacement par trois variables essentielles : le point de départ (origine), le point d'arrivée (destination) et les contraintes décisionnelles des individus. Ces contraintes sont de nature variée. Pour simplifier, on peut considérer que les deux contraintes décisionnelles majeures, par exemple en France et au Sénégal sont de nature temporelle (horaires et temps de parcours) et financière (le coût potentiellement supporté pour le déplacement). Bien sûr, il ne faut pas négliger d'autres paramètres tels que le confort, la sécurité, l'impact environnemental, etc. Ils peuvent jouer un rôle important dans le processus décisionnel, mais cela est très variable d'un contexte sociétal à

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

l'autre. Le critère environnemental est par exemple de plus en plus pris en compte en France, alors qu'il reste quasi-inexistant pour l'instant au Sénégal.

La demande de mobilité est certainement le sous-système le plus complexe, car il fait intervenir un très grand nombre d'individus en interaction, eux-mêmes de nature complexe. C'est la composante la plus imprévisible du système, obligeant les sociétés à investir de plus en plus de temps et d'argent pour enquêter sur les caractéristiques et le comportement de leurs citoyens. Les enquêtes ménages déplacement (EMD) sont un bon exemple d'études mises en place par les collectivités pour mieux comprendre les besoins de déplacement sur un territoire. De plus en plus fréquentes et précises, ces enquêtes constituent un outil indispensable pour la planification des déplacements urbains (CERTU 2005). Cependant, malgré tous les moyens mis en œuvre, il nous est impossible de prédire avec précision les déplacements de tous les individus, notamment les plus spontanés. Ainsi, sont généralement différenciés les besoins de mobilités récurrents d'une part, qu'on assimile généralement aux déplacements pour le motif travail et les déplacements occasionnels, d'autre part, qu'on assimile souvent au motif loisir. Le développement important de l'automobile a entraîné une forte augmentation de ces derniers types de déplacements. Cela complexifie considérablement la planification du transport public, car les déplacements sont toujours plus éparpillés dans l'espace et toujours plus imprévisibles dans le temps.

L'offre de transport (cf. (b) dans l'illustration 25)

L'offre de transport regroupe tous les services et les opérateurs. Elle constitue tout simplement la réponse faite à la demande de mobilité. Un service de transport est composé de véhicules (automobiles, autobus, tramways, etc.), d'infrastructures (routes, voies réservées, rail, arrêts, stations, etc.) et de principes de fonctionnement qui vont être plus ou moins compliqués et stricts selon les types de service. En France, les autorités confient la gestion des services de transport à des opérateurs selon le principe de délégation de service public²⁴. Chaque opérateur est responsable du bon fonctionnement d'un ou plusieurs services. Ce sont généralement de grosses sociétés de transport qui gèrent l'ensemble du transport public sur une, voire plusieurs agglomérations. À l'inverse, au Sénégal on observe une multitude d'opérateurs, passant du simple chauffeur de taxi à la société mixte Dakar Dem Dikk. Lorsque plusieurs opérateurs privés cohabitent sur un même territoire, il peut arriver qu'il y ait une compétition entre les services. Néanmoins, les offres de transport sont généralement conçues pour être complémentaires. Au-delà de la complémentarité, les différents services peuvent aussi être plus ou moins bien connectés entre eux. On parle alors d'intermodalité. Par exemple, une ligne de bus desservant une gare TGV peut être synchronisée avec l'arrivée des trains permettant ainsi un changement de mode rapide et simplifié pour les voyageurs.

Les services de transport ne sont pas tous nécessairement complexes dans leur fonctionnement. C'est le cas du métro qui circule sur des lignes totalement fixes et est cadencé sur des horaires relativement précis. Ainsi, à condition qu'il n'y ait pas d'incident particulier sur une ligne et que les chauffeurs respectent bien les limitations de vitesse, il est possible de

24 Selon la Loi n° 2001-1168 du 11 décembre 2001, la délégation de service public est l'ensemble « des contrats par lesquels une personne morale de droit public confie la gestion d'un service public dont elle a la responsabilité à un délégataire public ou privé dont la rémunération est substantiellement liée au résultat d'exploitation du service » (<http://www.legifrance.gouv.fr>).

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

déterminer avec précision la localisation de chaque véhicule en fonction des horaires. Ce sont d'ailleurs les avantages d'un tel service.

À l'inverse, les transports flexibles sont généralement plus complexes, car davantage imprévisibles. Le fonctionnement des taxis par exemple est beaucoup plus difficile à anticiper. Dans une ville, nous pouvons connaître les endroits où il y a une forte probabilité de trouver un taxi, par exemple les gares, les aéroports, etc., mais il nous est impossible d'anticiper la localisation précise de chaque taxi au cours du temps. Même s'il apparaît une certaine irrégularité dans les trajets des taxis, les clients définissent spontanément des origines et des destinations très variables. De plus, le trajet des taxis résulte précisément du choix de son conducteur et non d'un tracé purement géométrique et déterministe (comme les métros). Ainsi, pour aller d'un point A à un point B le chauffeur peut choisir entre différents parcours (cf. illustration 26). Ce choix va se faire en fonction de nombreux facteurs comme la présence d'embouteillages, d'obstacles ou d'éventuels clients à prendre (pour les taxis collectifs). Le chauffeur se déplace aussi en fonction de son instinct, de ses habitudes et de ses préférences pour telle ou telle route.

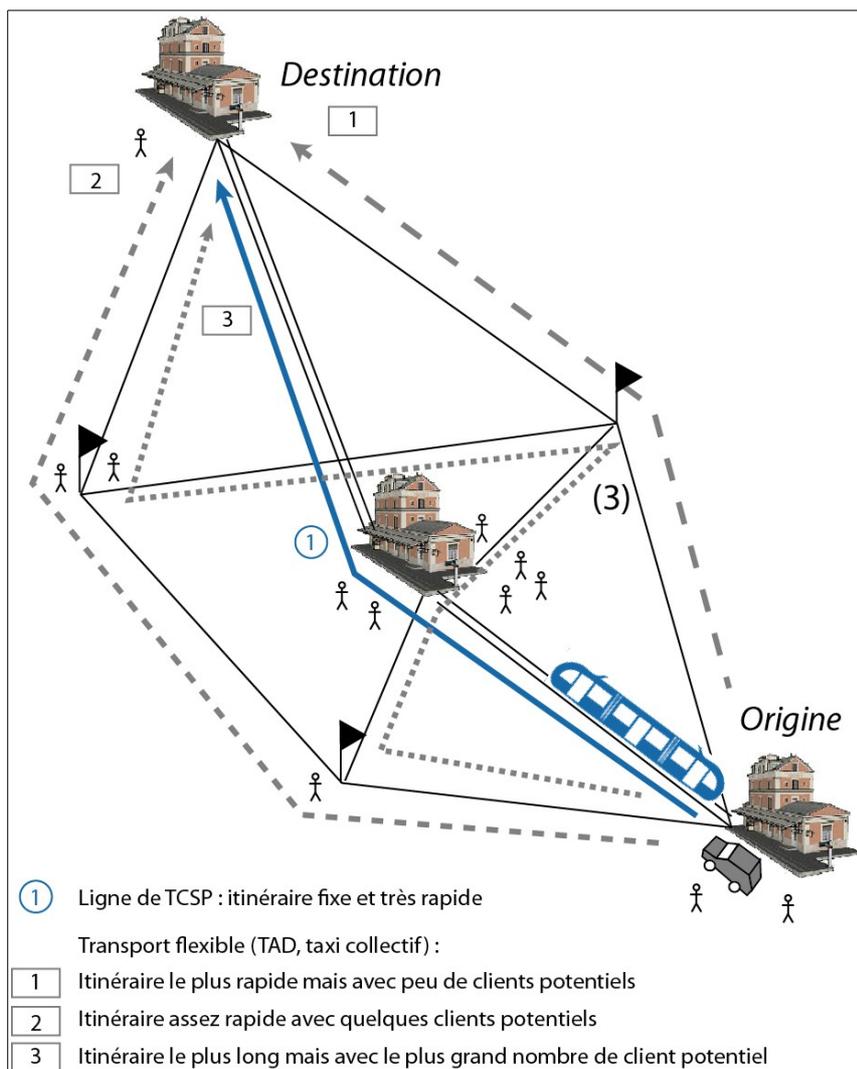


Illustration 26 : des niveaux de complexité qui diffèrent selon les services de transport.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Selon les territoires et les contextes sociétaux, l'offre de transport peut être relativement simpliste, comme particulièrement complexe. La présence de services artisanaux et/ou informels a tendance à largement complexifier le fonctionnement de ce sous-système. Son degré de complexité va donc dépendre des types de service déployés, mais aussi du nombre de services compris dans l'offre de transport et de l'intensité de leurs interactions.

L'autorité organisatrice de transport (cf. (c) dans l'illustration 25)

L'autorité organisatrice de transport prend les grandes décisions en matière de planification du transport public, de tarification et de son financement. Elle relève très souvent des pouvoirs publics, que ce soit en France ou au Sénégal, c'est-à-dire de l'État, des régions, des départements, ou des collectivités. Concrètement, ce sous-système a pour mission d'organiser le transport public de manière à ce qu'il réponde au mieux à la demande de mobilité sur un territoire donné. Pour ce faire, l'autorité dispose de financements qui peuvent être très variables selon les contextes sociétaux. Elle fait généralement appel à des experts de la mobilité et à des aménageurs, qui par l'intermédiaire de bureaux d'études, ont pour but de conseiller et d'aider à la prise de décision. Toutes les décisions sont prises au niveau des élus. Ils constituent le niveau hiérarchique le plus élevé du système. Toutes les cellules organisationnelles travaillent en interaction, mais encore une fois cela varie beaucoup d'un cas à l'autre. Néanmoins, les décideurs doivent être avertis et informés des besoins de leurs concitoyens. Ils doivent trouver la réponse la plus juste possible en fonction de leurs contraintes économiques, politiques, sociales, juridiques, etc. Le fonctionnement d'une AOT peut alors être très complexe. Son niveau de responsabilité va aussi dépendre du nombre d'habitants et de la taille du territoire. On comprend bien que les enjeux ne sont pas les mêmes selon que l'on travaille à l'échelle d'une métropole ou d'une petite commune de quelques milliers d'habitants.

Sauts d'échelle et interaction entre les trois sous-systèmes

Les trois sous-systèmes que nous venons de décrire ne doivent pas être considérés sur le même plan. Il est nécessaire de distinguer les trois niveaux d'organisations. La demande de mobilité constitue le premier niveau. C'est le niveau le plus désagrégé puisque nous raisonnons à l'échelle de l'individu. L'offre de transport se situe à un niveau supérieur, puisque l'objectif des services déployés est de regrouper les individus au sein des véhicules. Autrement dit, il n'y a pas un service de transport par personne, mais bien quelques services qui permettent de répondre à un ensemble d'individus. C'est le principe même du transport en commun. Enfin, le dernier niveau correspond à l'AOT qui comme nous venons de l'expliquer tente d'organiser et de contrôler les deux niveaux inférieurs. C'est le niveau décisionnel du système.

Pour résumer, un système de mobilité est composé d'une autorité organisatrice de transport, qui va mettre en place un ensemble de services de transports, permettant lui-même de répondre au besoin de déplacement d'une multitude de personnes (cf. illustration 25). C'est une logique pyramidale qui correspond parfaitement au paradigme multi-agents. Nous verrons que grâce à nos modélisations à base d'agents, il est possible d'analyser le fonctionnement d'un système de mobilité à un niveau agrégé. Ce dernier émerge du fonctionnement simultané d'un nombre important d'individus (les agents) à un niveau désagrégé.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Bien évidemment, ces trois niveaux sont interconnectés et nous proposons pour finir de caractériser ces trois types d'interactions.

(1) Pour que l'offre de transport soit efficace, il est nécessaire qu'il y ait un système de correspondance entre les services et les individus. Les utilisateurs doivent avoir une bonne connaissance des services disponibles (fonctionnement, horaire de desserte, tarification, etc.). Pour ce faire, des systèmes de communication sont déployés (plan du réseau, site internet, consultation téléphonique, etc.). Des infrastructures comme les arrêts de bus, les stations, ont aussi pour objectif de garantir une bonne accessibilité aux services. Mais les interactions entre services de transport et individus ne se font pas dans un seul sens : ils peuvent être dynamiques. Comme nous l'avons vu dans la première partie, les services flexibles français et sénégalais sont dépendants de la demande des clients. Une personne peut héler un véhicule spontanément (par exemple avec les taxis) ou elle peut déclencher un service grâce à un système de réservation (par exemple avec les TAD). Comme nous le verrons dans le chapitre 3, toutes les simulations que nous proposons dans cette thèse sont basées sur ce principe d'interaction entre services de transport et demande de mobilité.

(2) Les interactions entre services de transport et l'AOT sont beaucoup moins dynamiques. Par exemple, la mise en place d'un nouveau système de transport sur un territoire prend généralement beaucoup de temps, plusieurs années parfois dans le cadre de délégation de service. C'est aussi une opération relativement coûteuse qui se doit d'être durable. En général, on réalise au préalable un diagnostic territorial pour évaluer les besoins. On met ensuite en place des études de faisabilité pour définir l'offre la mieux adaptée au contexte et proposer plusieurs scénarii. Les interactions se font aussi sous forme de suivi. Il est indispensable pour les autorités de connaître la fréquentation des services, leur coût de fonctionnement, le niveau de satisfaction des usagers, etc. En fonction de ces informations, l'offre peut être ajustée. C'est d'ailleurs un des problèmes majeurs du transport informel : les autorités disposent de très peu d'information et leur contrôle sur les deux niveaux inférieurs est très limité.

(3) Enfin, il existe des relations entre le niveau décisionnel et les individus. En démocratie, les élus sont choisis par les concitoyens. Le principe d'élection est une forme d'interaction entre les deux niveaux : en choisissant un élu, on choisit sa politique et ses projets d'aménagements. La thématique des transports est de plus en plus présente dans les programmes politiques, tout niveau hiérarchique confondu, car les enjeux en termes d'aménagement urbain sont colossaux. Aussi, les autorités publiques doivent identifier les besoins de la population et être à l'écoute des électeurs. Pour renforcer l'interaction entre les deux parties, les autorités peuvent, par exemple, organiser des débats publics au cours desquels la mise en place d'un nouveau service de transport peut être discutée.

1.2 L'approche systémique

Directement liée au paradigme de la complexité, la théorie des systèmes a vu le jour aux États-Unis après la Seconde Guerre Mondiale par l'intermédiaire du biologiste Ludwig Von Bertalanffy (Bertalanffy 1968). Pourtant, Jean Brunhes emploie le terme de système dès 1910 (Dauphiné 2003). Dans son ouvrage, L. Von Bertalanffy reproche à la science traditionnelle d'être réductionniste, c'est-à-dire de découper la vie en morceaux alors que le vivant est complexe.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

L'approche traditionnelle apparaît donc insuffisante et la théorie des systèmes a pour objectif de mieux définir et de comprendre les lois de ces ensembles vivants complexes. Connue et pratiquée en France depuis les années 1970 (Walliser 1977), la systémique est aujourd'hui largement utilisée en sciences (physique, biologie, sociologie, géographie, etc.). L'approche peut être divisée en deux sous-parties (Donnadiou et al. 2003). Elle représente d'une part un ensemble de concepts et de théories que nous avons vu précédemment et fait référence aussi à un ensemble de méthodes et d'outils, présentés dans les paragraphes suivants.

1.2.1 La modélisation systémique

La systémique est une discipline qui « regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques, relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste et qui pose des problèmes de frontières, de relations internes et externes, de structures, de lois ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel, ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe » (Donnadiou et al. 2003). Les outils employés sont souvent les graphiques systémiques pour lesquels les composants d'un système sont hiérarchisés et représentés selon des formes codifiées. L'illustration 27 est un exemple de modèle générique décrivant le système de transport dans son environnement. L'attention est portée sur la représentation des interactions, que ce soit sous forme d'auto-renforcement (accentuation répétée d'un phénomène), de régulation (compensation de différentes interactions), de rétroaction (actions reçues en *input* et dépendantes d'un *output*), etc. Ces modèles sont généralement statiques, mais ils peuvent être représentés de manière dynamique sur des logiciels comme Stella (Richmond 1985; Wallis et al. 1985). La seconde façon de représenter les systèmes repose sur les équations différentielles qui permettent de calculer l'évolution des variables en fonction du temps, et donc d'étudier la dynamique du système dans un repère temporel. Il est aussi possible de combiner ces deux modes de représentation.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

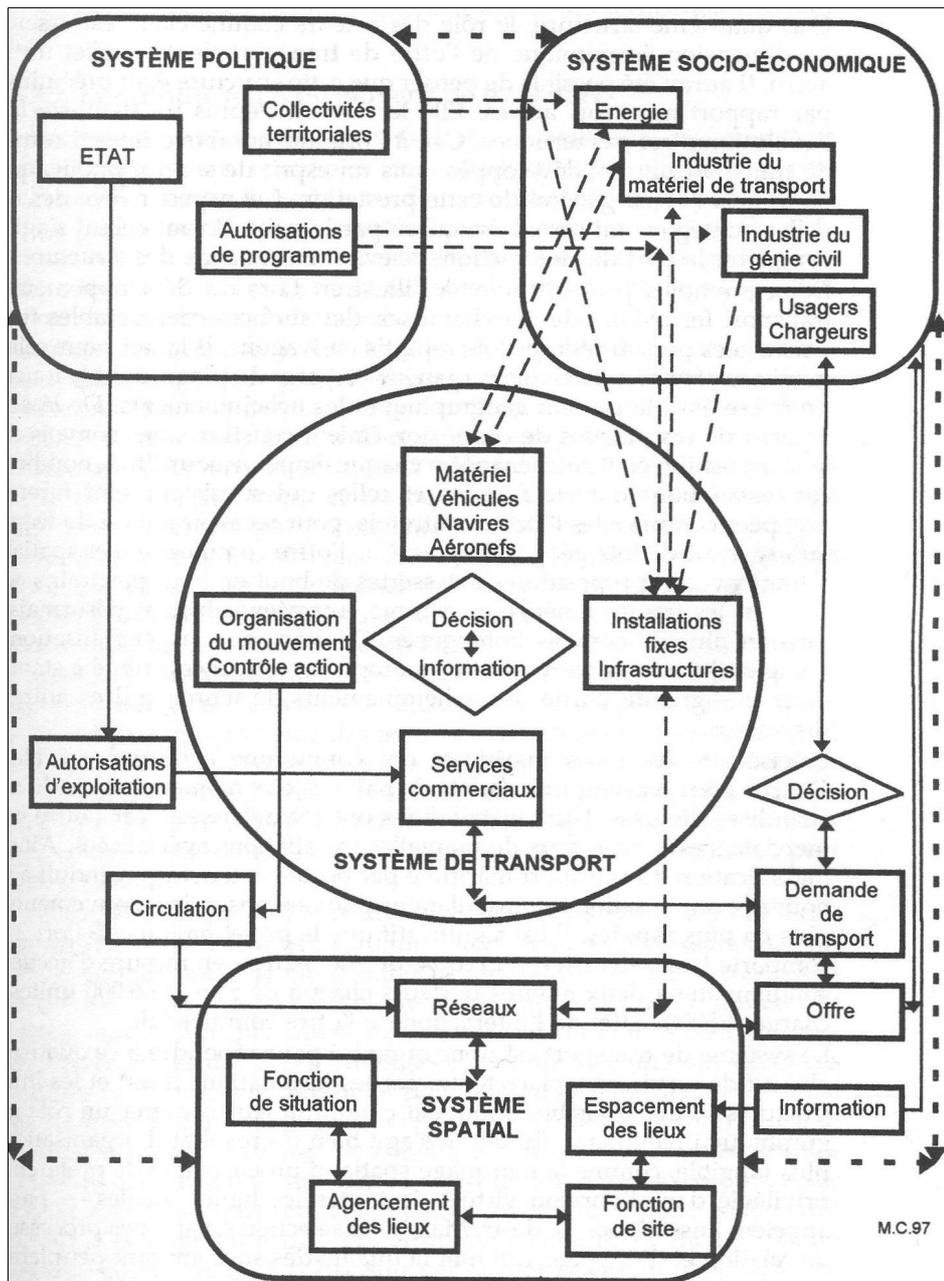


Illustration 27 : modélisation d'un système de transport et de son environnement (Marcadon et al. 1997)

La modélisation systémique et le paradigme multi-agents sont très liés. La modélisation multi-agents offre un cadre méthodologique complémentaire, orienté vers la simulation des systèmes. Dans un SMA, l'aspect dynamique y est intuitivement représenté et analysé. Cependant, les autres méthodes de modélisation telles que les modèles graphiques et numériques sont indispensables. Ces modèles constituent même une étape préliminaire dans la conception des modèles informatiques. Dans le troisième chapitre nous expliquons le fonctionnement de chaque modèle par des graphiques systémiques. Pour chacun d'entre eux, nous avons utilisé le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language), que nous présentons à la fin du troisième chapitre.

1.2.2 La théorie des systèmes

Le but de la théorie générale des systèmes « est de formuler des principes valables pour les systèmes en général indépendamment de la nature des éléments qui les composent et des relations, des forces, qui les relient » (Bertalanffy & Paulré 1993). L'objectif n'est pas ici de présenter toutes les lois de la théorie des systèmes, car elles sont nombreuses. Nous présentons celles qui nous semblent les plus pertinentes pour caractériser et décrire le fonctionnement des systèmes de mobilités observés, à savoir les principes d'organisation et d'auto-organisation, et ceux d'équilibre et de stabilité.

Organisation et auto-organisation

« Si l'agent symbolise l'individuel, l'organisation symbolise le collectif » (Langlois 2010). Par définition, un système est un ensemble d'éléments organisés en fonction d'un but plus ou moins identifié. Il est néanmoins possible de distinguer différentes formes d'organisation. « Une organisation compartimentée est formée de composants individualisés ayant des fonctions spécifiques, tels les organes d'un être vivant [...] Dans ce cas, la création d'un nouveau composant ou sa disparition, modifie et remet en cause l'organisation tout entière. » (Langlois 2010). Les services de transport contrôlés par une entité de plus haut niveau sont tous des systèmes organisés et compartimentés, c'est-à-dire que chaque composante est indispensable pour le fonctionnement du système. Elles sont hiérarchisées, en interaction et dépendantes les unes des autres. Prenons l'exemple d'un TAD avec des véhicules réalisant des tournées optimisées. Si l'une des composantes du système (centrale de réservation, noyau d'optimisation, ou les bus) ne fonctionne plus, c'est tout le service qui est bloqué.

Dans un système auto-organisé, chacun des éléments est autonome et plus ou moins conscient des phénomènes émergeant au niveau global (Dupuy 1994; Bonnefoy 2005). Ils peuvent savoir qu'il existe d'autres entités, similaires ou non à eux, plus ou moins en interaction. Dans le domaine des transports, les entités autonomes peuvent avoir trois modes de fonctionnement. Dans le premier cas (i), ils vont fonctionner de manière totalement indépendante. Ils ont une connaissance très limitée de la composition du système, leur fonctionnement influence peu les autres entités. Ce cas reste relativement rare. Par exemple, on peut imaginer une situation où chaque taxi opère dans un territoire bien délimité. Les clients cibles se limitent donc aux personnes désirant se déplacer dans le périmètre desservi par le taxi. Les taxis n'ont pas nécessairement de relation entre eux, pourtant au niveau global la desserte est organisée et chaque personne peut se déplacer sur son territoire. Dans un deuxième cas (ii), les entités sont autonomes et fonctionnent en concurrence. Le fonctionnement des entités a donc une influence sur celui des autres entités. Les exemples de concurrence sont fréquents en Afrique, notamment avec les services artisanaux et informels. À Dakar, les taxis clandestins sont un très bon exemple de service en concurrence permettant pourtant un fonctionnement auto-organisé au niveau global. Les taxis vont chercher les espaces les plus rentables à desservir, peu importe si d'autres services de transports opèrent déjà dans la zone. Si la concurrence est trop rude, ils vont déployer des stratégies commerciales ou bien trouver un autre territoire de desserte. Enfin (iii), les entités peuvent être auto-organisées et en coopération. Non seulement elles ont une connaissance de la présence d'autres entités, mais le fonctionnement d'une entité facilite ou permet le fonctionnement d'une autre entité. La coopération se fait souvent par échange d'information entre les éléments. Par exemple, certains services de taxis n'hésitent pas à communiquer entre eux pour organiser leur desserte. Un taxi ayant repéré une forte présence de

clients à un endroit peut ainsi appeler un autre taxi pour le conseiller de se déplacer dans cette direction. Ce principe présente un fort potentiel, notamment avec le développement important des (N)TIC²⁵.

Équilibre et stabilité

Un système équilibré conserve son état au cours du temps. « Les variables d'état qui décrivent le système ne croissent pas et leur dérivée par rapport au temps est nulle. Cette conservation peut être statique si les relations entre le système et l'environnement sont constantes, ce qui est exceptionnel en géographie, ou dynamique quand la transformation entre les entrées et les sorties est constante » (Dauphiné 2003). Idéalement, un service de transport type bus ou métro est un système équilibré. Il est conçu de telle façon que chaque jour (en fonction des périodes de mobilité), il va être capable de répondre, de manière constante, à la demande de mobilité. En d'autres termes, il est calibré pour satisfaire une certaine quantité de clients sur un territoire et en un temps donné.

Un système de transport équilibré n'est pas forcément stable. Un système est considéré comme stable s'il réussit à revenir et à maintenir son état d'équilibre malgré la perturbation de son environnement. Le système possède alors des capacités d'auto-réparation, il est capable de détecter et de réparer des erreurs, et/ou d'auto-régulation, ses paramètres étant ajustés de manière autonome (Kaddoum et al. s. d.) « Les trajectoires stables correspondent à des périodes où la configuration d'ensemble du système (décrite par des variables d'état définies au niveau macroscopique) ne se modifie guère ou évolue lentement, en dépit des nombreuses fluctuations qui peuvent affecter les variations d'état de chacun des éléments du système » (Pumain 1998). Reprenons l'exemple d'un métro. Imaginons qu'il y ait des grèves et de fortes perturbations sur le fonctionnement global du service. Les individus affectés par la perturbation vont être contraints de se rabattre sur d'autres lignes. Or, si ces lignes arrivent à saturation (puisqu'elles sont calibrées pour recevoir une certaine quantité de clients), les usagers vont devoir attendre plus longtemps que d'habitude. Leur déplacement va donc être fortement retardé, voire annulé. Dans ce cas précis, le système est saturé. Il ne répond plus aux besoins des individus. Il est alors considéré comme instable. À l'inverse, les TAD sont parmi les services de transport les plus stables. Ils sont, en théorie, conçus pour s'adapter à la demande de mobilité et donc répondre de manière mécanique et efficace à ces fluctuations. Néanmoins, il est certain que tout système est conçu et calibré pour répondre à une certaine quantité de demandes. Chacun possède une marge de manœuvre plus ou moins grande, mais au-delà d'un certain seuil (critique), se retrouve logiquement en état de saturation.

25 (Nouvelle) Technologie de l'Information et de la Communication

Chapitre 2. Des modèles à base d'agents pour l'étude de systèmes de mobilité

2.1 La modélisation multi-agents

Comme le montre l'illustration 28, la modélisation à base d'agents est issue de la micro-simulation, de la modélisation par automates cellulaires et de l'intelligence artificielle (Troitzsch 1997). Ces champs de recherche « possèdent en commun le fait de représenter de façon explicite des entités et leurs comportements sous une forme informatique et d'étudier, grâce à la puissance qu'offrent les ordinateurs actuels, les structures émergentes qui naissent, *in silico*, de leurs interactions virtuelles » (Treuil et al. 2008).

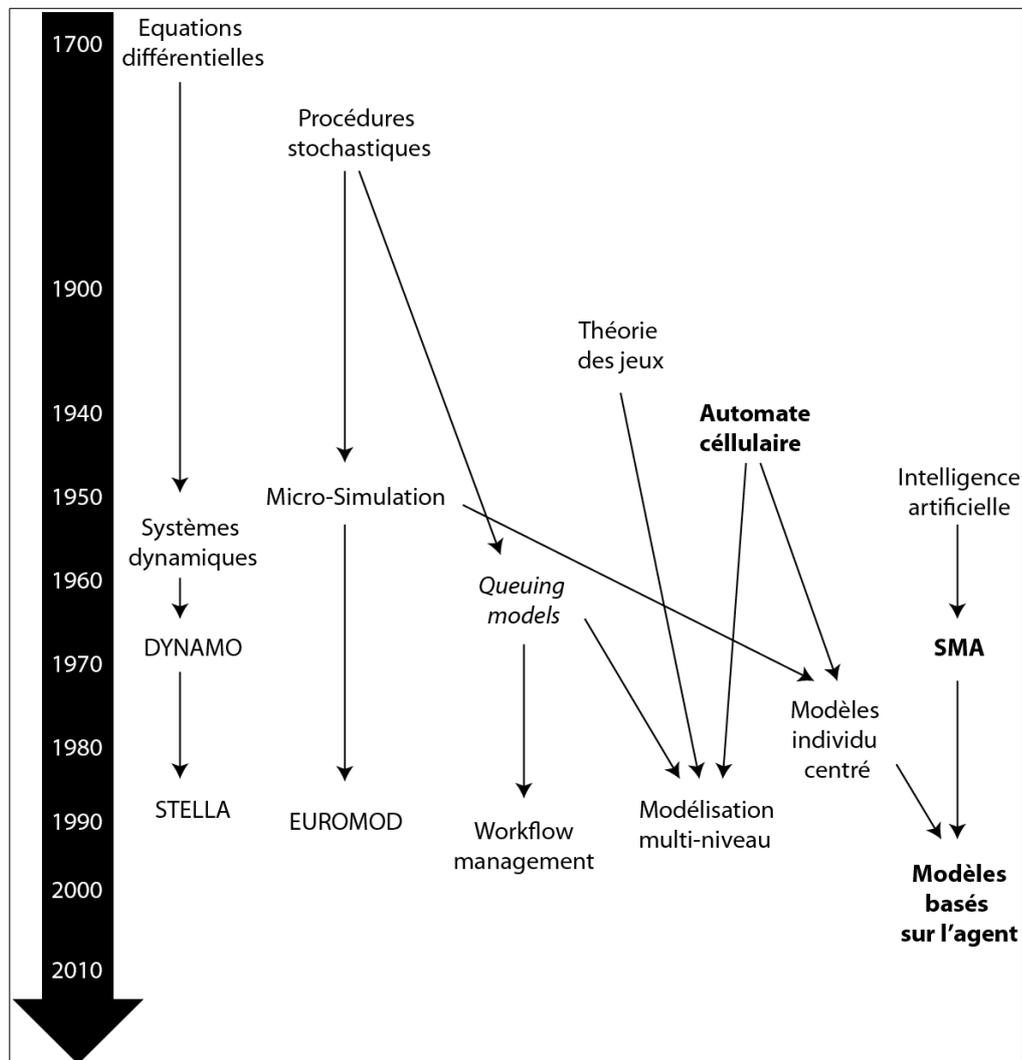


Illustration 28 : chronologie et évolution des méthodes de modélisation (adapté de (Troitzsch 1997)).

Même si de nombreux outils combinent maintenant un automate cellulaire avec un système multi-agents, les deux méthodes, bien que très proches, doivent être distinguées. John Von Neumann a introduit les premiers exemples d'automates cellulaires dans son ouvrage *Theory of Self Reproducing Automata* en 1966 (Von Neumann & Burks 1966). À l'origine, ces modèles

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

très simples sont constitués de programmes informatiques (les cellules), disposés sous forme de grille. Les automates ont des capacités de calcul et ils sont soumis à des états qui varient au cours de la simulation. C'est le fonctionnement combiné d'un grand nombre d'automates qui permet de modéliser des phénomènes dits complexes. Le jeu de la vie qui permet de simuler des formes très complexes à partir de règles simples est un des exemples le plus ancien et le plus connu (Gardner 1970; Conway 1970). Aujourd'hui, le modèle de ségrégation de Thomas Schelling (Schelling 1971) est très prisé par les géographes et les sociologues. Il permet de montrer que des niveaux élevés de ségrégation résidentielle peuvent apparaître, même lorsque des individus sont disposés à avoir une majorité de personnes d'appartenance ethnique différente vivant dans leur voisinage. De nombreux travaux sont toujours basés sur ce modèle. C'est un modèle relativement simple, mais qui possède de véritables qualités heuristiques et pédagogiques.

Un modèle est « une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement d'un système de référence en répondant à une question qui le concerne. Représentation simplifiée de ce système, un modèle s'appuie sur une théorie générale et il est exprimé dans un langage spécifique appelé langage de modélisation » (Treuil et al. 2008). La modélisation à base d'agents consiste à comprendre le fonctionnement d'un système en étudiant le comportement d'individus (les agents) et en analysant les relations qu'entretiennent ces individus, à la fois entre eux, et avec l'environnement dans lequel ils évoluent. Les agents sont des entités virtuelles autonomes (programmes informatiques) capables de se conserver ou de se maintenir (Ferber & Perrot 1995). Ils sont dotés d'attributs, de comportements plus ou moins sophistiqués et sont capables d'interagir directement ou indirectement avec d'autres entités du système (cf. illustration 29). Ils possèdent toujours une connaissance plus ou moins limitée de leur environnement (capacité de perception) et des ressources qui leur sont propres (Amblard & Phan 2006). Chaque agent est localisé et évolue dans un environnement lui-même défini par sa métrique²⁶, ses lois de fonctionnement et par toutes sortes d'attributs, qui peuvent évoluer au cours d'une simulation. Selon leur fonction au sein du système et donc selon leurs comportements, les agents peuvent être mobiles, réactifs aux différents signaux reçus, ou encore, ils peuvent communiquer et apprendre de leurs interactions. On les qualifie alors d'agent cognitif. Dans nos modèles, nous manipulons à la fois des agents réactifs et cognitifs. Au sein d'une même famille, les agents possèdent des comportements, des capacités de perception et des mécanismes de décision qui leurs sont communs.

²⁶ fonction qui définit la distance entre les éléments d'un ensemble.

à l'analyse de sa réponse en fonction des paramètres d'entrée » (Amblard & Phan 2006). Nous pensons que l'intérêt réside dans la compréhension des phénomènes. Le modélisateur doit toujours se concentrer sur la relation entre les comportements locaux et l'organisation globale.

La simulation basée sur l'agent s'est beaucoup développée en Europe au cours des 15 dernières années. Des chercheurs de disciplines très variées se retrouvent aujourd'hui autour des sciences de la complexité. Il existe un grand nombre d'outils disponibles pour modéliser et expliquer les systèmes, et ceux que nous employons sont aussi bien utilisés en physique, en biologie, en sociologie, etc. Les systèmes multi-agents sont aujourd'hui très prisés en Sciences de l'Homme et de la Société (SHS). D'une part, parce que les deux variables que sont l'espace et le temps (discret) peuvent y être avantageusement représentées. D'autre part, parce que les interactions entre plusieurs entités ainsi que la dynamique globale d'un système peuvent y être intuitivement analysées. Les SMA, bien que disposant d'un très large spectre applicatif, se prêtent particulièrement bien à la simulation de la mobilité. Le mouvement, c'est-à-dire le « changement de position dans l'espace en fonction du temps, par rapport à un système de référence » (Robert & Rey 2001), est en effet une propriété intrinsèque des agents (Marilleau 2006).

2.2 Des objectifs de modélisation variés

Les systèmes multi-agents peuvent être utilisés de différentes manières et dans des cadres de recherche très différents. Comme nous allons le voir, les niveaux de complexité diffèrent selon les approches et la finalité des modèles également. Néanmoins, la logique reste toujours la même : on raisonne au niveau des agents pour analyser des structures ou des solutions émergentes à un niveau plus agrégé. Nous présentons ici trois objectifs de modélisation multi-agents avec des modèles appliqués au transport et à la mobilité. Le premier objectif concerne la prédiction de l'évolution des systèmes, avec des modèles descriptifs permettant de simuler des systèmes de mobilité réalistes à grande et petite échelles. La deuxième catégorie de modèles a pour but d'expliquer la dynamique des systèmes. Il ne s'agit pas de fournir des prévisions « valides » mais plutôt de s'interroger sur « pourquoi » et « comment » le système évolue (Amouroux 2011). À un niveau plus local, le dernier objectif de modélisation concerne l'optimisation des systèmes. Cette catégorie de modèle est très utilisée en Recherche-Opérationnelle, notamment dans le domaine des systèmes de transport intelligent (*Intelligent Transport System*) (Tao 2007; Winter 2008).

2.2.1 Simuler des systèmes de mobilité réalistes

Au sein des sciences cognitives et sociales, une première catégorie de modèles descriptifs est destinée à la prédiction de l'évolution des systèmes (Treuil et al. 2008). Ces modèles peuvent être rattachés au principe KIDS « Keep It Descriptive Stupid » (Edmonds & Moss 2005). En analyse spatiale, par exemple, la géo-simulation multi-agents (GSMA) permet maintenant de créer des mondes géographiques virtuels les plus proches possible de la réalité, en ayant recours aux SIG et à des bases de données géographiques relativement complètes (Mekni et al. 2009). Ces travaux ont d'ailleurs fait apparaître de nouveaux types de SMA comme les Systèmes Multi-Agents Situés (SMAS). Au sein de la thématique des transports et de la mobilité, on constate qu'il existe aujourd'hui plusieurs modèles capables de simuler des systèmes de mobilité de manière très précise et proche de l'exhaustivité. Les plates-formes de simulation déployées sont

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

en effet très sophistiquées et les chercheurs travaillent non seulement en équipe, mais surtout en pluridisciplinarité (géographe, informaticien, économistes, etc.). L'objectif est de pouvoir présenter ces simulateurs comme des outils prospectifs et d'aide à la décision pour la planification du transport et l'aménagement urbain.

À l'international, une équipe de recherche pluridisciplinaire a développé la plate-forme de simulation MATSim (Balmer et al. 2008). L'outil permet de simuler la mobilité d'une population aussi bien à l'échelle micro (ville) que macro (pays). Le modèle est composé de plusieurs modules qui peuvent être combinés ou utilisés séparément. Il a été initialement conçu et calibré à partir de bases de données issues du recensement suisse, mais il semble pouvoir s'adapter à n'importe quel territoire. Il a par exemple été testé en Afrique du Sud (Fourie 2010), sur la ville de Tel Aviv (Bekhor et al. 2010), sur l'agglomération de Toronto (Gao et al. 2010), etc. Les services de transports implémentés peuvent être modifiés, à condition d'avoir une bonne connaissance en programmation et de connaître l'architecture du modèle (Balmer et al. 2009). Récemment, un algorithme d'optimisation de type Dynamic Vehicle Routing Problem (Maciejewski & Nagel 2012) a par exemple été intégré, permettant de simuler des services de type TAD. Le simulateur s'avère puissant et relativement précis pour la simulation de trafic (cf. illustration 35), ou pour définir des scénarii d'évolution de la mobilité sur un territoire.

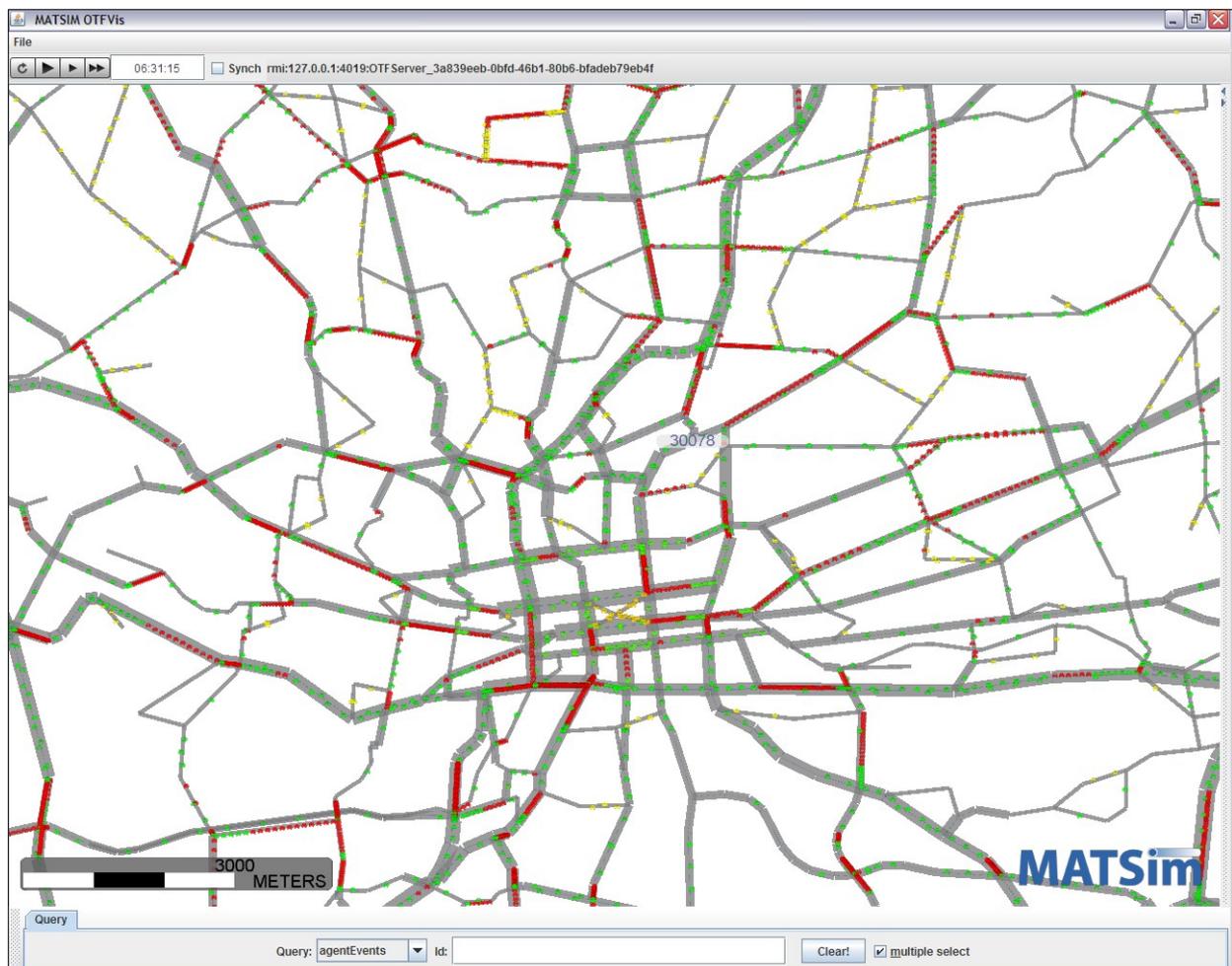


Illustration 30 : simulation de trafic (congestion en rouge) sur le réseau de Johannesburg (Fourie 2010)

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

En France, la plate-forme MobiSim (Casanova et al. 2005), développée à Besançon, vise à étudier l'interaction entre la forme des villes et les mobilités résidentielles quotidiennes. Le simulateur est modulaire et combine à la fois un SMA, un automate cellulaire, ainsi qu'un algorithme de calcul de dimension fractale. Il affirme sa place au sein des modèles dits LUTI (*Landuse and transport integrated*) (cf. illustration 34) grâce à ses trois caractéristiques essentielles que sont : la dimension comportementale, l'approche multi-scalaire et la dimension prospective. Cette dernière est rendue possible grâce aux efforts de calibration et à la possibilité de simuler des scénarii complexes d'évolution. Depuis les années 2000, le modèle n'a cessé d'évoluer. Les bases de données sur lesquelles repose le modèle se sont enrichies et les travaux d'exploration du modèle se sont multipliés au sein du laboratoire Théma, porteur du projet (Antoni 2010; Antoni 2012).

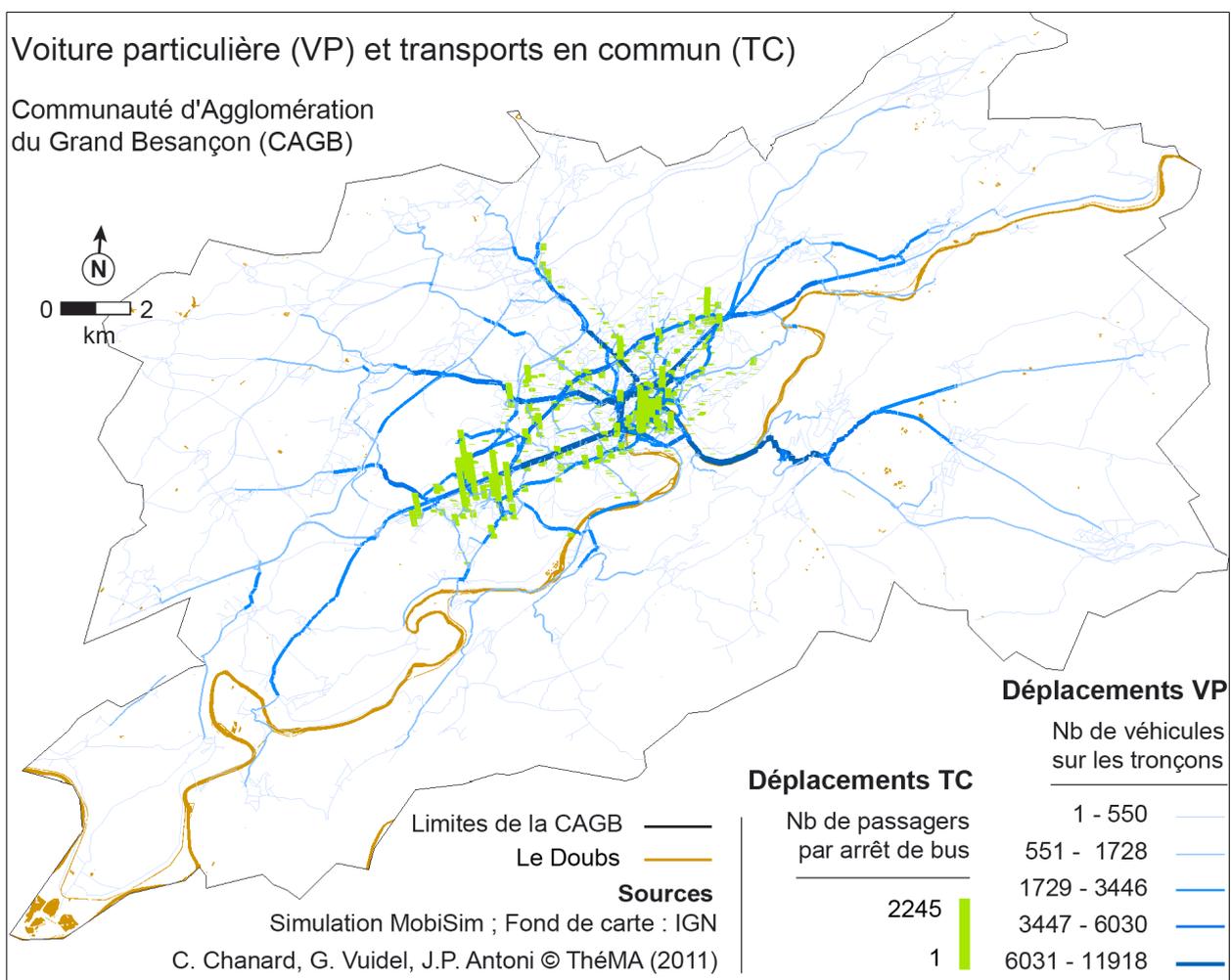


Illustration 31 : exemple de simulation des mobilités sur Besançon avec MobiSim (Antoni 2012)

Toujours en France, le projet MIRO (Banos et al. 2011), par exemple, a pour objectif de simuler le système de mobilité de la ville de Dijon. Au sein de ce projet, le SMA baptisé RAFALE-SP (Marilleau 2006; Cisse et al. 2012) permet de décrire avec finesse les mobiles dans leurs individualités (e.g. piéton, automobiliste), ainsi que le territoire dans lequel ils évoluent. Chaque individu est modélisé par un agent cognitif, dont les spécificités sont extraites d'enquêtes

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

sur le terrain (cf. illustration 33). À ces mobiles a été affecté un ensemble de vecteurs de déplacement réalistes. Des simulations ont d'abord été effectuées pour calibrer le modèle. En modifiant les caractéristiques de la ville, l'objectif sera ensuite de proposer des scénarii d'évolution de la mobilité à l'échelle de l'agglomération.

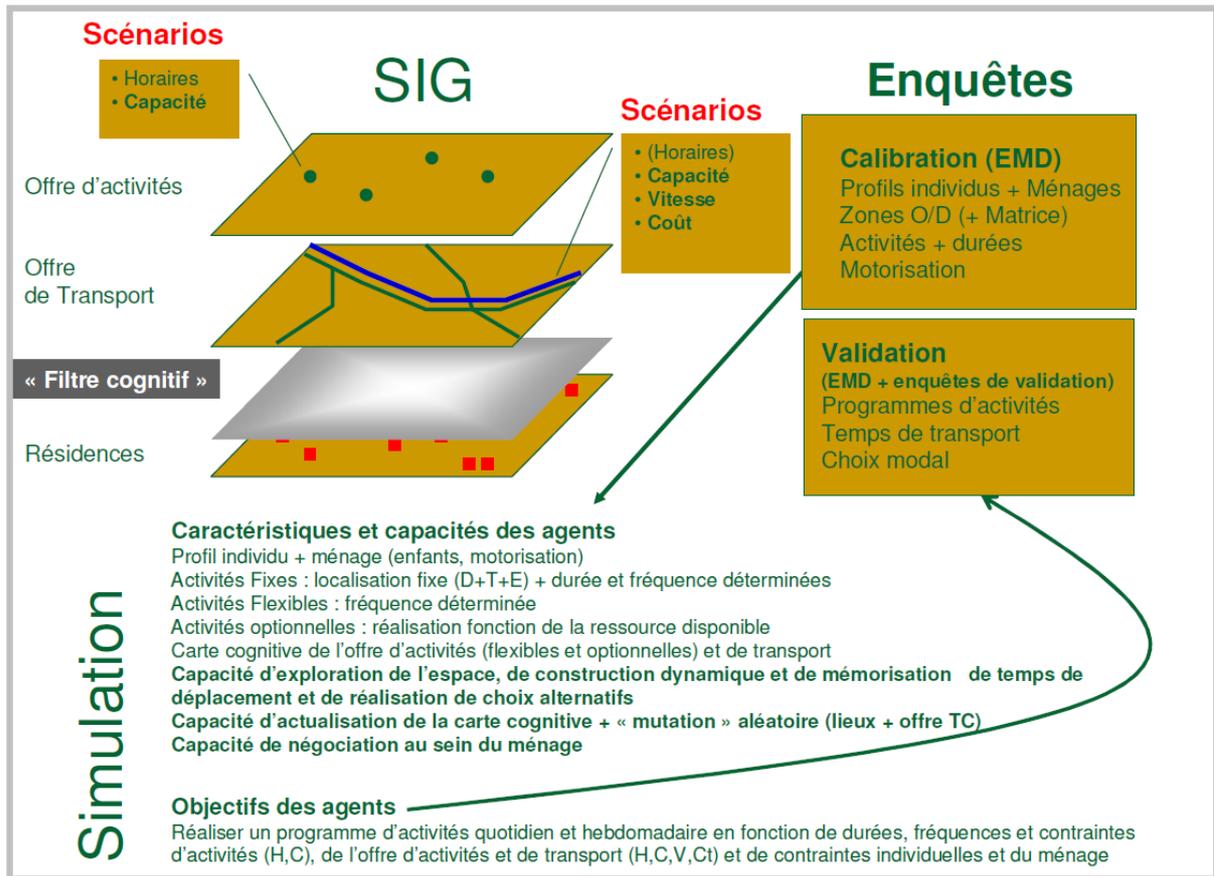


Illustration 32 : architecture du modèle MIRO (Banos et al. 2005)

La liste des travaux n'est pas exhaustive. Nous aurions pu également présenter des plateformes comme TRANSIMS et CORSIM (Rilett & Kim 2001) qui permettent de faire des analyses de trafic routier très poussées à l'échelle d'une aire métropolitaine, ou encore le modèle ARCHISIM qui permet de simuler la structuration d'un trafic routier en fonction de différents comportements de conduite (Champion et al. 2001; Espié & Auberlet 2007). Tous ces exemples illustrent bien cette approche. La dynamique d'un système peut y être observée avec beaucoup de précision et les modèles sont présentés comme des outils d'aide à la décision. Cependant, ce sont pour la plupart des plateformes de simulation relativement compliquées à mettre en œuvre. Pour pouvoir utiliser ces modèles, il est généralement nécessaire de travailler au sein de l'équipe de développement ou en collaboration étroite, ce qui crée une certaine dépendance. En tant qu'utilisateur, il est aussi indispensable de consacrer un temps non négligeable pour comprendre le fonctionnement du simulateur, au risque d'utiliser le logiciel comme une boîte noire. Au vu de ces éléments et sachant que le processus de modélisation (conceptualisation) se voulait au cœur de la thèse, nous avons opté pour une approche sensiblement différente dont nous présentons les fondements ci-après.

2.2.2 Comprendre et expliquer des systèmes

« Ce qui caractérise un bon modèle c'est qu'une fois son implémentation réalisée et son comportement étudié, le modélisateur n'en a plus besoin [...] Le modélisateur, en construisant un modèle de son objet d'étude, met ainsi en jeu des capacités cognitives en sélectionnant les points essentiels à prendre en compte pour expliquer le phénomène étudié. En construisant son modèle, il pose également des hypothèses qualitatives sur les mécanismes générateurs des observations qu'il porte sur le système cible. En simulant ce modèle, il peut tester ces hypothèses et les discuter. Il extrait de l'artefact *in silico* les propriétés de son modèle et les conséquences de ses hypothèses » (Amblard & Phan 2006).

Une deuxième catégorie de modèles (à laquelle nous nous rattachons) a pour finalité, non pas la description de scénarii réalistes, mais plutôt l'exploration et l'explication de la dynamique des systèmes. « La simulation sert à comprendre le fonctionnement du système de référence, en considérant le modèle comme une réplique miniature qui pourra être étudiée plus facilement » (Treuil et al. 2008). Ces modèles sont rattachés à l'approche KISS « Keep It Simple Stupid » (Amouroux 2011). Le but est de concevoir des modèles relativement simples et donc maîtrisables d'un point de vue architecturale et algorithmique pour éviter tout effet de boîte noire (Axelrod 1997). « Rien ne sert de concevoir des modèles dont on ne pourrait étudier sérieusement les propriétés et oublier ainsi la validation interne, définie comme l'existence de bonnes propriétés du modèle dans le cadre formel de ce dernier » (Amblard & Phan 2006). Autrement dit, on cherche à garder le contrôle des modèles pour mieux comprendre les résultats de simulation et expliquer finement le comportement du système dans son environnement, ainsi que sa réaction à la variation de certains paramètres. Dans cette approche, les modèles sont conçus à partir de théories, de lois et d'hypothèses (Dauphiné 2003) et non à partir de bases de données exhaustive. L'enjeu est de concevoir, selon le principe de parcimonie, des règles de fonctionnement simples et maîtrisées, pour pouvoir suivre et comprendre leurs incidences sur le fonctionnement général du système. Connaissant toutes les composantes et tous les paramètres initiaux du système, l'outil permet alors d'observer simplement le monde artificiel et de comprendre intuitivement le comportement global, avec des effets de structuration, de transition et d'émergence.

« Il ne convient pas de raser la barbe de Platon avec le rasoir de Socrate » autrement dit, « il est inutile de multiplier les explications lorsque cela ne s'avère pas utile » (Louryan 2011)

Connu initialement sous le nom du « rasoir d'Ockham », le principe de parcimonie consiste à ne pas utiliser de nouvelles hypothèses tant que celles déjà énoncées suffisent. Selon Guillaume d'Ockham, « les explications multiples ne sont pas à invoquer sans nécessité » ou encore « il est vain d'invoquer de nombreuses causes quand un nombre réduit suffit » (Domingos 1999). Toutefois, le principe de parcimonie n'est pas sans critique. Cette démarche simplificatrice est parfois perçue comme trop réductionniste, remettant en question la portée des modèles. On traduit d'ailleurs souvent ce principe par une préférence de l'hypothèse la plus simple parmi les possibles. Or, ce n'est pas tant la simplicité de l'hypothèse qui nous intéresse mais plutôt la faible complexité de l'ensemble des hypothèses posées pour aboutir aux conclusions.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Aujourd'hui, plusieurs SMA, relativement accessibles, offrent la possibilité de programmer ce type de modèle. L'environnement de développement NetLogo que nous présentons ci-après (cf. 2.3.3) en est un bon exemple. Ces dernières années, il est devenu très prisé par les géographes. Les formations et écoles thématiques se sont multipliées²⁷ et de nombreux projets de recherche se basent maintenant sur ce logiciel. Le premier modèle apparu sous NetLogo abordant la thématique du transport est un modèle de simulation de trafic urbain connu sous le nom de Gridlock (Wilensky & Stroup 1999). Ce modèle est intégré dans la bibliothèque de modèles, fournie avec NetLogo. Il est donc libre d'accès et d'utilisation. Au cours des dix dernières années, ce modèle a largement évolué. Il a d'abord été adapté pour optimiser la gestion de feux de trafic sur un réseau routier de type Manhattan (Gershenson 2005; Burguillo-Rial et al. 2012). En résumé, l'originalité de ce modèle est de proposer une gestion auto-organisée des feux tricolores. Ces derniers sont modélisés sous forme d'agents capables de compter le nombre de voitures en attente, de changer d'état en fonction de la file d'attente et d'interagir entre eux pour se synchroniser. Dans la continuité de ces travaux, un service de covoiturage dynamique a récemment été implémenté par le groupe GTI de l'université de Vigo (Espagne) et le CRP Henri Tudor au Luxembourg (Armendáriz et al. 2010). Ils ont donc conservé la structure initiale du modèle Gridlock en y intégrant un certain nombre de nouveautés. L'originalité première de ce travail est l'intégration d'un algorithme d'optimisation pour un service de covoiturage dynamique. L'objectif est de combiner les deux modèles, c'est-à-dire d'analyser l'incidence de la mise en œuvre d'un service de covoiturage sur la densité d'un trafic routier (cf. illustration 33). Pour ce faire, ils ont enrichi le modèle en complétant les attributs des différents agents et en les dotant de capacités sensorielles et de communication. Ainsi, les chauffeurs de voitures et les utilisateurs du service de covoiturage (modélisés sous forme d'agents) peuvent échanger sur leur localisation d'origine et sur leur destination. En fonction du nombre de places disponibles, des contraintes temporelles et de leurs trajets initiaux, les chauffeurs sont alors capables de choisir de manière optimale les passagers à prendre en cours de route.

27 Au cours de la thèse, j'ai par exemple pu intervenir dans l'école MAPS (<http://maps.csregistry.org/tiki-index.php>) et l'Intensive Program ABM (<http://agent-base-modeling.agrocampus-ouest.eu/infoglueDeliverLive/>)

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

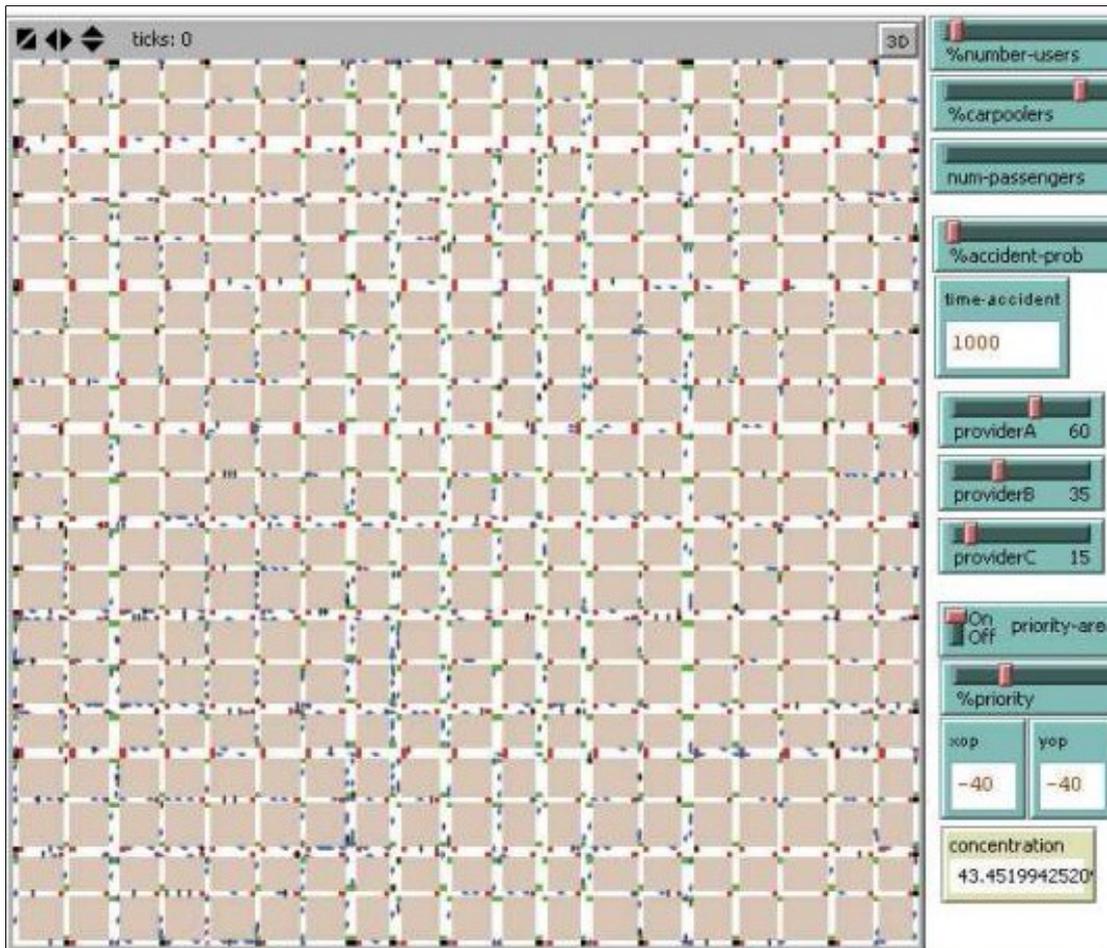


Illustration 33 : capture d'écran d'une simulation avec le Dynamic Carpooling Service Simulator.

Il existe aussi sur NetLogo des modèles abordant les questions de mobilité urbaine, et d'accessibilité. Au niveau micro, on trouve le modèle AcceSim qui permet de simuler l'accessibilité aux commerces par des citoyens à l'échelle d'un quartier. Le principe est simple : les individus se déplacent dans la ville pour atteindre un commerce et les commerces ont besoin d'une fréquentation régulière des individus pour subsister. L'objectif est de montrer avec un outil pédagogique que la répartition spatiale des services ou équipements est le plus souvent inégale et que leur accessibilité varie d'un territoire à l'autre. Pour ce faire, des indicateurs permettent d'évaluer en continu et au niveau de chaque quartier le taux de satisfaction des résidents, la distance moyenne parcourue pour accéder aux commerces et enfin les ventes totales. Les développeurs ont aussi mis en place un système de carte dynamique (cf. illustration 34) qui montre en temps réel la satisfaction des différents agents.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

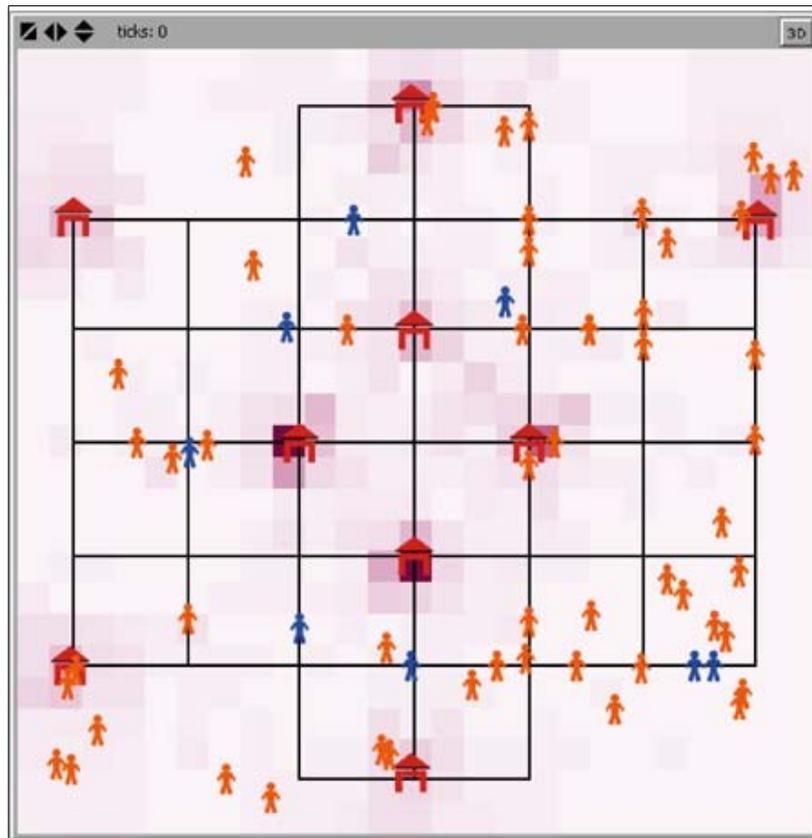


Illustration 34 : exemple de simulation avec le modèle AccesSim (Delage et al. 2008)

Enfin, d'autres modèles proposent d'aborder la question du transport de personnes à petite échelle. Le modèle SimpopNet a, par exemple, pour objectif de simuler les liens de causalité entre système de transport et système de villes. L'enjeu est de simuler une boucle de rétro-action entre la taille et l'accessibilité d'une ville et d'observer les conséquences de cette interaction au niveau géographique supérieur. Au cours d'une simulation (cf. illustration 35), des innovations dans les réseaux de transport se développent sur le territoire, ce qui engendre une diminution des temps de transports sur les axes concernés (représentés par des liens de couleur). Les temps de transport sont calculés à partir de distances mesurées sur un réseau réel. Cette structuration fait apparaître de nouveaux axes de transports et de nouveaux nœuds qui ne sont pas nécessairement des villes (représentés alors par des croix). La croissance démographique des villes (matérialisées par des cercles proportionnels) étant dépendante de sa position relative par rapport aux villes du réseau, c'est toute la hiérarchie du système de ville qui évolue. L'enjeu de la combinaison de ces mécanismes est de faire émerger des propriétés du système, analogues aux faits stylisés observés en simulant une diffusion hiérarchique de l'innovation sur le réseau de transport. « Au niveau de la croissance démographique du système de ville, il est attendu de voir émerger une corrélation entre la taille d'une ville et son accessibilité, ou plus exactement entre sa taille et son potentiel d'interaction dans le système, résultant finalement en un renforcement de la hiérarchisation du système de ville » (Schmitt 2013).

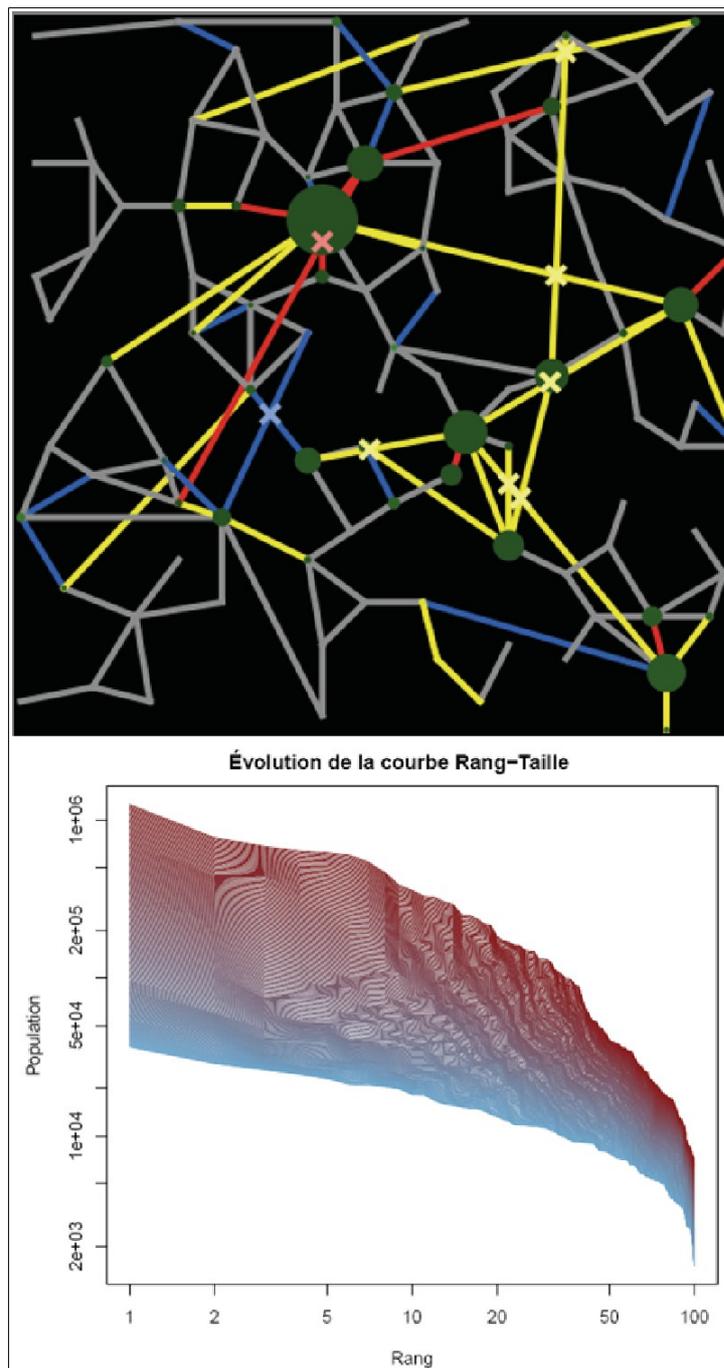


Illustration 35 : résultat d'une simulation sur 200 ans (200 itérations logicielles) avec le modèle SimpopNet (Schmitt 2013)

2.2.3 Résoudre des Problèmes et optimiser des tournées

En informatique et en robotique, l'approche SMA est utilisée pour concevoir des algorithmes de calcul permettant de résoudre des problèmes complexes. On notera par exemple, la Résolution de Problèmes (RP) (Gechter & Simonin 2005) ou la résolution de contraintes distribuées (Vidal 2006). Ce champ de recherche a donné lieu à de nouvelles formes de SMA comme les SMA

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

réactifs ou les Adaptive Systems Multi-Agents (ASMA). Les agents, par leur coopération et la coordination de leurs activités, permettent de réaliser collectivement des tâches de haut niveau.

Pour optimiser les transports, de nombreuses équipes en Recherche Opérationnelle utilisent maintenant la programmation à base d'agents. Le principe de calculs distribués permet de développer des transports performants et innovants. Au sein de la thématique des transports intelligents, Stephan Winter a par exemple réalisé une étude de faisabilité pour la création d'un système de transport moderne auto-organisé (Winter 2008). Les véhicules sont représentés sous forme d'agents. Ils ont des capacités sensorielles et ils peuvent communiquer entre eux pour organiser leur desserte. Dans le même champ de recherche, Wu *et al* utilisent les SMA pour développer des services de covoiturage optimisés (Wu et al. 2008). L'objectif est ici de proposer une connexion, via système radio, efficace entre les personnes en attente de déplacements et les véhicules disponibles. Les différentes entités du système sont ici représentées sous forme d'agents réactifs. Toujours au sein des transports intelligents, des travaux orientés agent ont été menés au laboratoire français « Systèmes et Transports ». L'objectif était cette fois-ci de mettre en place un système de régulation de trafic pour optimiser l'intermodalité de la compagnie de transport en commun de Montbéliard (Fougères 2000). Enfin, les SMA sont aussi largement utilisés pour optimiser des systèmes de transport flexibles, notamment ceux optimisés dynamiquement en fonction de la demande. En Amérique latine, des chercheurs ont pu développer un système distribué à base d'agents dédié à la résolution du « Dial-a-Ride Problem » (Cubillos et al. 2007). L'objectif est de calculer des tournées de véhicules optimales en fonction des contraintes soumises aux agents. Ces méthodes ont bien sûr été adaptées au transport à la demande avec des travaux comme (Zhao 2011; Nabaa et al. 2007; Zargayouna & Zeddini 2012). Dans ces articles, les auteurs proposent des algorithmes d'optimisation dynamiques de tournée de véhicule, de gestion de réservation et de flotte de véhicule.

2.3 Notre approche

Nous présentons dans cette section les quatre « piliers » sur lesquels repose notre démarche de modélisation : (1) le paradigme multi-agents qui est la base conceptuelle de notre démarche scientifique, (2) le langage UML avec lequel nous avons modélisé graphiquement l'architecture des modèles ainsi que les principaux algorithmes, (3) la plate-forme multi-agents NetLogo dans laquelle sont implémentés les modèles, (4) ainsi que le protocole ODD, utilisé en dernier lieu pour présenter les modèles et les résultats de simulation.

2.3.1 Le paradigme multi-agents

Les modèles que nous utilisons dans cette thèse sont exclusivement conçus à base d'agents. Ils ont pour objectif de comprendre et d'expliquer des systèmes de transport théoriques ou observés sur le terrain. À notre connaissance, les modèles de service de transport à proprement parler (et non de mobilité au sens large) sont plutôt rares dans cette approche, d'où l'originalité de cette thèse. Au cours de la modélisation, nous ne prétendons pas étudier les phénomènes de manière exhaustive. L'enjeu est de cibler, en fonction de nos objectifs de recherche (optimisation du service, structuration spatiale d'une desserte, satisfaction des clients, etc.), les éléments et les phénomènes les plus représentatifs de l'objet d'étude. Ceux-ci doivent être simples et facilement maîtrisables pour éviter tout effet de boîte noire. Nous ne cherchons donc pas à représenter des systèmes de mobilité réalistes, mais plutôt à expliquer le fonctionnement de systèmes

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

dynamiques représentatifs des services de transport étudiés. À partir d'hypothèses réalisées sur les mécanismes générateurs au niveau individuel (comportement des chauffeurs, des clients, noyau d'optimisation), nous essayons d'identifier les comportements individuels qui peuvent donner naissance au phénomène collectif considéré, à savoir la desserte d'un territoire selon différents critères (équité, minimisation du temps, etc.). Nous cherchons alors à évaluer la portée explicative de ces hypothèses. Certes, les modèles n'ont pas de portée prospective directe. Cependant, ils facilitent l'observation des systèmes et la dynamique qui en ressort est intelligible. En aval des simulations, nous recherchons des similitudes avec nos données et nos observations de terrain, ce qui nous permet de revenir sur nos hypothèses de départ et d'enrichir les modèles ou de le spécifier. Bien sûr, une application thématique, c'est-à-dire une évolution des modèles actuels vers des modèles plus orientés Recherche Opérationnelle, nous paraît être intéressante. C'est une des perspectives méthodologiques de cette thèse comme le montre le tableau suivant (cf. tableau 11).

Usage attendu	Clients principaux	Processus	Problématiques multi-agents abordées
Tester des hypothèses sur les dynamiques du système	Scientifiques	Assemblage du modèle puis tentative de calibration sur des données	Conception
			Vérification
			Disponibilité des données individuelles
			Calibration sur des données
Renforcer la compréhension de dynamiques couplées	Scientifique, techniciens	Le modèle critiqué et amélioré par la collaboration d'experts, qui couplent « leurs » modèles	Couplage par encapsulation agent
			Organisations MA pour les transferts d'échelle
			Granularité des agents
			Lien numérique-symbolique
Construire un modèle ouvert et « complet » du système	Techniciens, décideurs	Un « modèle d'experts » est discuté et complété par des acteurs « non experts »	Transcription du discours descriptif qualitatif en SMA
			Versioning
			Ergonomie cognitive
			Adaptabilité
Produire un outil prospectif pour l'aide à la décision	Décideurs	Un modèle calibré et validé est utilisé pour évaluer les futurs possibles	Synthèse des formes (états) MA obtenues
			Interprétation
			Coût d'exploitation Monte Carlo
			Montrer l'incertitude
Légende :			Abordé dans la thèse
			Perspectives
			Non abordé

Tableau 11 : objectifs de modélisation et portée des modèles (adapté de Amblard & Phan 2006; OFTA 2004)

2.3.2 Le langage de modélisation UML

« Les notes reportées sur les partitions sont des éléments de modélisation pour la musique. L'approche objet propose l'équivalent des notes, à savoir les objets, pour la représentation des logiciels. » (Muller & Gaertner 2000)

Il existe plusieurs méthodes ainsi que plusieurs langages permettant de formaliser un système. Le langage Unified Modeling Language (UML), en plus de modéliser de manière graphique un système, constitue une étape importante pour l'implémentation d'un modèle dans un langage informatique. Initialement conçu par les informaticiens, il est aujourd'hui très utile en SHS, car en plus d'expliquer de manière relativement simple la structure d'un modèle informatique à des personnes non spécialistes, il permet de structurer les concepts utilisés lors de la modélisation.

UML est un langage de modélisation orienté-objet. Il a été développé selon le souhait de l'Object Management Group (OMG) afin de disposer d'une notation standard pour la modélisation des applications construites à base d'objets. En d'autres termes, UML est fondé sur une syntaxe, une sémantique et une notation graphique simple, précise et universelle, qui ont pour but de faciliter l'expression et la communication d'un modèle. UML est parfois perçu, à tort, comme une méthode de modélisation. En réalité, il reste un langage de modélisation et puise sa force dans sa capacité à « modéliser de manière claire et précise la structure et le comportement d'un système indépendamment de toute méthode ou de tout langage de programmation » (Muller & Gaertner 2000). UML possède aussi l'avantage de ne pas être un langage propriétaire. Toute personne peut l'utiliser et tout fabricant peut concevoir des outils qui, eux, en revanche, peuvent être payants. UML est très utile pour concevoir et formaliser des algorithmes. Dans nos travaux, nous n'utilisons pas le langage dans sa totalité. Nous avons plutôt sélectionné les éléments les plus utiles pour nos objectifs de modélisation. Nous présentons brièvement ces éléments dans le paragraphe qui suit.

Le diagramme de classe vue (statique)

Le diagramme de classes exprime la structure statique du système en termes d'objets et de relations entre ces objets. L'intérêt de ce diagramme est de modéliser les entités du système et de représenter de manière structurée l'ensemble des informations gérées par le domaine. Ces informations sont regroupées dans des classes, elles sont décrites par des attributs et hiérarchisées grâce à des relations. Dans nos travaux, nous avons utilisé les quatre types de relations suivantes.

(i) L'association, est la relation la plus courante en UML. Il existe plusieurs formes d'association. Néanmoins, elle montre toujours une structure entre les classes d'objets et non un échange de données. (ii) L'agrégation est une forme particulière de l'association. Elle représente une association non symétrique, dans laquelle une des extrémités joue un rôle prédominant par rapport à l'autre. C'est un type d'association qui exprime un couplage plus fort entre les classes puisque l'agrégation permet de modéliser une contrainte d'intégrité et de désigner l'agrégat comme contrainte. (iii) La relation de dépendance indique les classes d'objets qui peuvent être mises à jour lors de la modification de la classe d'objets dont elles sont dépendantes. C'est une relation unidirectionnelle et non structurelle qui agit sur un ou plusieurs attributs et à chaque

instance. (iv) Le principe de généralisation et de spécialisation permet d'identifier un objet générique et les sous-ensembles d'objets qui le spécifient. La classe spécialisée est cohérente avec la classe générale, c'est-à-dire qu'elle contient par héritage tous les attributs et les relations de la classe générale.

Les diagrammes d'activités (vue dynamique)

Le diagramme d'activité est attaché à une catégorie de classes et décrit le déroulement des activités de cette catégorie. Il indique la part prise par chaque objet dans l'exécution d'un travail. Il peut être enrichi par des conditions de séquençement. La notion de couloir d'activité va décrire les responsabilités en répartissant les activités entre les différents acteurs opérationnels.

Les diagrammes d'état transition (vue dynamique)

Ils ont pour rôle de représenter les traitements (opérations) qui vont gérer le domaine étudié. Ils définissent l'enchaînement des états de classe et font donc apparaître l'ordonnancement des travaux. Le diagramme d'états-transition est associé à une classe pour laquelle on gère différents états : il permet de représenter tous les états possibles ainsi que les événements qui provoquent les changements d'état (conditions, contraintes, etc.).

2.3.3 La plate-forme de simulation NetLogo

La création des diagrammes UML ne constitue qu'une première étape dans notre démarche de modélisation. Chacun des modèles a ensuite été implémenté dans le SMA NetLogo. Il existe de nombreuses plates-formes multi-agents pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes comme Swarm (Hiebeler 1994), Cormas (Bousquet et al. 1998), Repast (North et al. 2006), GAMA (Amouroux et al. 2009), etc. Pour cette thèse, nous avons choisi de développer nos modèles avec la plate-forme NetLogo²⁸ (Wilensky 1999; Tisue & Wilensky 2004). En effet, j'ai pu suivre au cours de mon Master plusieurs formations sur la modélisation de systèmes complexes avec NetLogo²⁹. Cela m'a permis de rapidement maîtriser le logiciel, et à cette époque déjà, le logiciel était relativement complet et bien adapté à mes objectifs de modélisation.

NetLogo a été créé en 1999 par Uri Wilensky et continue d'être développé au sein du Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling à l'université de Northwestern. Le logiciel est spécialisé dans la simulation de systèmes complexes pour les sciences naturelles, humaines et sociales. Les modèles peuvent être de type automate cellulaire, multi-agents, ou les deux combinés. La plate-forme est composée de *Patches* (cellules disposées sur une grille), de *Turtles* et de *Links* (types d'agents) spécifiés par des Breeds (famille d'agent) et d'un *Observer* (équivalent à un agent de haut niveau) qui peut lire et agir sur toutes les variables du modèle. NetLogo est particulièrement adapté aux modèles à base « d'agents mobiles qui évoluent en parallèle dans un environnement de type grille, et dont le comportement est basé sur des interactions courtes » (Treuil et al. 2008). Bien que le logiciel permette de simuler des modèles avec plusieurs milliers d'agents, les limites en termes de capacité de calcul peuvent être rapidement atteintes avec des modèles relativement complexes. Ça été le cas lors de la simulation de certains de nos modèles.

²⁸ <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/>

²⁹ <http://maps.csregistry.org/tiki-index.php>

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

L'objectif premier de NetLogo est de fournir un outil pédagogique et simple d'utilisation. Le logiciel est gratuit, disponible pour tous les systèmes d'exploitation et les modèles s'exécutent de façon identique. En revanche, il n'est pas *open source*. Il possède une documentation et une aide en ligne conséquente. Il est aussi accompagnée d'un corpus de modèles libres d'accès, pouvant servir de base conceptuelle et algorithmique pour les utilisateurs³⁰. L'outil bénéficie d'une interface simple et intuitive. Son langage de programmation dédié permet de manipuler des structures de haut niveau et des primitives qui réduisent l'effort de modélisation (Treuil et al. 2008). Il est aussi doté de fonctions relativement complètes pour exploiter les simulations (exports d'images, de vidéos, de tables de données, etc.) et une fonction de simulation par lots. NetLogo permet de pratiquer la simulation individu centré avec une dimension spatialisée. Même s'il ne bénéficie pas de toutes les fonctions d'un Système d'Information Géographique, l'outil laisse une marge de manœuvre très appréciable notamment grâce à son extension GIS. Il est aujourd'hui possible d'importer des couches géographiques et de les intégrer aux simulations ce qui le rend tout à fait adapté aux simulations en géographie.

2.3.4 Le protocole ODD

Enfin, en aval de l'étape de modélisation, nous utilisons le protocole ODD « Overview, Design concepts, and Details » (Grimm et al. 2006; Grimm et al. 2010) pour présenter de manière claire et standardisée les caractéristiques des modèles. Le constat sur lequel se sont appuyés Volker Grimm et son équipe pour développer le protocole est le suivant : il est difficile de présenter un modèle à base d'agents de manière synthétique, tout en gardant un minimum de détails, indispensables à la bonne compréhension du modèle et de son objectif. Cela vaut aussi bien pour des présentations orales (en moyenne 20 min) que pour des articles scientifiques (en moyenne 10-15 pages). Contrairement à un modèle analytique, il est difficile d'expliquer un modèle à base d'agents, qui est par définition complexe et développés avec des logiciels qui n'utilisent pas forcément les même langages de programmation. Chaque plate-forme possède ses propres particularités. L'objectif qu'ils se sont fixé, depuis 2005, est donc de proposer une méthode standardisée de présentation et de communication de modèles à base d'agents. L'objectif est de faciliter la présentation et la compréhension d'un travail de modélisation, indépendamment du logiciel utilisé, de la discipline et du thème de recherche abordé. Le protocole ODD est composé de trois grandes parties qui s'enchaînent en suivant une logique d'entonnoir, i.e. du général au détaillé (cf. illustration 25). En nous basant sur les deux articles de références, nous présentons ici les composantes du protocole et leur contenu, auxquels nous ajoutons une partie dédiée à la présentation des résultats clés de simulations.

30 <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/models/community/>

Catégories	Éléments
Overview	<i>Purpose</i>
	<i>Entities, state variables, and scales</i>
	<i>Process overview and scheduling</i>
Design concepts	<i>Basic principles</i>
	<i>Emergence</i>
	<i>Adaptation</i>
	<i>Objectives</i>
	<i>Learning</i>
	<i>Prediction</i>
	<i>Sensing</i>
	<i>Interaction</i>
	<i>Stochasticity</i>
	<i>Collectives</i>
	<i>Observation</i>
Détails	<i>Initialization</i>
	<i>Input data</i>
	<i>Submodels</i>
Main results	<i>Specificities</i>
	<i>Advantages</i>
	<i>Disadvantages</i>

Tableau 12 : les composantes du protocole ODD complétées par une partie dédiée à la synthèse des résultats (en gris) (inspiré de Grimm et al. 2010).

Aperçu du modèle

Le sujet (Purpose)

Comme dans tout effort de communication, il est important de formuler de manière claire et concise le sujet traité. Cette étape est déterminante pour la bonne compréhension du modèle. Il s'agit, par la même occasion, d'expliquer et de justifier la dimension complexe du phénomène modélisé, de préciser les objectifs généraux et spécifiques du modèle mis en œuvre.

Les entités, leurs variables et les échelles (*State variables and scales*)

Il convient dans ce paragraphe d'expliquer la structure du modèle. On présente dans un premier temps les entités de bas niveau en précisant leur nature, leur rôle, leurs variables, en justifiant leur mode de représentation (agent, environnement, cellule, etc.). La structure hiérarchique ainsi que les relations entre les différentes entités doivent être précisées. De la même manière, toutes les entités et les variables de haut niveau doivent être présentées et expliquées. Le diagramme de classe UML s'avère particulièrement approprié dans cette partie, surtout pour un nombre important d'entités et une hiérarchie compliquée. Enfin, il est important d'informer le lecteur sur les échelles spatiale et temporelle du modèle.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Les procédures et leur ordonnancement (*Process overview and scheduling*)

Le but est de décrire littéralement les principales procédures du modèle. Il n'est pas nécessaire de rentrer dans les détails. Le fonctionnement du modèle doit être expliqué dans sa globalité. L'explication des séquences est alors très importante, car elle explique l'ordre temporel et l'enchaînement des procédures. La séquence des procédures est déterminante pour le bon fonctionnement du modèle, elle doit donc être présentée de manière claire et logique. Ici, il est intéressant de fournir un diagramme d'activité des agents pour illustrer les explications.

Les concepts mis en œuvre (*Design concepts*)

Dans cette partie du protocole, il est proposé d'expliquer dans quelles mesures le modèle intègre les principaux concepts utilisés dans le paradigme multi-agents.

Ces concepts sont les suivants :

- Principes de base : Quels ont été les concepts généraux, les théories, les hypothèses et les approches de modélisation utilisés pour conceptualiser le modèle ? Quelles sont les relations entre ces principes généraux et la complexité du modèle ?
- Émergence : quels sont les phénomènes et sous-systèmes émergents ? Quels sont ceux aisément déductibles ?
- Adaptation : quelle est la capacité d'adaptation du système en fonction des variables initiales, de l'environnement ?
- Objectifs : Quels sont les objectifs individuels des différents agents ? Comment parviennent-ils à les satisfaire ?
- Apprentissage : Les agents sont-ils capables de changer leur comportement en cours de simulation, notamment en fonction de leur expérience ? Si oui, de quelle manière évoluent-ils ?
- Prédiction : les agents peuvent-ils anticiper leurs actions, c'est-à-dire évaluer une partie de leurs conséquences sur les autres entités du système et agir en fonction ?
- Sens : est-ce que les agents sont dotés de sens ? Peuvent-ils percevoir les caractéristiques de l'environnement ou des autres agents ? Quelles variables d'état peuvent-ils lire et qu'elles conséquences cela a-t-il sur leur comportement ?
- Interaction : quels sont les types d'interactions entre les individus ? Comment se manifestent-elles sur la simulation ?
- Stochasticité : existe-t-il une part d'aléatoire dans le modèle ? Pour quelles raisons ? Quelles sont les conséquences sur le fonctionnement général du modèle ?
- Collectivité : peut-on observer des comportements collectifs au sein des différents agents ? Est-il possible d'identifier des groupes ? Quelles sont les relations leur permettant de réaliser des actions collectives ?
- Observation : quels sont les moyens mis à disposition pour observer le modèle ? Quelles données permettent de le tester, de le valider et de l'analyser ?

Les détails du modèle

Initialisation

Dans cette partie, nous expliquons l'état initial de la simulation. Quel est l'état des variables ? Comment est organisé l'environnement ? De quoi est-il composé ? Quelle est la position des agents ? etc. Il est même souhaitable d'expliquer comment on obtient cet état initial. Cette étape est importante, car elle permet de comprendre l'influence des paramètres initiaux sur le fonctionnement du modèle, mais elle permet aussi de reproduire les simulations sans créer de biais et sans être faussées par des conditions initiales différentes. Pour rendre la reproductibilité du modèle optimale, il convient de fournir sous forme de fichiers tous les paramètres initiaux. Sur NetLogo, par exemple, il est possible d'exporter l'environnement de simulation dans un fichier *.csv permettant une reproductibilité totale.

Les inputs

En cas de nécessité, il convient d'expliquer les *inputs* influençant les conditions initiales, et/ou les paramètres du modèle pendant la simulation. La présence d'*input* n'est pas systématique en modélisation multi-agents. En revanche, s'il en existe, il est indispensable de bien les expliquer, car leurs effets (ou non) sur le système doivent être analysés.

Les sous-systèmes ou les sous-modèles

Enfin, le protocole propose d'expliquer dans une dernière partie, ou en annexe, la structure et le fonctionnement de chaque sous-système. Il est demandé d'expliquer en détail les processus présentés dans la partie « procédures et ordonnancement ». Si le lecteur a un doute sur le fonctionnement d'un agent, il doit pouvoir trouver dans cette partie l'algorithme détaillé. Pour que ce dernier point ne soit pas trop long et trop fastidieux à lire, nous pouvons utiliser les diagrammes UML d'état-transition. Ceux-ci décrivent en détails les procédures et les séquences, en précisant les tests logiques.

Les résultats clés (*Main results*)

En complément des trois catégories présentées ci-dessus, nous intégrons au protocole ODD une partie dédiée aux résultats de simulation. Notre objectif est de présenter les principaux résultats obtenus suite à l'exploration et à l'analyse des modèles. Par exemple, dans notre cas, nous soulignons les points forts et les points faibles en termes d'efficacité de desserte des systèmes. Nous annonçons également leurs particularités en termes de fonctionnement, en précisant toujours les conditions de simulation qui nous ont permis d'obtenir ces résultats. De plus, il est tout à fait possible d'illustrer ces informations avec des graphiques statistiques ou des schémas.

Chapitre 3. Le Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS)

C'est en 2009 qu'ont débuté mes travaux de modélisation multi-agents appliquée au transport flexible. Au cours d'une école thématique dédiée à la modélisation multi-agents de systèmes complexes (MAPS1³¹), j'ai pu développer sur NetLogo, en collaboration avec d'autres participants, un premier modèle élémentaire de transport spontané. Ce travail a donné lieu à un article co-signé (Lammoglia et al. 2009). Nous avons par la suite continué à perfectionner collectivement le modèle et nous avons pu le présenter à la conférence internationale MAPS2³² (Lammoglia et al. 2010). A l'issue de ma deuxième année de Master, le modèle a ensuite connu un développement particulier. J'ai pu notamment améliorer à la fois sa stabilité, ses fonctionnalités et proposer une méthodologie complète d'analyse (Lammoglia 2011). Au cours de la thèse, j'ai enfin pu implémenter d'autres modèles de services de transport inspirés de mes observations de terrain (France et Sénégal) et de mes recherches bibliographiques (Lammoglia et al. 2012; Lammoglia & Josselin 2013). Les modèles ont ensuite été regroupés dans un méta-modèle nommé : Trans-Cultural Transport Simulator (TCTS).

Comme le suggère le préfixe latin trans (« par delà ») (Robert & Rey 2001), le terme trans cultural 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). Dans notre cas, les modèles implémentés renvoient à des principes de fonctionnement inspirés des contextes socioculturels français et sénégalais. Le TCTS est donc l'outil de simulation au cœur de cette thèse. Grâce aux simulations exécutées au sein de NetLogo, le simulateur nous a permis d'explorer et de confronter différents principes de fonctionnement.

3.1 Démarche générale

La démarche générale de modélisation peut être subdivisée en cinq étapes consécutives, dépendantes les unes des autres (cf. illustration 36). Entre chaque étape interviennent des filtres qui nous permettent de recadrer nos observations et nos connaissances sur les objets d'études. Ils constituent en retour une simplification et donc une perte d'information potentielle. Pour ne pas être totalement détachés de la réalité, nous faisons intervenir à la fin de la démarche une boucle de rétroaction qui a pour but d'utiliser les apports des simulations pour mieux comprendre les services observés et mieux cibler les observations de terrain. Cela nous a permis à plusieurs reprises d'améliorer et d'ajuster les modèles. Nous proposons ainsi un aller-retour permanent entre modèles et faits observés dans la réalité.

Dans notre approche, nous nous focalisons sur 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 de modéliser les mécanismes et les comportements qui nous semblent les plus révélateurs de la réalité observée. En contrôlant l'environnement et les conditions de simulation, nous pouvons observer avec plus de précision les différences en termes de

31 Modélisations multi-agents Appliqués aux Phénomènes Spatialisés

32 Teaching of/with Agent-Based Models in the Social Sciences

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

fonctionnement et de structuration de l'espace. Les systèmes et leur territoire virtuel de desserte n'étant pas modélisés dans un souci d'exhaustivité, il est certain qu'il existe des décalages entre les résultats obtenus dans nos simulations et ceux observés dans la réalité. La confrontation des modèles n'a donc pas pour but de formuler des conclusions directement opérationnelles. Elle constitue plutôt une première étape pour explorer et comprendre le fonctionnement de ces services. Notre objectif est bien de comprendre les forces et les faiblesses des différents systèmes étudiés et de mettre à profit ces observations pour améliorer les services existants et développer de nouveaux systèmes de transports flexibles. Pour bien comprendre la démarche, nous expliquons dans l'illustration 36 les cinq étapes et l'incidence des différents filtres.

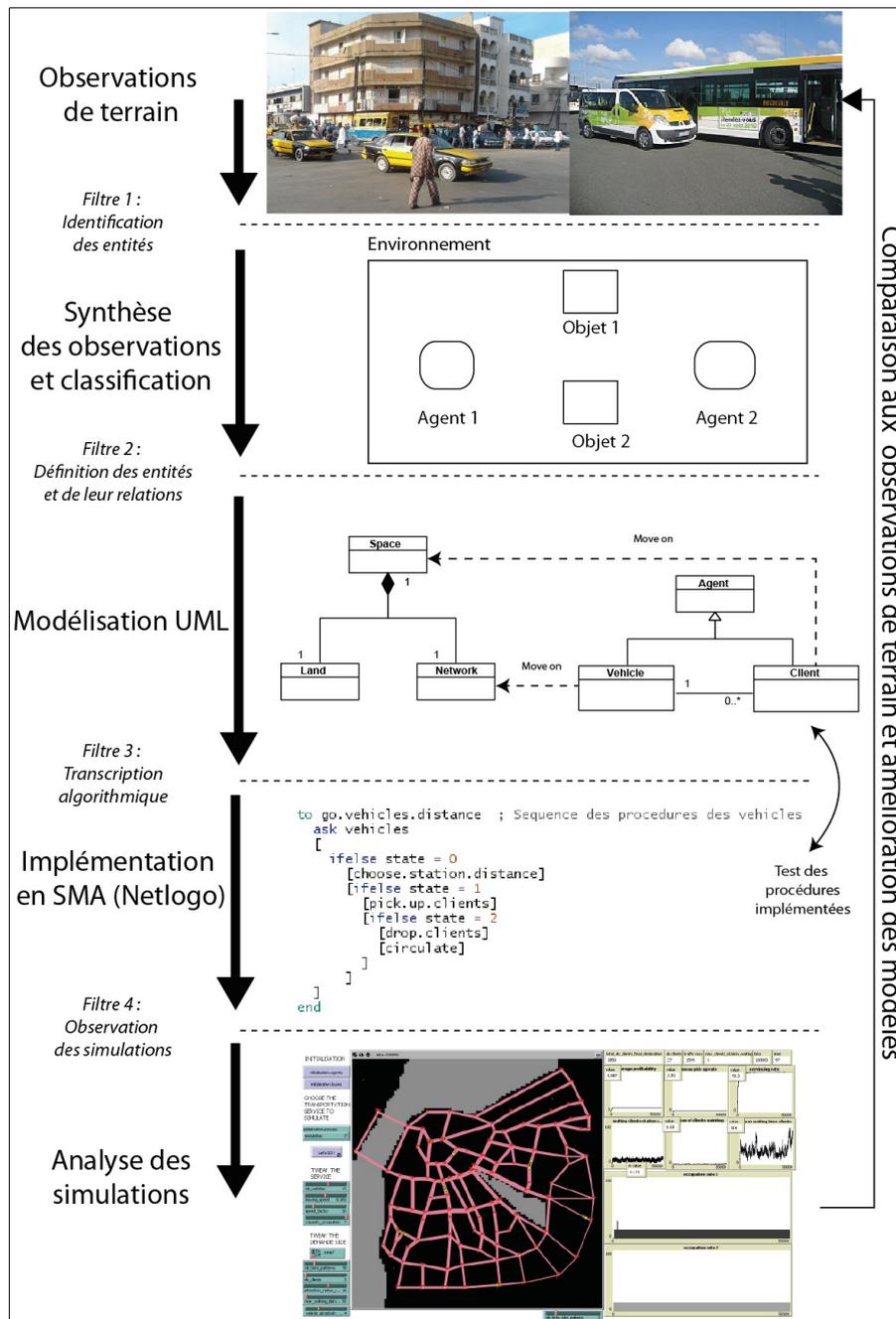


Illustration 36 : la méthodologie générale.

3.1.1 Observations de terrain

La première étape concerne l'observation des services de transport. On parle ici d'observation au sens large puisque cela inclut notre regard de géographe sur le terrain, l'étude de rapports et d'articles scientifiques, ainsi que notre expérience dans le domaine des TAD. Le but de cette étape est de s'inspirer de la réalité et des connaissances existantes sur le sujet pour construire des services de transports virtuels analogues, fonctionnant dans des systèmes sociétaux très différents. Par conséquent, les observations et les sources d'informations sont elles aussi différentes d'un cas à l'autre.

Le contexte français est caractérisé par une attention particulière sur la qualité de service. Pour cela, les efforts sont largement orientés vers l'innovation technologique. En améliorant la flexibilité et l'information sur les services, on tente de proposer des solutions de transport plus spontanées pour concurrencer l'utilisation du véhicule personnel. Pour modéliser ces services, nous nous sommes basés sur la bibliographie. Nous avons eu recours à des rapports officiels traitant de l'offre française existante, ainsi qu'à des documents scientifiques présentant des services de transports innovants. Nous nous sommes aussi basés sur des expériences acquises pour l'équipe au cours de plusieurs projets comme le prototypage du Modulobus (Guillas & Josselin 2012), la mise en place des TAD TADOU (Garaix et al. 2007) et Evolis Gare (Castex & Josselin 2007).

Au Sénégal, l'attention est portée sur la rentabilité des services et sur la durabilité. L'enjeu pour les autorités est d'organiser et de formaliser les services existants et de pouvoir 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 (CETUD). Les observations ont été appuyées par l'étude de rapports officiels, basés sur des enquêtes réalisées en 2000, délivrés gracieusement par les responsables du CETUD.

3.1.2 Synthèse des observations et classification

La deuxième phase consiste à synthétiser l'information et à établir une classification des éléments observés. À ce niveau, un premier filtre entre en action. Il est lié au principe de parcimonie que nous utilisons dans notre approche de modélisation. Notre objectif est de trouver les processus les plus révélateurs du fonctionnement d'un système, par le choix de critères pertinents. Ce processus de sélection concerne principalement les deux composantes essentielles de nos modèles, à savoir les agents et tous les objets constituant l'environnement de simulation.

Concernant les agents, si nous avons voulu représenter les différents acteurs dans leurs individualités et de manière exhaustive, nous aurions dû définir de nombreuses familles d'agents. Or, dans notre cas, nous nous limitons à deux types : les clients et les véhicules. Au sein d'une même famille, les agents 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 les relations qu'ils vont établir avec les véhicules durant la simulation. De cette manière, on arrive à

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

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 tous deux 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, etc.).

Concernant l'environnement de simulation, nous avons là aussi sélectionné les 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, parce qu'ils ne nous paraissaient pas indispensables au vu de nos 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.

3.1.3 Élaboration 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 centré car la manière dont interagissent les agents est vraiment déterminante pour le fonctionnement des modèles. À cette étape, nous devons nous 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 comportement ? Est-il possible de se limiter à des agents réactifs aux différents signaux qu'ils reçoivent au cours de la simulation ?

Une fois de plus, nous avons choisi de nous focaliser sur les relations essentielles pour nos objectifs de modélisation en réalisant un modèle le plus concis possible, notamment au niveau des interactions. Notre but est ici 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 réaliser le modèle conceptuel, nous avons utilisé le langage UML, via un diagramme de classes des différentes entités, des classes d'agents et des liens qui les unissent.

3.1.4 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, nous implémentons 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, nous définissons les indicateurs et mettons en place les outils statistiques permettant un suivi en temps réel de l'évolution des systèmes.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Un nouveau filtre intervient à cette étape : il s'agit de la transcription du modèle conceptuel en langage de programmation. Cette étape constitue le lien entre le modèle conceptuel, i.e. le modèle tel que nous l'avons défini et le modèle informatique tel qu'il sera exécuté par le simulateur. Le risque est d'implémenter des algorithmes qui ne vont pas refléter exactement les comportements ou les phénomènes identifiés. Ce problème peut survenir pour plusieurs raisons : soit parce que notre modèle conceptuel et nos diagrammes UML ne sont pas assez précis, soit parce que le langage de programmation de NetLogo ne nous permet pas de retranscrire fidèlement les algorithmes. Pour pallier cette difficulté, nous avons procédé à un aller-retour permanent entre la modélisation UML et l'implémentation en SMA. Autrement dit, nous avons simulé et exploré les modèles à chaque fois que nous avançons dans notre étape d'implémentation. Le but de cette première phase 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.

3.1.5 Analyse des simulations

La dernière étape de notre démarche concerne l'exploitation des simulations. À ce stade, nous distinguons deux phases imbriquées. La première vise à identifier les seuils d'efficacité des systèmes. La seconde étape consiste à comparer les différents modèles en termes de performance dans des conditions de simulation similaires (cf. Partie 3). De nombreuses simulations ont été effectuées en dehors de celles qui sont présentées dans cette thèse. Chaque simulation a été un moyen pour nous 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 de nos observations. C'est pourquoi une attention particulière a été portée sur l'élaboration d'une méthodologie d'analyse des simulations sur NetLogo (Lammoglia 2011). Cette méthodologie combine à la fois l'observation en temps réel des animations, des graphiques et des moniteurs, mais aussi le traitement statistique des données de simulation issues de la base et de captures d'écran exportées en fin de simulation.

3.2 Meta-modèle

« Un 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).

Pour plus de clarté, nous avons choisi de fusionner les différents modèles du TCTS au sein d'un même méta-modèle. Au total, nous disposons d'environ 2 500 lignes de codes organisées en 62 procédures (cf. annexe 3). Les procédures communes à tous les modèles ont été fusionnées et dissociées de celles qui étaient plus spécifiques. Le fait de disposer de tous les modèles sur une même interface de simulation nous permet de les simuler dans des espaces virtuels

identiques, avec les mêmes conditions initiales et avec une majorité de procédures communes. Ainsi, nous pouvons 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 donc standardisées et reproductibles, ce qui est indispensable pour confronter les modèles et révéler leurs spécificités en termes de fonctionnement et d'efficacité.

3.2.1 La structure générale

La structure générale fait référence à tous les éléments communs aux différents modèles. Il s'agit de présenter ici les classes d'objets, les différentes familles d'agents et leur fonctionnement général. Le détail des comportements sera abordé dans le troisième paragraphe.

Modèle conceptuel (vue statique)

Comme le montre le diagramme de classes UML (cf. illustration 37), les services de transport modélisés au sein du TCTS sont tous composés de deux familles d'agent : les clients et les véhicules. Les bus constituent une classe héritière des véhicules. Ils appartiennent à la même famille d'agents à la différence près qu'ils ont une plus grande capacité et qu'ils se déplacent sur des lignes régulières. 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.

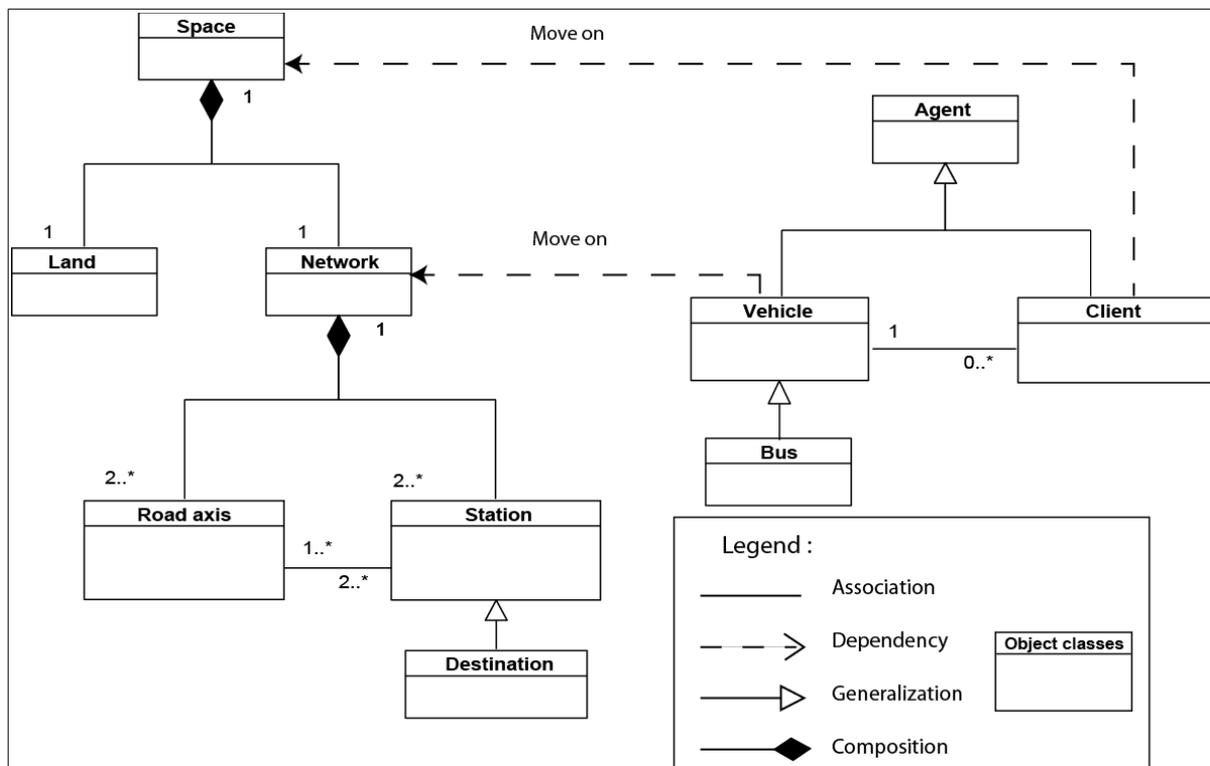


Illustration 37 : diagramme de classes UML du méta-modèle.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

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 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 (cf. illustration 38). 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 à la fois 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 arrêtes. Elles constituent les axes routiers sur lesquels circulent les véhicules. Le réseau est non planaire, i.e. des axes peuvent se croiser sans qu'il n'y ait de point d'intersection (Flament 1965), à l'image d'une route qui passerait par-dessus une autre grâce à un pont. Le graphe n'est pas orienté, les véhicules peuvent circuler dans les deux sens sur tous les axes à la même vitesse. Enfin, la majorité des graphes que nous utilisons ne sont pas complets : les nœuds ne sont pas tous connectés les uns aux autres (Fournier 2006). En effet, cela produit généralement des réseaux routiers très peu réalistes.

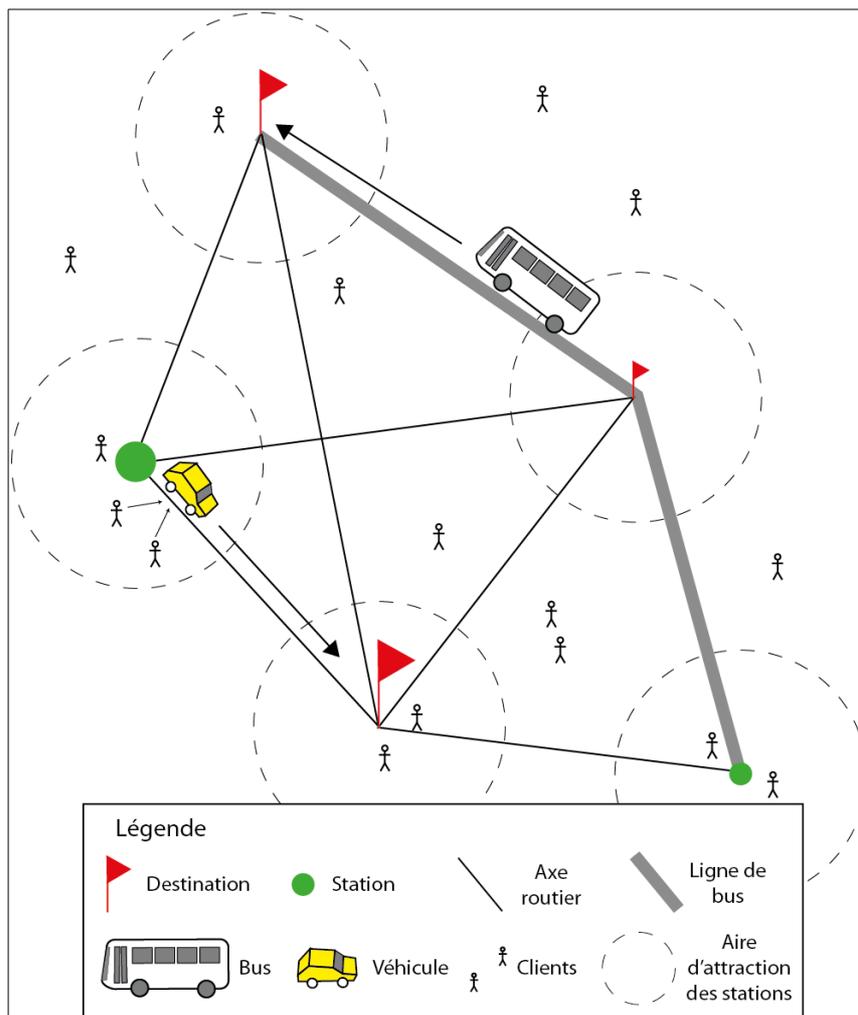


Illustration 38 : modèle graphique de la structure commune des modèles.

Activité des agents (vue dynamique)

Le diagramme d'activité (cf. illustration 39) précise le comportement des deux 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). Les deux catégories d'agents ne se déplacent pas à la même vitesse. Le rapport de vitesse entre les véhicules et les individus qui marchent est directement accessible 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* cf. Chapitre 3.3.3). 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 répètent 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 distance³³, de manière à ce que le client n'ait pas trop à marcher. Une fois embarqués, les clients sont inactifs. Ils sont simplement débarqués une fois le véhicule arrivé à destination. Ils disparaissent alors de la simulation. On ne considère donc pas les éventuels retours des déplacements et nous ne faisons aucune hypothèse sur leur motif d'origine-destination.

33 Calculée selon la métrique du simulateur.

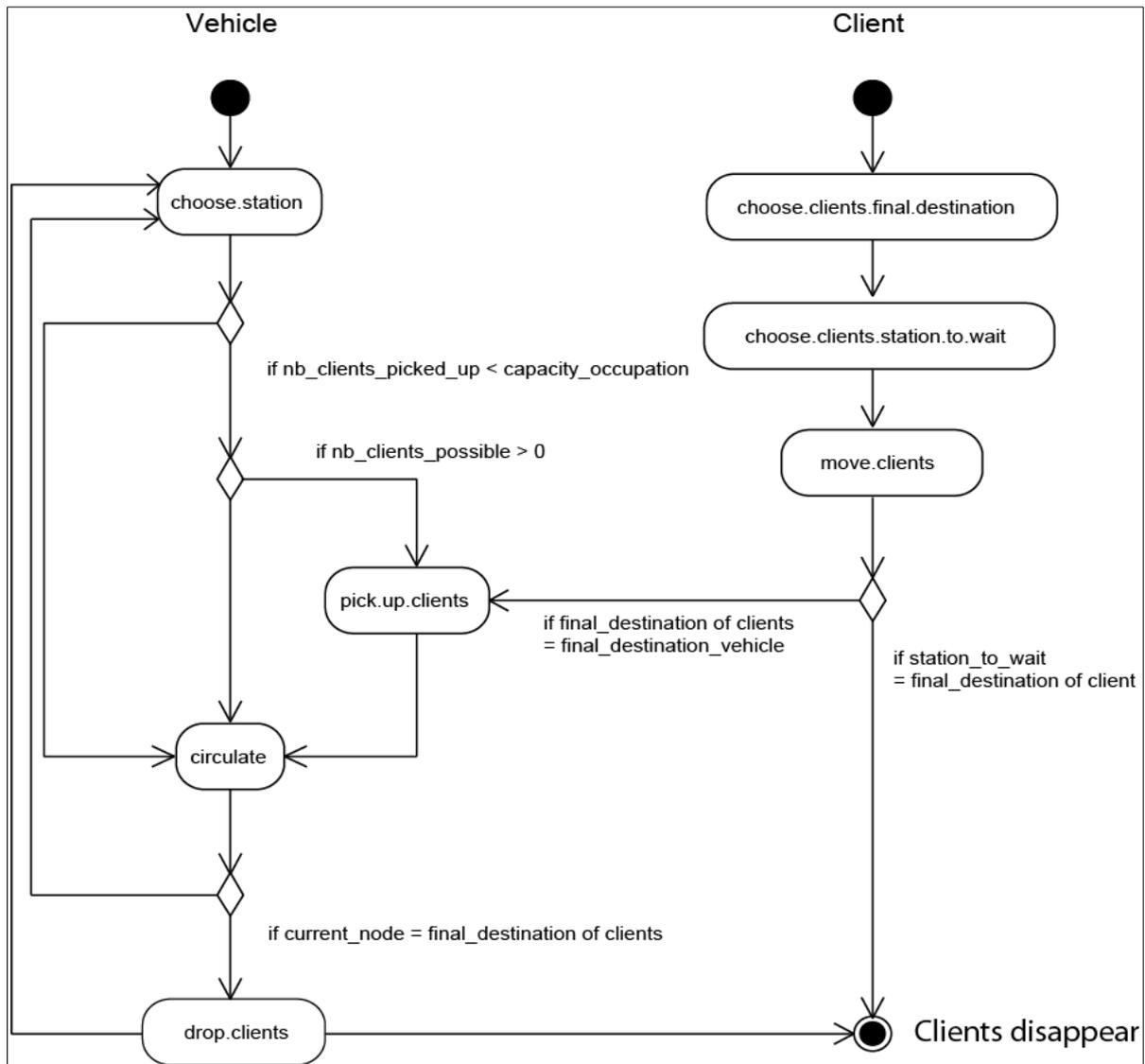


Illustration 39 : diagramme d'activité des agents.

3.2.2 L'environnement de simulation

Pour utiliser le TCTS, nous avons recours à deux fichiers NetLogo. Le premier fichier n'est pas un modèle de simulation à proprement parler, mais plutôt un ensemble de méthodes permettant de créer toutes sortes d'espaces virtuels (cf. illustration 40). Il est possible de générer un réseau aléatoire ou un réseau dit de Manhattan. Il est également possible de dessiner un réseau sur mesure, l'utilisateur pouvant s'appuyer sur une couche spatialisée ou un fichier image importé dans l'interface de simulation. Nous présentons ici les différents types de réseaux qu'il est possible de créer et d'importer dans le simulateur.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

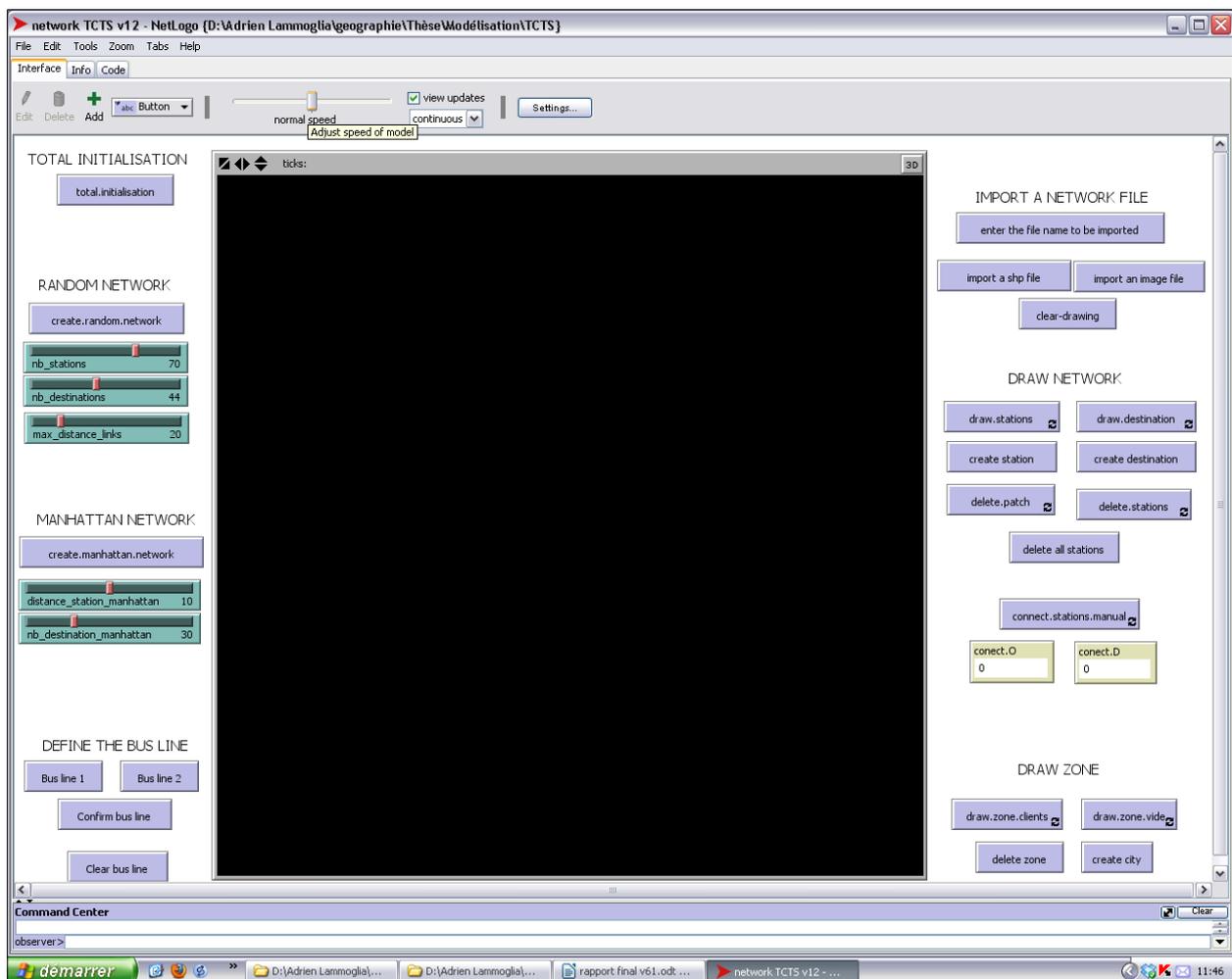


Illustration 40 : interface dédiée à la création des territoire virtuels.

Les réseaux théoriques aléatoires

Une première méthode consiste à créer automatiquement un réseau aléatoire. L'application dispose d'abord les stations et les destinations dans l'espace de manière aléatoire. Leur nombre est défini par l'utilisateur sur l'interface de simulation. Les stations sont ensuite reliées entre elles en fonction d'une distance maximale, au-delà de laquelle il n'y a pas de connexion. Cette distance maximale doit être ajustée empiriquement par l'utilisateur. Cette méthode présente l'avantage de fournir très rapidement des réseaux théoriques de forme variée (cf. illustration 41). Même si les formes paraissent différentes, la topologie, quant à elle, est assez similaire, ce qui est dû à la procédure aléatoire. Il est aussi très difficile de créer des réseaux réalistes avec cette méthode. Avec la disposition aléatoire des stations dans l'espace, certaines d'entre elles se retrouvent très proches. La procédure de connexion des stations étant automatique, ces stations sont alors fortement connectées entre elles, comme nous pouvons le voir sur l'image de gauche.

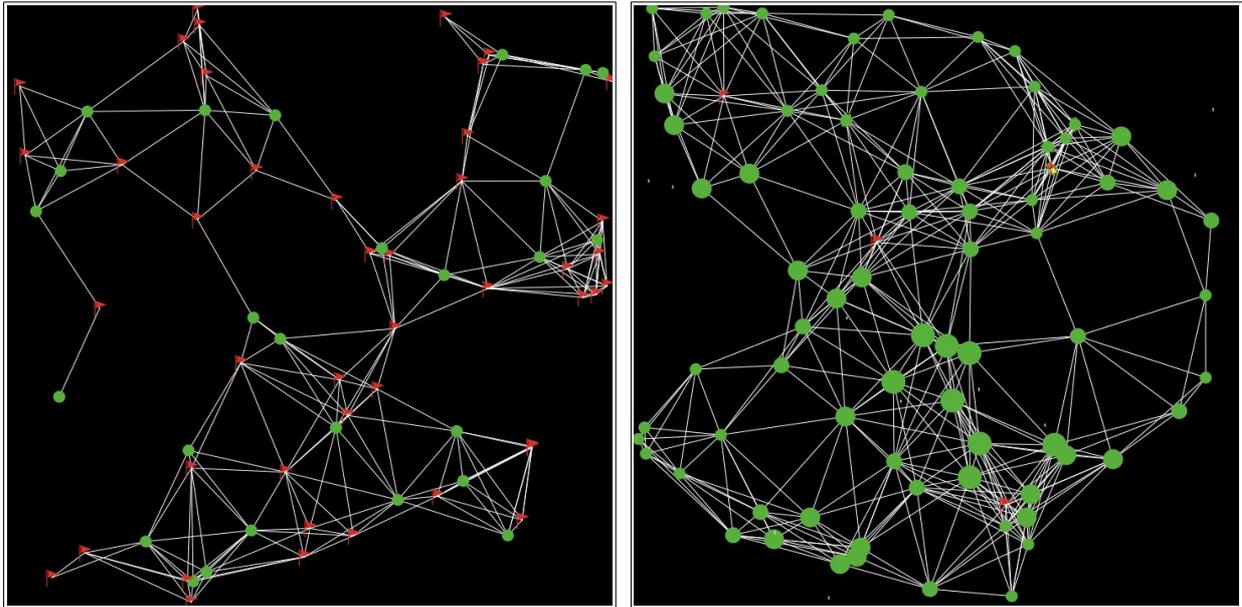


Illustration 41 : exemples de réseau aléatoire créé automatiquement.

Le réseau rectiligne de Manhattan

Toujours en restant dans une approche théorique, une seconde méthode permet de créer automatiquement des réseaux de type Manhattan Street Network (MSN) (N. Maxemchuk 1987). Comme son nom l'indique, ce type de réseau fait référence au maillage rectangulaire que l'on retrouve très fréquemment dans les centres-villes nord-américains.

Il est caractérisé par des routes parallèles et des croisements à angle droit. Dans la réalité, notamment dans les villes nouvelles, il n'est pas rare de trouver des réseaux routiers qui se rapprochent de cette forme théorique. Il est intéressant de simuler les modèles de transport sur ce type de réseau et de comparer les résultats avec des réseaux aléatoires ou inspirés du réel. En effet, la topologie du réseau de Manhattan est vraiment particulière puisque chaque station est reliée à quatre autres stations, ni plus ni moins, sauf pour les stations se situant en bordure de l'espace de simulation (cf. illustration 43).

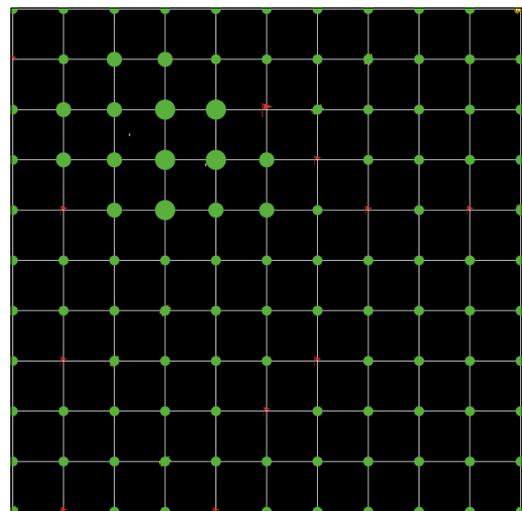


Illustration 42 : réseau de Manhattan.

Pour générer le réseau, nous définissons la distance qui va séparer chaque station. Cette distance étant constante et la taille de l'espace virtuel de simulation étant préalablement défini par l'utilisateur, ce paramètre définit implicitement le nombre de stations à créer. Comme pour le réseau aléatoire, il est possible de choisir le nombre de destinations parmi les stations créées.

Des réseaux dessinés sur mesure

Pour ne pas nous limiter à des réseaux théoriques générés de manière automatique, nous avons intégré une fonction permettant de dessiner des réseaux entièrement sur mesure. Ils peuvent être théoriques : la topologie et la forme des réseaux sont imaginées et définies par l'utilisateur. Ils peuvent aussi être dessinés en se basant sur des réseaux « réels ». Pour cela nous importons un fichier image ou une couche SIG. La fonction d'import ne permet pas de créer directement des objets. Le but est d'afficher un réseau de référence pour ensuite dessiner par dessus un réseau virtuel point par point. Pour ce faire, nous positionnons les stations et les destinations aux intersections du réseau « réel », puis nous les relient une à une en fonction des routes affichées sur l'écran. Une fois le réseau dessiné nous l'exportons au format .csv et nous le réimportons dans le simulateur. À titre d'exemple, nous pouvons utiliser des captures d'écran de Google Maps (cf. illustration 43) ou nous pouvons importer des réseaux routiers au format *.SHP, issues de bases de données comme GEOROUTE de l'IGN (cf. illustration 44).

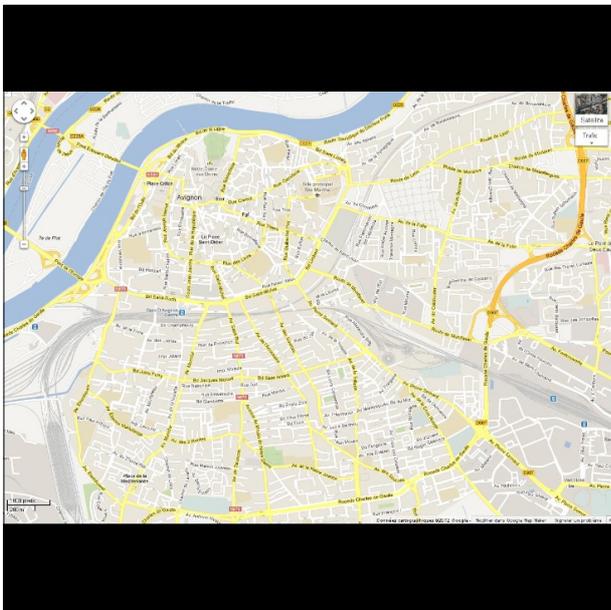


Illustration 43 : import d'un fichier image
(Source : Google Maps).



Illustration 44 : import d'une couche SIG
(Source : GEOROUTE 2013 de l'IGN).

Cette fonction permet de modéliser très simplement n'importe quel réseau routier. L'illustration 45 montre par exemple le réseau routier simplifié du centre-ville d'Avignon dessiné à partir de l'image Google Maps. Certes il est aujourd'hui relativement facile d'acquérir le réseau routier des villes françaises en couche géographique. Des simulateurs, comme Matsim (Balmer et al. 2008), sont d'ailleurs basés sur ce type de données. Cependant, ce n'est pas toujours facile pour les pays en voie de développement. Notre modèle couplé à Google Maps nous permet donc de simuler les modèles sur n'importe quels réseaux routiers, qu'ils correspondent à des villes européennes, africaines, etc. En important des plans ou des couches géographiques, nous pouvons aussi délimiter des zones de "vide", i.e. des zones où les clients ne peuvent pas apparaître. Par exemple, pour le réseau d'Avignon, nous avons identifié le Rhône et l'île de la

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Barthelasse comme des zones dépourvues de clients (cf. illustration 45). Cette fonction nous permet de créer une demande de mobilité plus cohérente avec la forme du réseau modélisé.

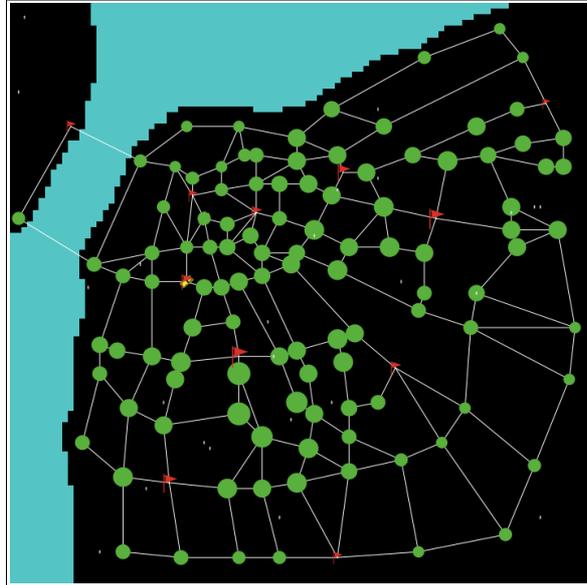


Illustration 45 : le réseau routier d'Avignon, dessiné à partir d'un plan Google Maps.

Identifier des zones de forte et faible demande de mobilité

Par défaut, les clients sont créés et distribués de manière aléatoire dans l'espace. Cette méthode nous a semblé inadaptée lorsque nous souhaitons simuler un système de mobilité sur un réseau réel. C'est pourquoi une fonction permet de définir des zones de plus forte demande de mobilité. Elles peuvent être assimilées à des zones de résidence, par exemple. À l'initialisation et à chaque création de clients, le programme va faire apparaître la totalité des clients sur ces espaces marqués.

L'illustration 47 montre par exemple le réseau simplifié du centre-ville d'Avignon sur lequel nous avons défini des zones de forte et de faible densité. Nous avons défini 3 types d'espace :

1. les quartiers de forte densité : centre historique d'Avignon (intra-muros), les quartiers résidentiels de forte densité (HLM qui bordent les grands axes au sud et à l'est d'Avignon) ;
2. les quartiers de moyenne densité, principalement composés de maisons individuelles ou d'immeubles de petite taille
3. les espaces peu habités :
 - les espaces naturels, agricoles ou non urbanisés comme le Rhône et l'île de la Barthelasse au nord et à l'ouest d'Avignon, ou encore le cimetière Saint Véran à l'Est du centre ville d'Avignon ;
 - les zones commerciales et industrielles comme par exemple le centre commercial Cap Sud, la gare de triage et le MIN
 - les pôles administratifs et les lieux touristiques comme le Palais de Papes et son jardin.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

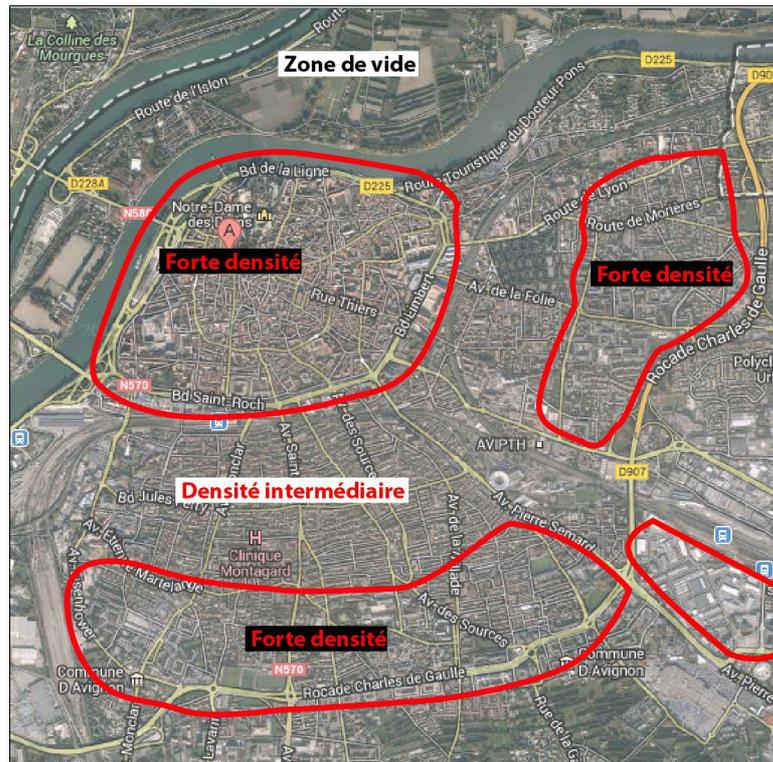


Illustration 46 : Avignon avec ses zones de fortes et faibles densité de mobilité (source : Google Maps).

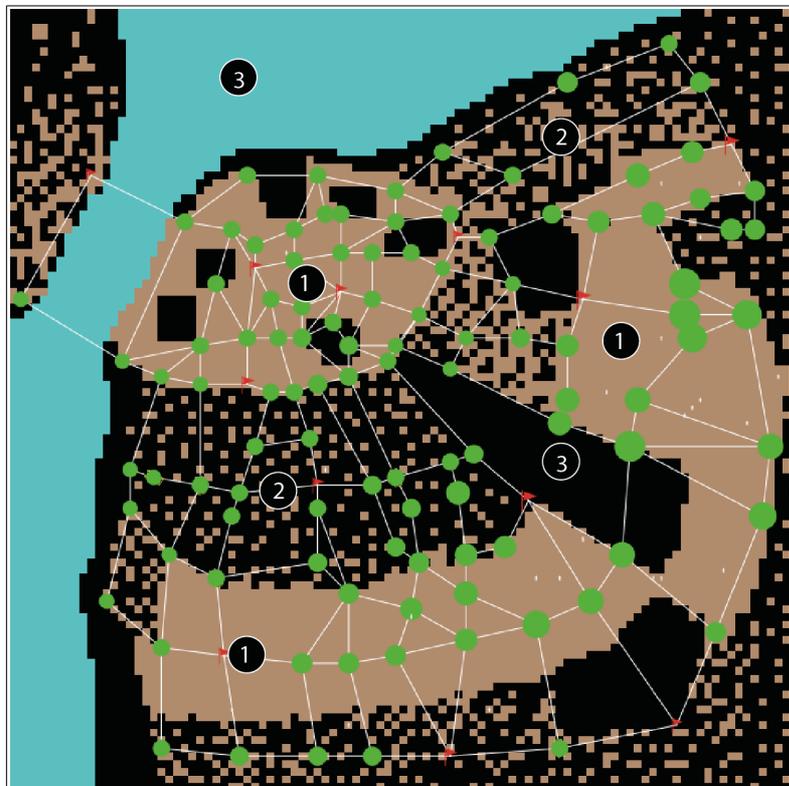


Illustration 47 : modélisation du réseau routier simplifié d'Avignon, avec ses zones de fortes et faibles densité de mobilité.

3.3 Modèles dynamiques

Dans les paragraphes qui suivent, nous expliquons en détail le fonctionnement de chaque modèle. Nous présentons les différents types d'agents mobilisés et leur spécificité en termes de choix de déplacement. Pour cela, nous entrons dans le détail des algorithmes à l'aide de schémas et de diagramme UML d'état-transition qui offrent une vue dynamique des systèmes (cf. chapitre 2.3.4.).

3.3.1 Un service fonctionnant sur des lignes régulières

Pour analyser et comparer les performances des services de transport flexibles avec des services rigides, nous avons implémenté un modèle de type autobus, fonctionnant avec des itinéraires de desserte réguliers. Ce type de transport se retrouve dans la très grande majorité des agglomérations, aussi bien dans les pays développés, qu'en voie de développement. Le modèle présenté ici fait intervenir une catégorie d'agent héritée des véhicules : les bus. Contrairement aux services spontanés, les bus se déplacent uniquement sur des lignes préalablement définies par l'utilisateur (cf. illustration 48). Ces lignes ne peuvent pas être circulaires ou du moins sans extrémité. Il y a nécessairement un terminus à chaque bout de ligne. Une fois le bus arrivé à la dernière station, il entame sa course dans le sens inverse. Les stations sont toutes des destinations, i.e. les bus peuvent embarquer et déposer des clients à chaque arrêt. Certaines stations peuvent appartenir à plusieurs lignes. Lorsque les clients choisissent des destinations appartenant à plusieurs lignes (c'est-à-dire avec plusieurs possibilités pour s'y rendre), ils vont « regarder » autour d'eux à quelle ligne appartient l'arrêt de bus le plus proche. Ils choisissent leur ligne en fonction de cette station.



Illustration 48 : modèle simplifié des lignes 1 et 2 du réseau de bus d'Avignon.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Il n'existe, dans ce modèle, aucune interaction entre le service de transport et l'environnement de simulation, étant donné que les bus circulent sur un itinéraire fixe. Autrement dit, ce modèle n'a aucune capacité d'adaptation au territoire et à la demande de mobilité, ni de cognition ou de communication. Ils sont strictement réactifs et se déplacent de station en station en fonction de la ligne de bus préalablement définie. Les clients doivent s'adapter au service en se déplaçant vers les arrêts de bus, et non l'inverse, comme c'est le cas avec les modèles présentés ci-après.

À l'initialisation, des bus sont créés pour les deux lignes, chacun se situant à un terminus. Dès que la simulation démarre, les bus se déplacent de station en station. S'il y a des clients dans le bus, celui-ci fait d'abord descendre les clients ayant pour destination la station actuelle. Une fois ces clients déchargés, l'agent calcule combien de places sont disponibles et prend éventuellement en charge d'autres clients. Avant d'embarquer des clients, les bus annoncent leur direction (soit aller, soit retour). Une fois que le bus arrive à la dernière station de la ligne, il change de direction et entame son itinéraire dans le sens inverse (cf. illustration 49). Les clients montent dans un bus seulement si le bus se déplace dans la bonne direction, i.e. si la direction annoncée permet d'atteindre la destination le plus rapidement possible. Il s'agit d'éviter aux clients de devoir aller jusqu'au terminus de la ligne pour ensuite revenir à la station de destination.

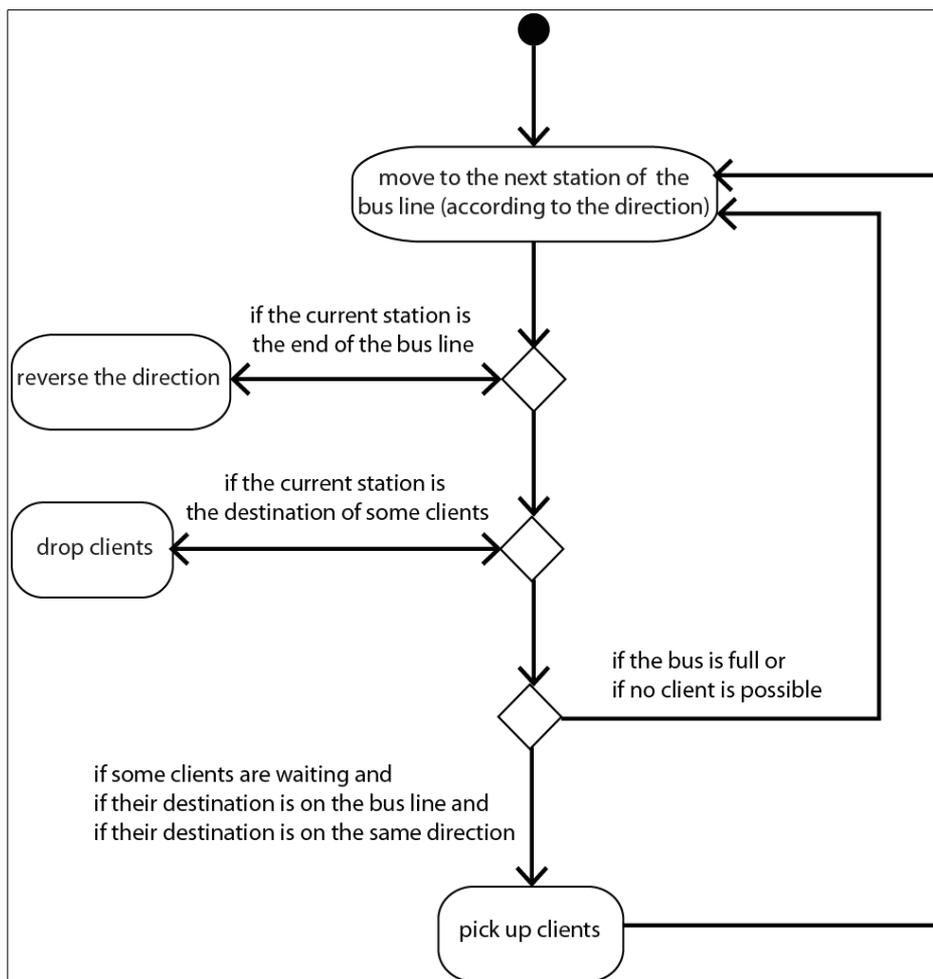


Illustration 49 : diagramme d'état transition des bus.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Spécificité du service	Fonctionnement sur lignes régulières
Système de référence	Service de bus réguliers (non flexible)
Capacité des véhicules	Agents réactifs simples
Capacité des clients	Agents réactifs simples
Adaptation à la demande de mobilité	Aucune
Adaptation au réseau	Aucune
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>choose.station.bus</i> », « <i>pick.up.clients.bus</i> »

Tableau 13: Fiche signalétique du modèle *Bus*

3.3.2 Des services spontanés de véhicules en concurrence

Les trois modèles que nous présentons ici concernent des véhicules qui opèrent en concurrence et qui choisissent des stations à desservir de manière spontanée. Ils n'ont pas de capacité de communication et ne coopèrent pas entre eux. Chaque véhicule cherche à maximiser individuellement sa rentabilité, c'est-à-dire à embarquer le maximum de clients pour une distance de parcours minimale. Leur comportement est très similaire, puisque seuls les critères de choix des stations à desservir diffèrent d'un modèle à un autre. Ces trois modèles plutôt théoriques nous permettent de comparer différents niveaux d'optimisation.

Niveau 1 : le modèle *Random*. Les véhicules se déplacent en choisissant des stations au hasard (fonction *random* de NetLogo). Ils n'ont absolument aucune connaissance sur les caractéristiques du territoire et sur la localisation des clients. Ils n'ont donc aucune capacité d'adaptation.

Niveau 2 : le modèle *Distance*. Les véhicules sont capables de calculer la distance qui les sépare des stations et ils se déplacent toujours vers la station la plus proche. Cela entraîne une densification de la desserte dans les espaces où les stations sont rapprochées. En se plaçant dans une optique de rentabilité du service, ce modèle présente l'avantage de pouvoir s'adapter à la forme du réseau. En effet, les véhicules évitent de s'aventurer sur des espaces reculés, avec des stations *a priori* peu génératrices de flux. Comme pour le premier niveau, les véhicules n'ont aucune connaissance de la répartition des clients sur le territoire et donc aucune capacité d'adaptation à la demande de mobilité.

Niveau 3 : le modèle *Potential*. Les véhicules se déplacent toujours vers les stations maximisant le rapport entre le potentiel d'attractivité de la station et la distance qui les sépare. On se rapproche ici du principe du modèle gravitaire. Le modèle gravitaire, initialement conçu en physique, a été fréquemment utilisé en géographie, car il permet, de simuler et d'expliquer assez finement les phénomènes de polarisation sur un territoire (Josselin & Nicot 2003). Avec ce principe, les véhicules s'adaptent à la contrainte spatiale, puisque les véhicules cherchent toujours à minimiser les distances parcourues, ainsi qu'à la demande de mobilité, puisqu'ils vont se diriger vers les stations ayant potentiellement le plus grand nombre de clients. L'illustration 50 explique plus en détails la procédure de choix du modèle *Potential*.

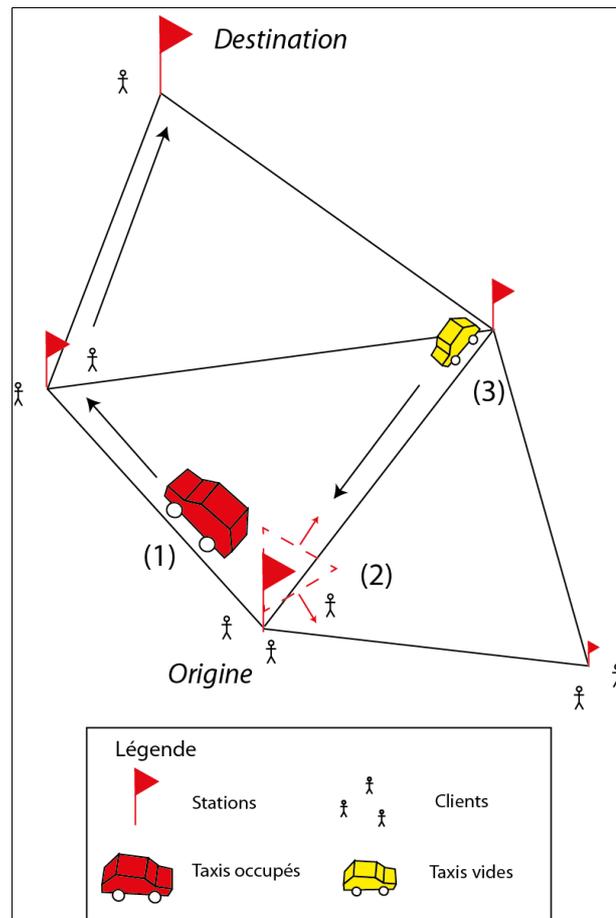


Illustration 50 : choix de déplacement basé sur le potentiel d'attractivité des stations.

1. Les véhicules embarquent les clients et les déposent à leur destination
2. La prise en charge de clients à une station accroît son potentiel d'attractivité. La taille des stations est proportionnelle au potentiel. Elle est calculée dynamiquement au cours de la simulation.
3. Quand ils n'ont pas de clients à bord, les taxis choisissent de se diriger vers la station la plus attractive et la plus proche de leur station actuelle (modèle gravitaire).

Le diagramme UML d'activité est commun aux trois modèles. Seule la procédure concernant le choix des stations diffère (procédure en fond noir sur le diagramme d'activité, cf. illustration 51). À l'initialisation, tous les véhicules se déplacent de station en station selon le critère de choix qui est spécifique aux trois modèles, jusqu'à ce qu'ils trouvent leur premier client. Dès l'instant qu'un client est embarqué, le véhicule rejoint le plus rapidement possible (par le plus court chemin de contiguïté 1) la station de destination demandée par les clients. S'il reste de la place dans le véhicule, ce dernier va tenter, à chaque station traversée sur le chemin, d'embarquer d'éventuels clients ayant la même destination que lui. Une fois arrivés à destination, tous les clients descendent et disparaissent de la simulation. Le véhicule choisit alors à nouveau une station à desservir selon sa procédure de choix.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

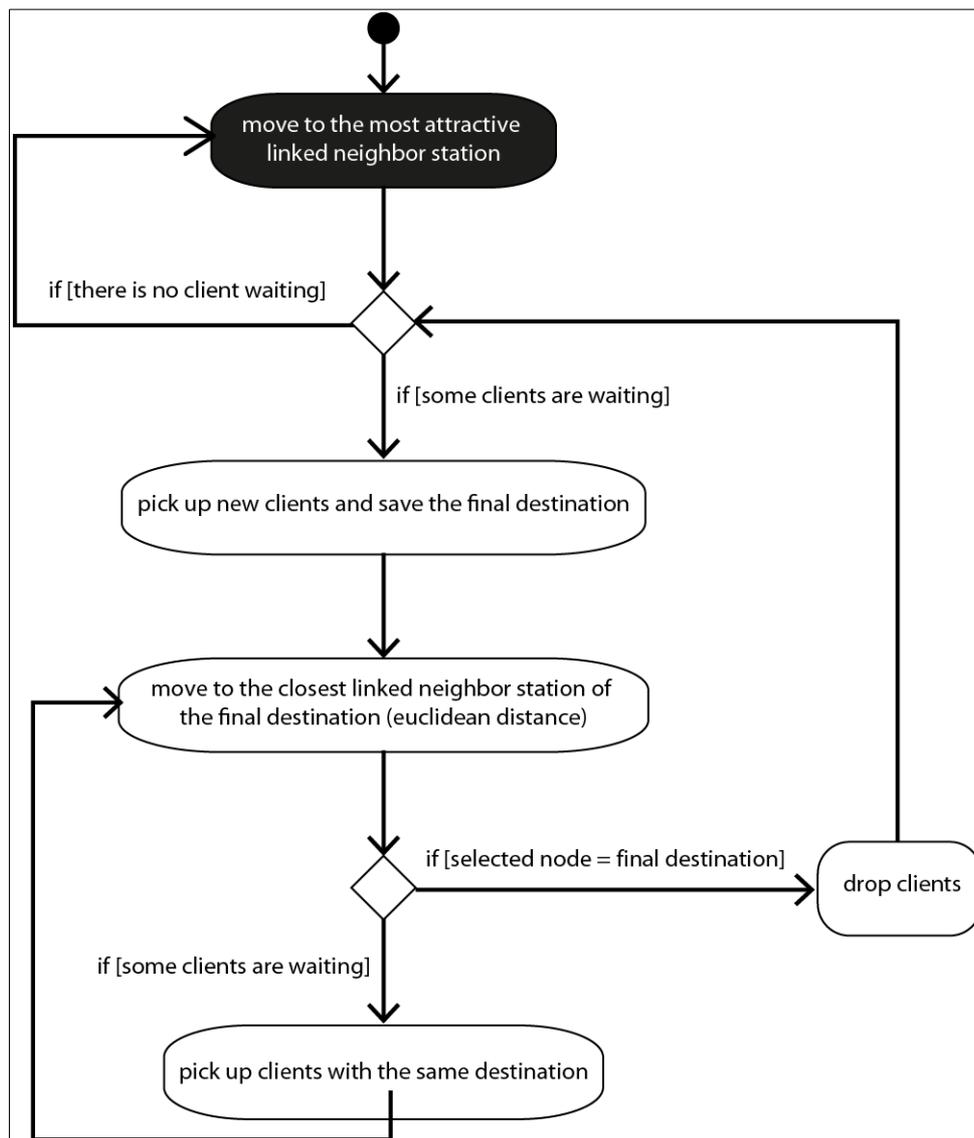


Illustration 51 : diagramme d'état transition des véhicules réagissant au potentiel d'attractivité.

Spécificités du service	Spontané, véhicules en concurrence
Système de référence	Taxis individuels (France et Sénégal) desservant un espace avec une forte densité de clients
Capacité des véhicules	Agents réactifs simples
Capacité des clients	Agents réactifs simples
Adaptation à la demande de mobilité	Aucune
Adaptation au réseau	Aucune
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>choose.station.random</i> »

Tableau 14 : fiche signalétique du modèle *Random*.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

Spécificités du service	Spontané, véhicules en concurrence
Système de référence	Taxis individuels (France et Sénégal) desservant un espace avec une forte densité de clients
Capacité des véhicules	Agents réactifs capables de calculer les distances
Capacité des clients	Agents réactifs simples
Adaptation à la demande de mobilité	Aucune
Adaptation au réseau	Évitent les stations trop éloignées
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>choose.station.distance</i> »

Tableau 15 : fiche de synthèse du modèle *Distance*.

Spécificités du service	Spontané, véhicules en concurrence
Système de référence	Taxis individuels (France et Sénégal) en maraude (à la recherche de clients)
Capacité des véhicules	Agents réactifs capables de calculer les distances et lire l'attractivité des stations
Capacité des clients	Agents réactifs simples
Adaptation à la demande de mobilité	Desservent en priorité les stations avec des clients en attente potentiels
Adaptation au réseau	Évitent les stations éloignées et peu attractives
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>choose.station.potential</i> »

Tableau 16 : fiche de synthèse du modèle *Potential*.

3.3.3 Des véhicules en concurrence qui attendent les clients aux stations

Ce modèle a été inspiré des taxis « clandos » observés à Dakar, notamment ceux fonctionnant en garages. 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 (cf. illustration 52).

Nous modélisons ici un service de transport typiquement à la demande 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. On peut donc considérer que l'adaptation à la demande de mobilité est forte. En revanche, ils n'ont aucune connaissance sur 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.

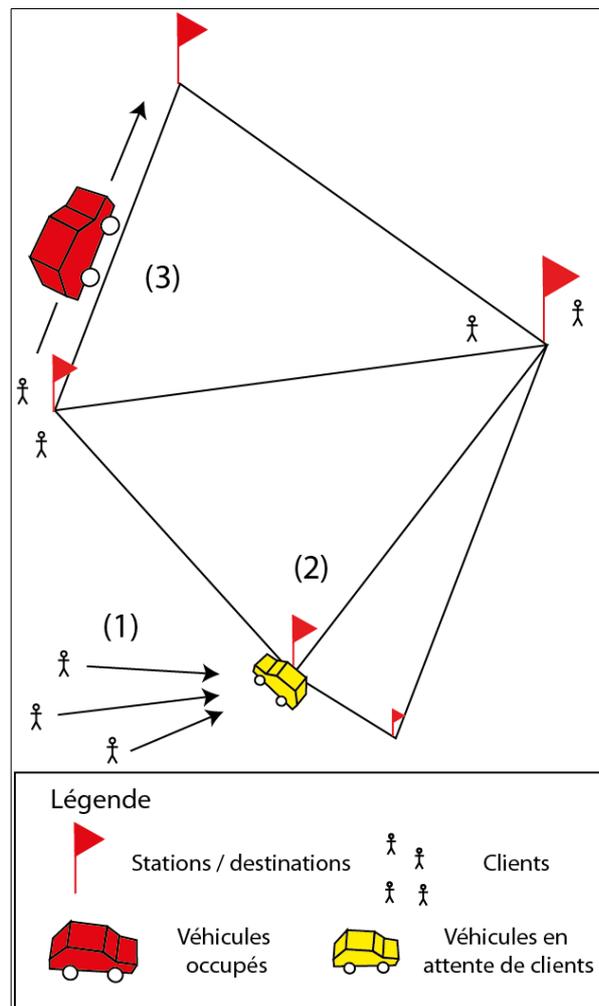


Illustration 52 : choix de déplacement basé sur l'attente des clients aux stations.

1. Les véhicules attendent les clients aux stations
2. Ils vont prendre pour destination celle 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.

La particularité de ce modèle se situe au niveau de la prise en charge des clients (cf. Illustration 53). 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. Initialement, les véhicules commencent leur course quand le taux d'occupation dépasse les 50 % en référence aux chauffeurs de « clandos » avec lesquels nous nous sommes entretenus 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, etc.).

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

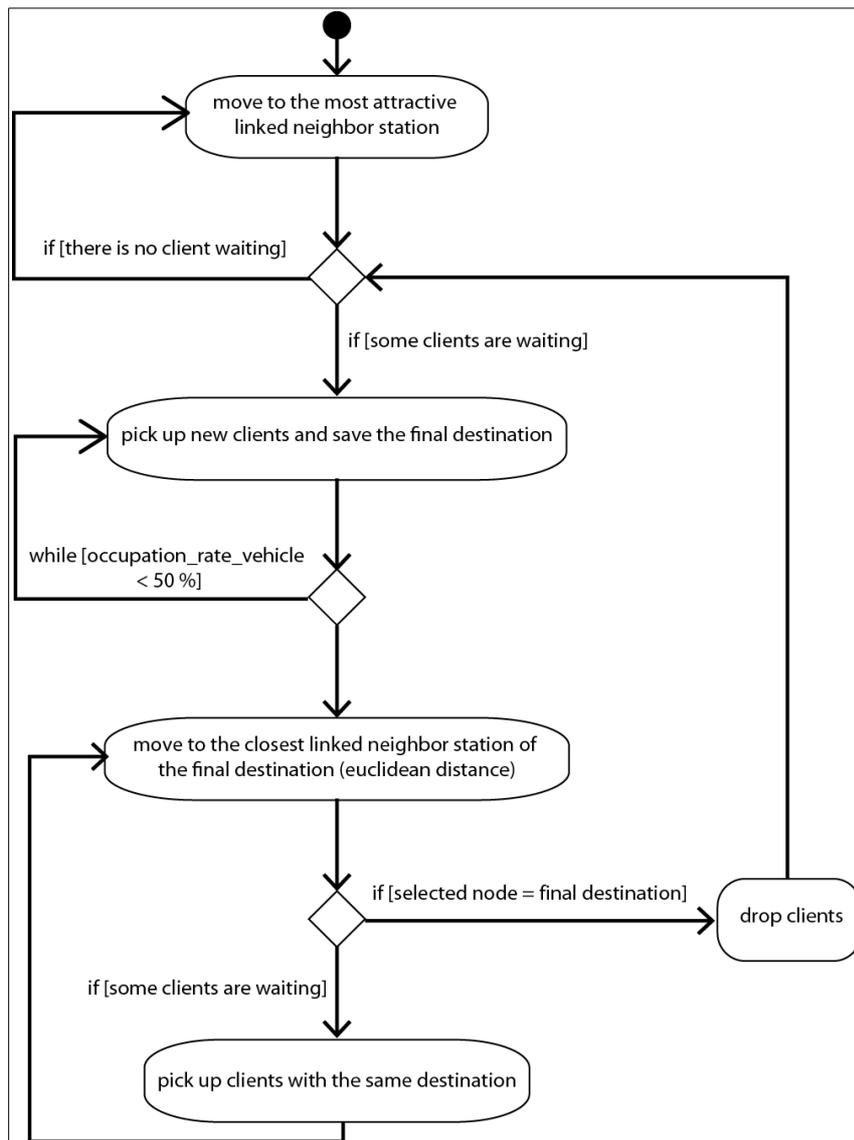


Illustration 53 : diagramme d'état-transition des véhicules pour le modèle *Clandos*.

Spécificités du service	Aucun déplacement à vide, véhicules en concurrence
Système de référence	Taxis « clandos »
Capacité des véhicules	Agents réactifs capables de choisir les clients à embarquer (les plus nombreux pour une même destination), de décider quand la course peut commencer (en fonction du taux d'occupation)
Capacité des clients	Agents réactifs simples
Adaptation à la demande de mobilité	Ne desservent que des destinations demandées par des clients, ne se déplacent jamais à vide
Adaptation au réseau	Aucune
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>pick.up.clients.clandos</i> »

Tableau 17 : fiche de synthèse du modèle *Clandos*.

3.3.4 Un service spontané de véhicules en coopération

Le modèle *Cooperation* propose une approche différente pour optimiser un service de transport flexible, en redonnant 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 destination commune, puis ils se dirigent directement vers la station de destination. Si possible, ils embarquent d'autres clients en cours de route. Leur particularité (cf. illustration 54) 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. Ils ne connaissent pas en revanche 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 au reste de la colonie. Cet algorithme d'optimisation est connu sous le nom de *Ant Colony Optimization* (Dorigo et al. 1999; Dorigo et al. 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 nous 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 s'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 entre eux pour assurer l'efficacité de leur service et surtout la rentabilité de leur travail.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

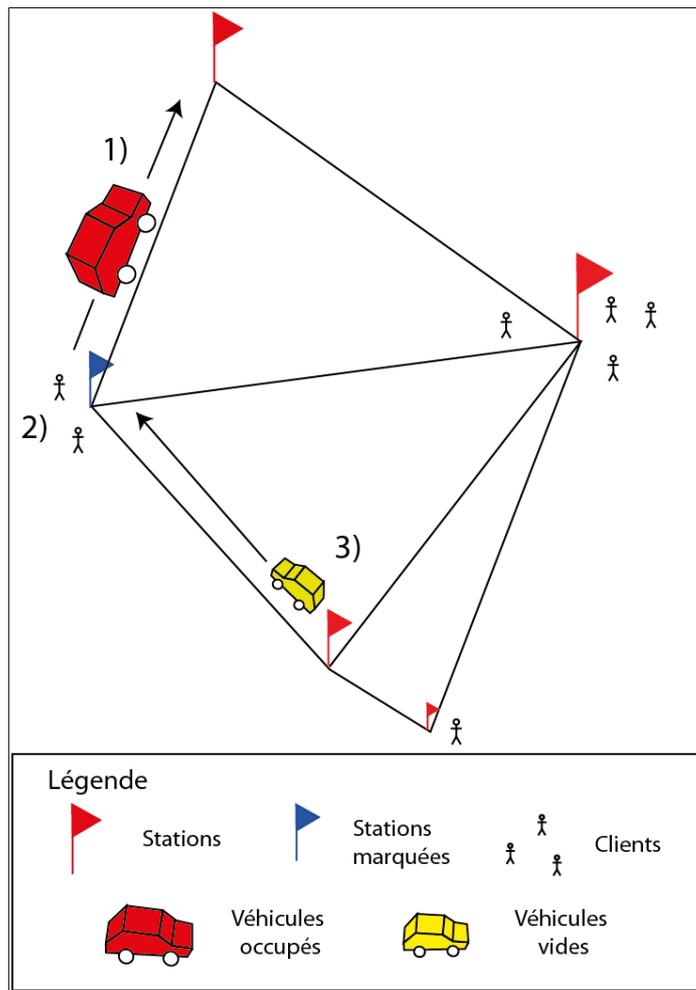


Illustration 54 : choix de déplacement basé sur la coopération inter-véhicule.

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 il ne sont pas occupés, les véhicules se dirigent en priorité vers les stations marquées.

D'un point de vue algorithmique, la différence apparaît sur la partie basse du diagramme d'état-transition (cf. illustration 55). 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.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

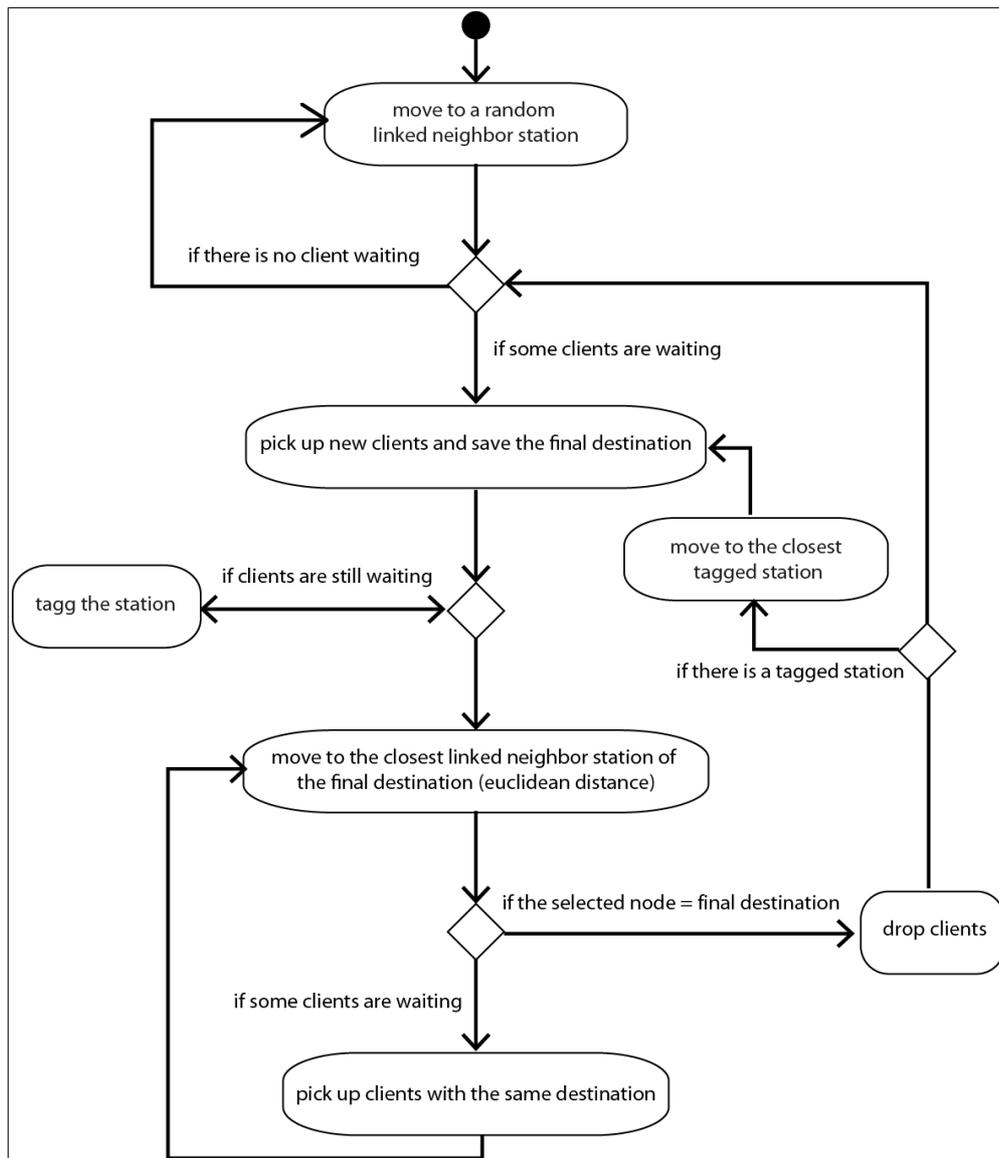


Illustration 55 : diagramme d'état transition des véhicules coopératifs.

Spécificités du service	Communication et coopération inter-véhicule
Système de référence	Taxis et taxis « clandos » (dans une certaine mesure)
Capacité des véhicules	Agents cognitifs capables de compter le nombre de clients restant à une station, marquer la station, transmettre l'information aux autres véhicules, mémoriser les stations marquées
Capacité des clients	Agents réactifs simples
Adaptation à la demande de mobilité	Dans une certaine mesure la priorité est donnée aux stations avec des clients en attente
Adaptation au réseau	Vision globale du réseau, faible contrainte de la topologie
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>choose.station.cooperation</i> »

Tableau 18 : fiche signalétique du modèle *Cooperation*.

3.3.5 Un service spontané avec une communication clients-véhicules

Nous modélisons ici 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, monter dans ce véhicule, pour se rendre à sa destination indiquée dans la feuille de route. C'est précisément ce type de service à gestion dynamique de l'information spatio-temporelle qui a été proposé dans l'ANR Modulobus (Guillas & Josselin 2012). Un transport à la demande est qualifié de dynamique lorsqu'il ne nécessite pas de procédure lourde de réservation. La réservation est en effet généralement considérée comme le talon d'Achille de ce type de transport face aux lignes régulières (Josselin & Genre-Grandpierre 2005).

Pour des raisons de faisabilité technique sur le terrain, les simulations réalisées à l'époque pour le projet n'ont décrit que le fonctionnement général de ce TAD dynamique sans communication entre les véhicules et les clients, hormis la transmission des feuilles de route et des informations logistiques. Le modèle multi-agents présenté ici permet donc d'explorer plus en détail les performances et les apports de cette méthode d'optimisation en fonction de la densité de clients mobiles. Le tableau suivant résume les objectifs fixés pour le projet ANR. Nous précisons les fonctions qui ont pu être intégrées dans le modèle SMA.

Objectifs	Modèle SMA
Remplir au maximum les véhicules, en minimisant les distances parcourues et les coûts, grâce à des fonctions d'optimisation spatiale dynamique	Intégré mais utilisant un calcul de plus court chemin en distance euclidienne uniquement
Assurer une desserte continue sur le territoire, grâce à un accès en porte à porte et en tout point	Partiellement intégré : desserte en point à point (arrêts) mais non en porte à porte
Permettre un service à toutes les populations confondues selon leurs contraintes propres, par simple réservation (délai très court de l'ordre de quelques minutes), ou en montée directe dans le véhicule (hélé par le client)	Intégré mais sans distinction des individus (même catégorie d'agents)
Réduire les ruptures de charge en temps et en nombres	Intégré grâce au <i>push</i>
Favoriser le regroupement spontané des clients par incitations financières	Non intégré
Lutter efficacement contre le « talon d'Achille » des TAD : l'obligation de réservation, en imaginant une offre sans réservation, basée sur un accès dynamique à l'information	Intégré : modèle entièrement dynamique sans réservation
Minimiser le nombre de véhicules roulants et réduire l'émission de gaz polluants	Non intégré

Tableau 19 : objectifs fixés pour le prototype Modulobus : en noir ceux atteints dans le modèle SMA, en gris ceux partiellement atteints, en blanc ceux qui n'ont pas été pris en compte.

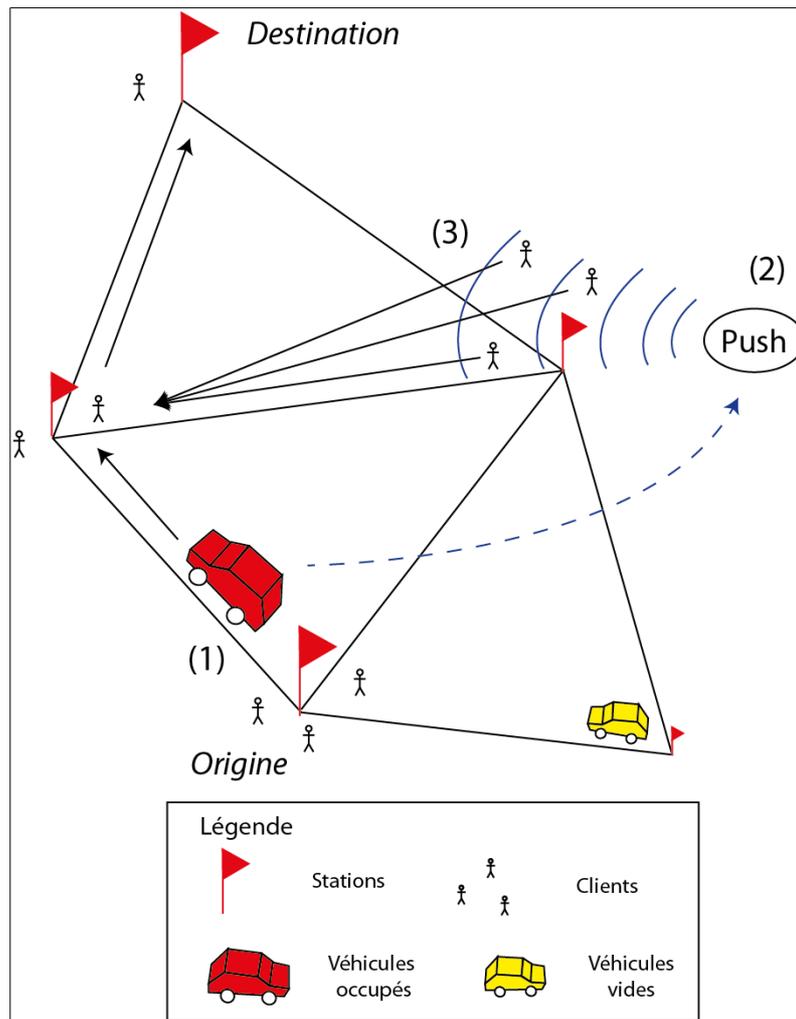


Illustration 56 : choix de déplacement basé sur la communication véhicules-clients.

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.

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 (cf. illustration 58), puisque dès cet instant, les véhicules vont calculer leur itinéraire jusqu'à la destination finale (plus cours chemin en distance euclidienne) et partager en temps réel cette information, via les *pushs*, avec tous les clients de la simulation.

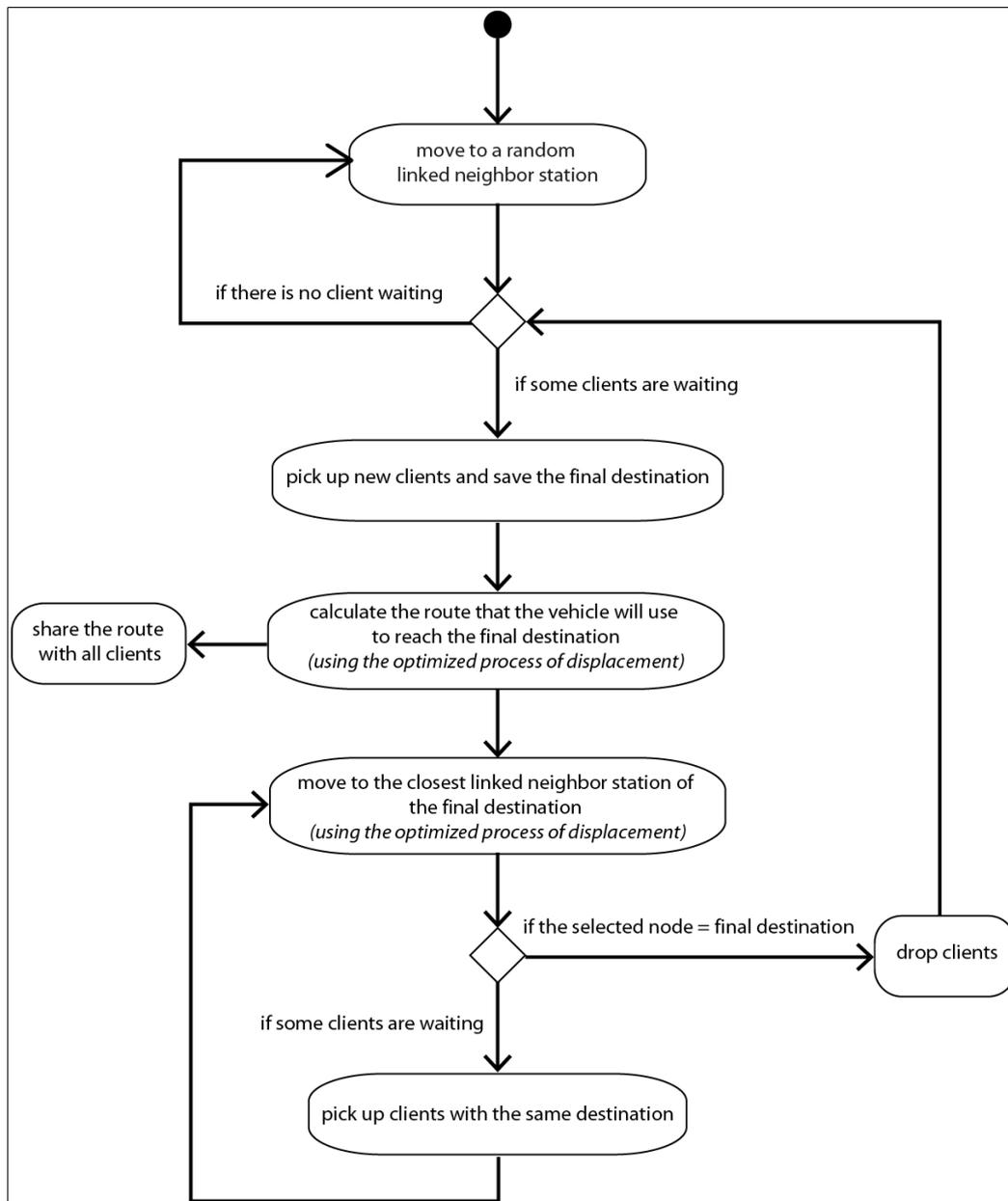


Illustration 57 : diagramme d'état-transition des véhicules utilisant le *push*.

La principale différence concerne le comportement des clients, notamment l'interaction entre les clients et les véhicules. Nous proposons un diagramme d'activité spécifique à ce modèle (cf. illustration 58). 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. Cela est rendu possible grâce au *push*. Ils connaissent tous les véhicules qui vont desservir leur destination finale. Ils connaissent aussi pour chaque véhicule, l'itinéraire qu'ils vont 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 observe régulièrement des clients qui changent plusieurs fois d'arrêts.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

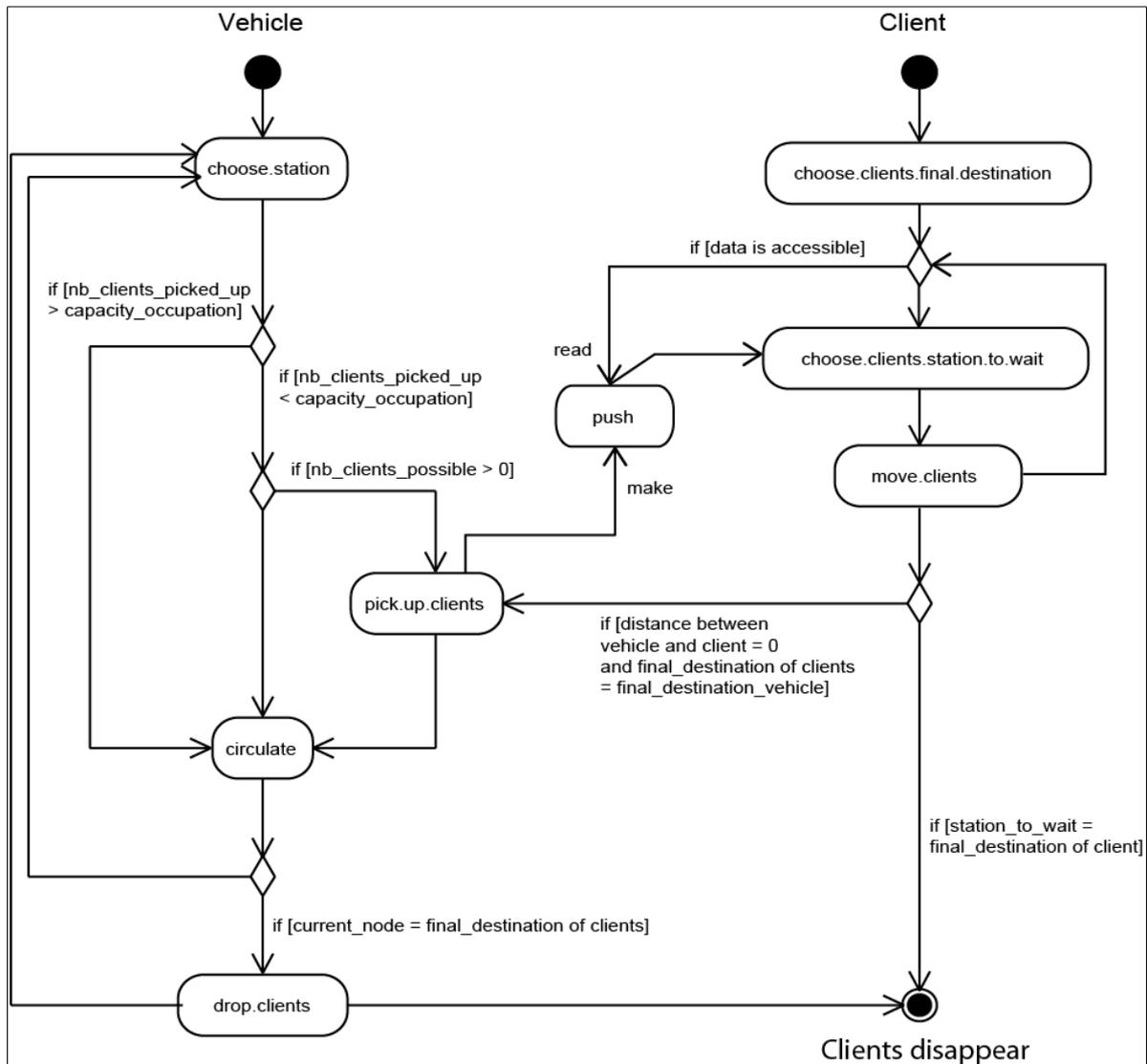


Illustration 58 : diagramme d'activité des agents pour le modèle *Modulobus*.

Spécificités du service	Communication véhicules-clients, véhicules en concurrence
Système de référence	Modulobus (Guillas & Josselin 2012)
Capacité des véhicules	Agents réactifs capables d'anticiper les itinéraires et transmettre l'information au <i>push</i>
Capacité des clients	Agents réactifs capables de lire l'information du <i>push</i> , trouver un véhicule avec un itinéraire adapté au besoin de mobilité, se déplacer vers une autre station (si nécessaire)
Adaptation à la demande de mobilité	Faible car c'est davantage les clients qui s'adaptent aux courses des véhicules
Adaptation au réseau	Aucune
Procédure clé (code NetLogo)	« <i>choose.clients.station.modulobus</i> », « <i>pick.up.clients.modulobus</i> », « <i>make.push</i> » (cf. annexe 5)

Tableau 20 : fiche signalétique du modèle *Modulobus*.

3.4 Interface de simulation

L'interface de simulation se veut intuitive et pédagogique. 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 cinq modèles présentés précédemment. 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 (cf illustration 59). Il est également possible d'observer sur l'animation la structuration de l'espace virtuel. Nous présentons plus en détails chacun de ces éléments dans les paragraphes suivants.

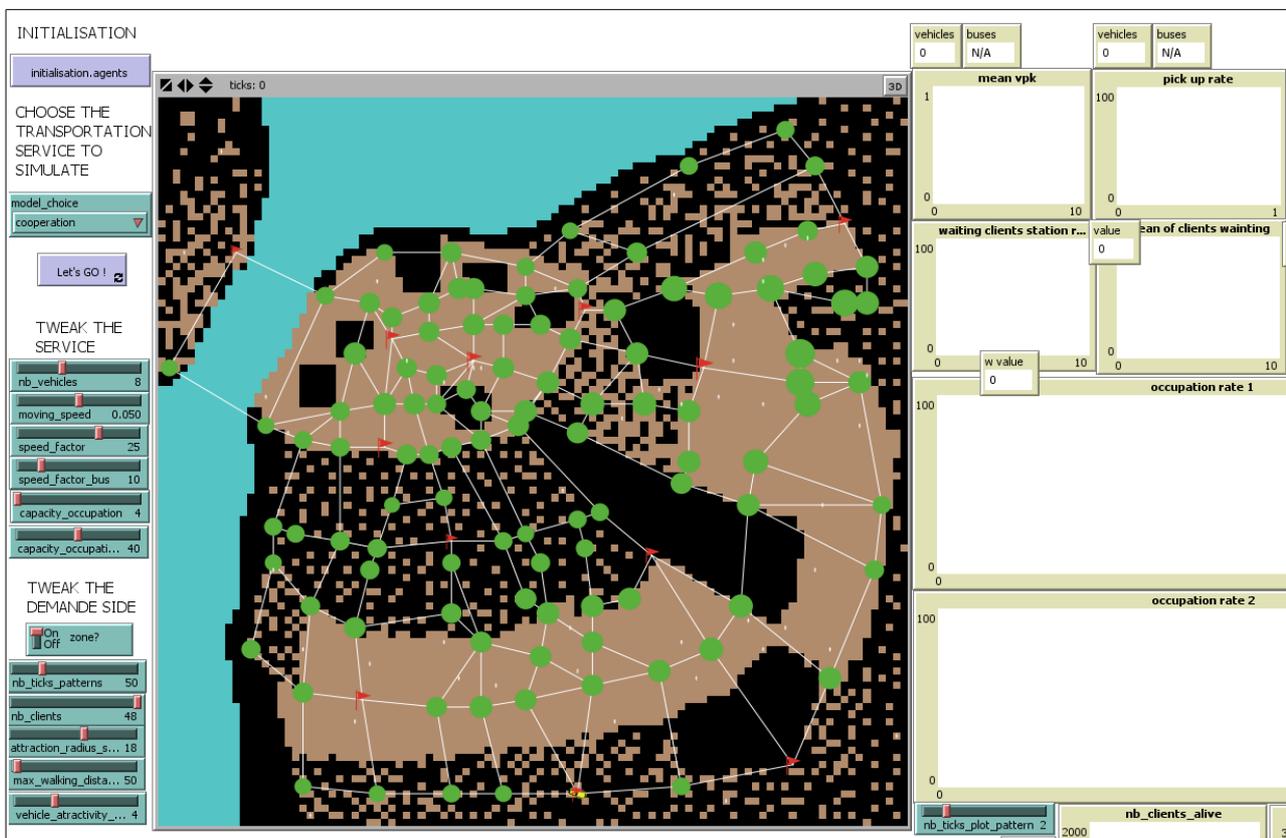


Illustration 59 : l'interface de simulation du TCTS.

3.4.1 Paramètres initiaux de simulation

Une fois le modèle sélectionné, l'utilisateur peut initialiser la simulation et personnaliser toute une série de paramètres. Ces paramètres concernent à la fois le service de transport et la demande de mobilité. En revanche, tous les paramètres d'ordre spatial, c'est-à-dire tout ce qui concerne l'environnement de simulation, doivent être définis en amont avec le fichier NetLogo dédié.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

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).

Ils 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 présent dans le cercle). Ce principe n'est pas valable pour le modèle de type bus ;
- la distance maximale de déplacement, au-delà 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.

3.4.2 Les variables et les indicateurs

Le TCTS permet d'analyser chaque simulation de manière exploratoire selon trois approches. Pour chaque approche, nous avons 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.

Approche clients

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

1. le nombre moyen de clients en attente aux stations à l'instant t (CA) ;
2. 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) ;
3. le plus grand nombre de clients en attente ainsi que la station concernée à l'instant t ;
4. 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.

Approche opérateur

La seconde approche concerne les opérateurs de transport. Nous analysons les performances et l'efficacité des services de transport. Nous utilisons les variables suivantes :

5. 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.

$$VPK = \frac{\sum Ce}{D} ;$$

6. 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).

$$tC = \left(\frac{\sum Sc}{\sum Sf} \right) \times 100 ;$$

7. le taux d'occupation des véhicules (tO en %) : nombres de clients à bord d'un véhicule (c) à l'instant t rapporté à la capacité du véhicule (CP) : $tO = \left(\frac{c}{CP} \right) \times 100$.

Approche territoire

Enfin, nous appréhendons 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 :

8. le taux de desserte (tD en %) : nombre total de clients arrivés à destination (Ca) divisé par le nombre total de clients créés (C) : $tD = \frac{Ca}{C} \times 100$;

9. 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) :

$$tSCA = \left(\frac{\sum Sc}{S} \right) \times 100 ;$$

10. 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 ;

11. le potentiel d'attractivité des stations à l'instant t :

$$Pa = \sum \text{clients embarqués} + \sum \text{clients déposés} + \sum \text{passages de véhicule} .$$

3.4.3 Observations et analyses des animations

Les graphiques et les moniteurs situés à droite de la fenêtre de simulation nous permettent d'observer en simultané le fonctionnement des agents et l'évolution des variables et des indicateurs présentés ci-dessus. Ces graphiques sont mis à jour dynamiquement à chaque itération logicielle. Par souci de simplification, les variables des agents ne sont pas toutes représentées. Pour le taux d'occupation des véhicules, par exemple, nous avons créé deux graphiques et l'application sélectionne deux véhicules au hasard. Sachant que pour chaque variable, le détail de tous les agents est disponible grâce à l'export de données.

Partie 2. Modélisation multi-agents de systèmes de transport

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 nous permet d'observer et de comprendre la structuration de l'espace virtuel, notamment les phénomènes de polarisation (cf illustration 60). Lorsque le modèle de bus est simulé, la manière dont se structure l'espace est légèrement différente. La taille des stations non desservies par la ligne de bus n'est pas proportionnelle à leur potentiel d'attractivité, mais elle est proportionnelle au nombre de clients se trouvant en attente à la station. Cela nous permet de repérer les stations qui devraient potentiellement être rattachées à une ligne de bus, puisque par sa localisation, elle attire beaucoup de clients sur le territoire. Aussi, la taille des arrêts de bus est non plus proportionnelle au potentiel d'attractivité, mais seulement au nombre de clients embarqués et débarqués à la station. En effet, les bus se déplaçant de station en station de manière régulière, leur fréquentation n'est pas pertinente pour évaluer l'attractivité des arrêts.

Pour finir, NetLogo propose toute sorte 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 historique. Chaque simulation peut être sauvegardée dans son intégralité et être ré-importée plus tard si nécessaire. Tous ces outils présentent un réel intérêt pour la comparaison des modèles, comme nous allons le montrer dans la partie qui suit.

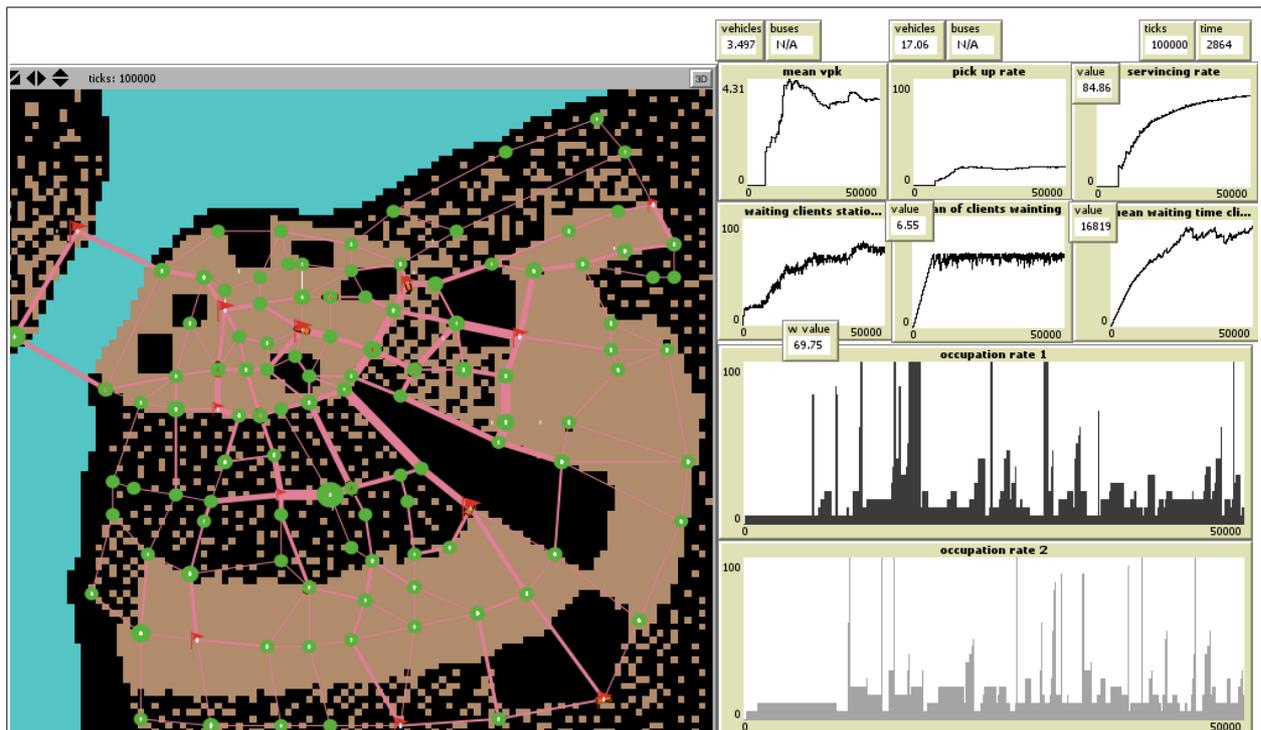


Illustration 60 : exemple de résultat de simulation observable sur l'interface.

Conclusion partie 2 : les fondements méthodologiques

Dans cette seconde partie, nous avons pu montrer qu'il était pertinent de considérer les services de transport, et notamment les services souples et spontanés, comme des systèmes complexes. En effet, dans un système de mobilité (meta-système), nous pouvons observer trois sous systèmes en interdépendance et opérant à différentes échelles : la demande de mobilité, l'offre de transport et l'autorité organisatrice de transport. Dans cette thèse nous nous focalisons sur l'offre, en particulier sur le fonctionnement des systèmes les plus flexibles ou présentant de réelles capacités d'adaptation.

Pour répondre au mieux à la question de recherche, nous avons choisi d'inscrire nos travaux dans le paradigme de la complexité et de nous appuyer sur un ensemble de théories fournies par l'approche systémique. Pour simuler les différents transports flexibles français et sénégalais, nous avons eu recours à la modélisation multi-agents et au simulateur NetLogo. Combiné à d'autres outils conceptuels (UML et ODD), cet outil nous a permis de modéliser des comportements au niveau de l'individu (besoin de mobilité des clients, choix de déplacements des chauffeurs) et d'observer précisément le fonctionnement et les caractéristiques du service offert au niveau d'un territoire.

Enfin, nous avons présenté le Trans-Cultural Transports Simulator (TCTS) qui se situe au cœur de la recherche. Le méta-modèle, basé sur l'agent, regroupe un ensemble de modèles, plus ou moins flexibles et complexes (cf. illustration 24). C'est justement ces différents niveaux de flexibilité que nous allons tester et comparer dans la partie suivante. Les modèles sont tous inspirés de la réalité. Ils ont été conçus à partir de services de transport français et sénégalais étudiés (cf. Partie 1). Les simulations sont exécutées à partir du simulateur NetLogo. L'outil permet de créer une variété de réseaux et de territoires virtuels, certains étant entièrement théoriques et d'autres plus réalistes. Grâce à des fonctions d'import et d'export, chaque modèle peut être simulé dans des conditions strictement identiques. Comme nous le verrons, il est aussi possible de les simuler simultanément sur un même territoire virtuel. Les simulations sont analysées en temps réel grâce aux animations et aux graphiques dynamiques. Pour plus de précision, nous extrayons aussi les données issues de la base pour les traiter avec des outils de calculs dédiés.

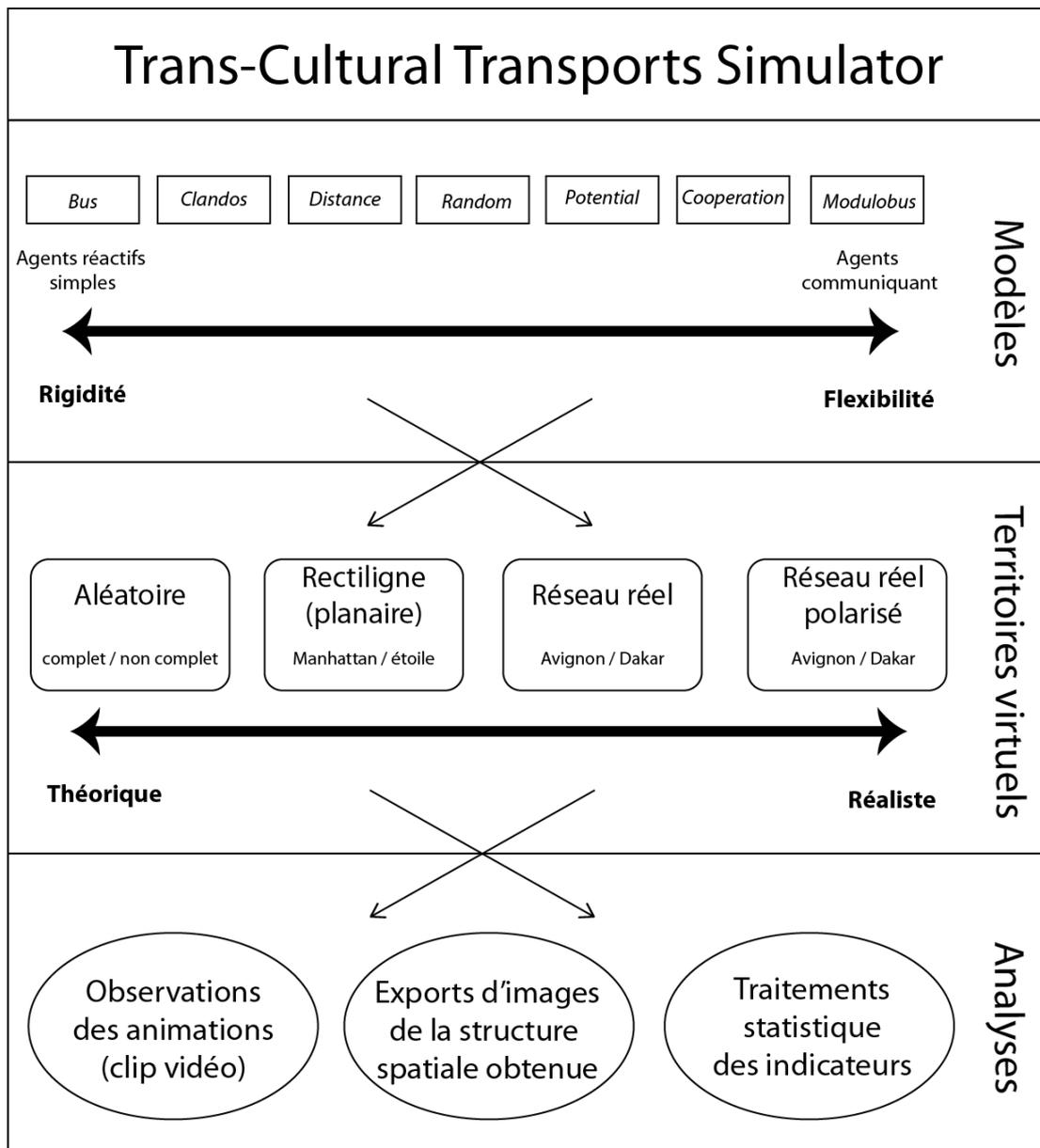


Illustration 61 : les composantes du Trans-Cultural Transport Simulator

Partie 3.

Exploration et confrontation des systèmes de transport

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

« La simulation est l'activité par laquelle, en fonction d'objectifs précis, et à l'aide d'un dispositif expérimental informatique (appelé simulateur) on perturbe selon un protocole déterminé un modèle dynamique » (Treuil et al. 2008).

La troisième partie est entièrement dédiée à la simulation des modèles et à la confrontation des systèmes de transport. A chaque étape, nous proposons un protocole de simulation permettant de définir un ensemble de versions de simulation. Chaque version correspond à une combinaison de paramètres et à une condition initiale donnée. Pour chaque version, nous étudions la manière dont réagit le modèle face à ces conditions de simulation.

Dans un premier temps, notre objectif est d'explorer l'espace des paramètres des modèles et de définir des seuils d'efficacité. Nous faisons varier des paramètres concernant aussi bien l'offre de transport, que la demande de mobilité ou le territoire de desserte. A l'issue de cette première phase nous expliquons les conditions de fonctionnement idéales de chacun des modèles. Nous proposons une première typologie et nous procédons à une sélection des modèles les plus efficaces ou les plus typés. Dans un second temps, notre objectif est d'analyser en profondeur leur comportement et de les caractériser très précisément. Pour cela nous fixons les paramètres qui nous ont semblé peu influant et nous procédons à des analyses de sensibilité sur les autres. Nous étudions en particulier l'influence du réseau et leur capacité de montée en charge. Enfin, la troisième phase est dédiée à la confrontation des modèles. En les simulant en simultanée, nous proposons toute une variété de modèles mixtes, relativement représentatifs de système de mobilité réalistes Nous proposons également de les combiner de manière séquentielle afin de former un modèle hybride que nous essayons de calibrer. L'objectif de cette dernière phase de simulation est d'étudier la complémentarité des modèles, i.e. leur capacité à se combiner avec des services plus ou moins similaires ou différents, et donc d'évaluer leur capacité d'adaptation à différents contextes de mobilité (cf. illustration 62).

Sommaire partie 3

Chapitre 1.Exploration de l'espace des paramètres et sélection des modèles.....	171
Chapitre 2.Analyses de variabilité et caractérisation des modèles.....	194
Chapitre 3.Confrontation et complémentarité des systèmes.....	219
Conclusion partie 3 : comparaison de l'ensemble de modèles.....	257

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

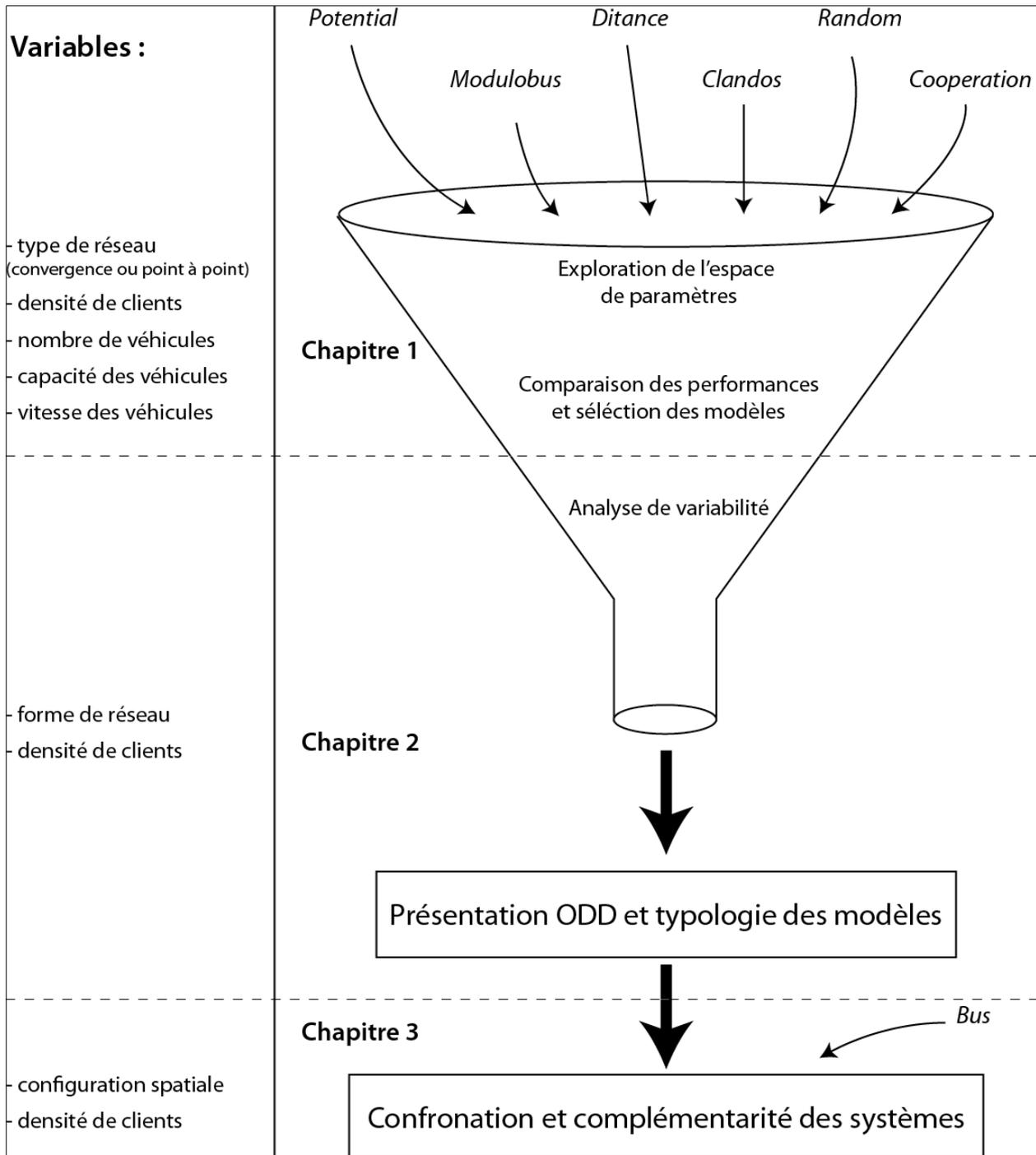


Illustration 62 : organisation des différents étapes de simulation et d'analyse.

Chapitre 1. Exploration de l'espace des paramètres et sélection des modèles

La première étape de notre démarche consiste à explorer les modèles dans leur espace de paramètres. Pour cela, nous définissons des versions de simulation, chacune d'entre elles correspondant à un couple de paramètres. Pour des raisons de temps et de logistique, il n'a pas été possible de simuler chaque modèle sur toutes les conditions possibles. Nous avons donc établi une première sélection en fonction des résultats obtenus dans nos travaux antérieurs. Nous savons par exemple qu'au-delà d'une certaine densité de clients, les modèles saturent. Il faut savoir qu'avec une densité de clients élevée simulée sur 100 000 itérations logicielles, la simulation peut durer plus de 8 heures selon les modèles. Chaque modèle est simulé et analysé avec les mêmes paramètres pour une première comparaison de performance.

1.1 Problème posé

Les objectifs de la première phase de simulation sont d'explorer le fonctionnement des modèles, de caractériser leur mode de fonctionnement et de commencer à délimiter leurs conditions de fonctionnement. Toutes les simulations sont réalisées sur une même forme théorique de réseau routier. Nous distinguons néanmoins un réseau de type convergence et un réseau en point à point.

1.1.1 Postulats

Pour des conditions données, nous admettons que les résultats varient très peu d'une simulation à l'autre. Autrement dit, si nous répétons une version de simulation plusieurs fois, nous obtenons des résultats sensiblement identiques. De cette manière, les résultats obtenus pour chaque version sont représentatifs des conditions testées.

1.1.2 Hypothèses

H.1 : Nous faisons l'hypothèse que les modèles atteignent un seuil de saturation au-delà d'une certaine quantité de clients créés au cours de la simulation. D'après un précédent travail dans lequel nous avons proposé une méthode pour évaluer la robustesse des modèles (Lammoglia et al. 2011), ce seuil se situe entre 10 et 20 clients créés toutes les 50 itérations. De la même manière, nous faisons l'hypothèse qu'en dessous d'une certaine quantité de clients, la comparaison des modèles n'est pas pertinente, car la densité est insuffisante pour faire fonctionner les procédures d'optimisation. Nous pensons que ce seuil se situe aux alentours de 40 000 clients, soit 2 clients créés toutes les 50 itérations.

H.2 : Tous les modèles peuvent être simulés sur un pied d'égalité pour l'ensemble des versions de simulation sélectionnées. Autrement dit, ils ne sont pas limités à certaines conditions de simulation, que ce soit concernant les caractéristiques du réseau, la densité de clients, ou la capacité des véhicules et leur vitesse de déplacement.

1.1.3 Objectifs

Nos objectifs concernant cette première phase d'exploration des modèles peuvent se résumer ainsi :

- Analyser le fonctionnement des systèmes et évaluer leurs performances. Pour ce faire, nous proposons une grille d'analyse suffisamment précise et adaptée aux spécificités de chacun ;
- Caractériser les modèles en fonction de leurs atouts et leurs faiblesses, et établir une typologie des services selon les trois approches : client, opérateur, territoire ;
- Rechercher les conditions de fonctionnement les plus adaptées aux différents modèles, et sélectionner les modèles les plus pertinents pour la suite de l'étude.

1.2 Méthodologie

1.2.1 Protocole de simulation

Pour cette première phase d'exploration, nous avons sélectionné les modèles *Random* ; *Distance* ; *Potential* ; *Clandos* ; *Cooperation* et *Modulobus* (cf. Partie 2, Chapitre 3.3). Nous avons exclu de nos simulations le modèle *Bus* car il présente un fonctionnement sensiblement différent des autres. C'est en effet un service non flexible et sans aucune capacité d'adaptation au territoire. Il nécessite des lignes régulières préétablies. Or à ce stade, nous ne connaissons pas les axes de desserte les plus performants pour ce réseau théorique. L'enjeu est justement de faire émerger des corridors de desserte grâce aux simulations. Le modèle *Bus* sera donc utilisé par la suite, à titre de comparaison.

Le tableau 21 met en exergue les paramètres qui conditionnent les simulations. Tous les paramètres concernant l'espace sont fixés. Le temps de simulation et la fréquence de création des clients ont été définis grâce à notre précédente expérimentation (*Lammoglia et al. 2011*). Nous avons 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 itération ou 20 clients toutes les 100 itérations. Nous avons choisi de fixer la fréquence de création à 50 pour que la simulation progresse plus rapidement. Nous avons fixé le temps de simulation à 100 000 itérations car nous avons pu observer qu'au delà les indicateurs ne variaient presque plus. Pour 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) sont également fixes. En revanche, nous allons faire varier les cinq autres paramètres (en gras) et chaque combinaison de paramètres va constituer une version de simulation.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Catégories	Paramètres	Valeurs
Temps (discret en nombre d'itérations)	Temps de simulation	100 000
	Fréquence de création des clients	50
Espace	Nombre de stations	80
	Part de destinations possibles parmi les carrefours	10 % (convergence) 100 % (point à point)
	Taille du territoire	700*700 pixels
Offre de transport	Nombre de véhicules	6 ; 12
	Capacité des véhicules	4 ; 7 ; 20
	Facteur vitesse	15 ; 30
Demande de mobilité	Nombre de clients	3 ; 6 ; 12
	Distance de marche maximale	50
	Rayon d'attractivité des stations	18

Tableau 21 : liste complète des paramètres de simulation (**paramètres variables**).

Nous avons généré un réseau théorique selon la procédure aléatoire présentée dans la partie 2 (cf. Partie 2, Chapitre 3.2.2). Les nœuds (cercle et drapeau) ont été disposés aléatoirement dans l'espace et ont été connectés entre eux selon une distance maximale de 23 pixels (longueur maximale des tronçons routiers). Nous distinguons néanmoins deux réseaux (cf. illustrations 63 et 64). Le premier est un réseau en convergence sur lequel nous avons localisé 4 destinations. Le second réseau permet une desserte en point à point, i.e. les stations sont toutes des destinations. Chaque modèle a été simulé sur ces deux réseaux et pour chaque combinaison de paramètres.

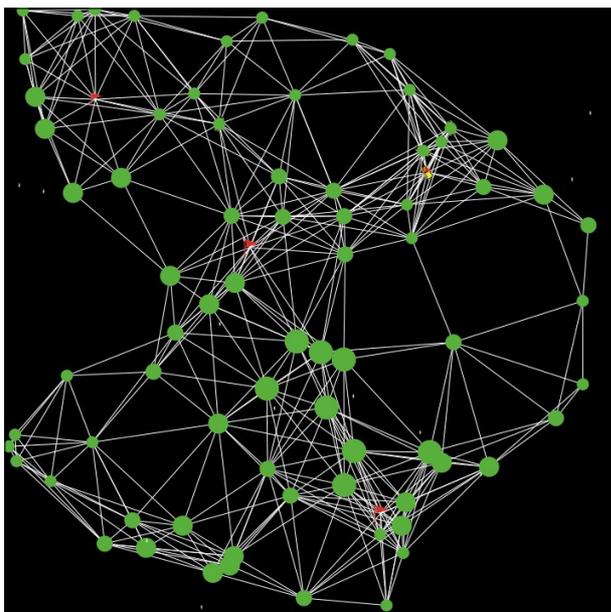


Illustration 63 : capture d'écran du réseau en convergence (R1).

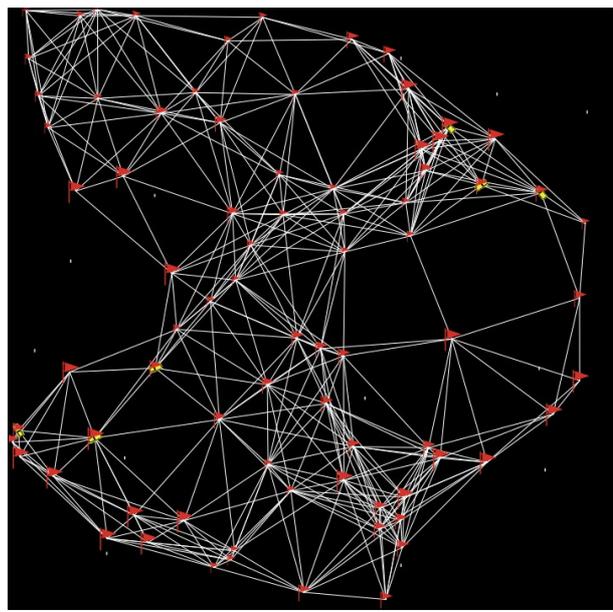


Illustration 64 : capture d'écran du réseau en point à point (R2).

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Nous avons sélectionné trois niveaux de densité de clients : 3, 6 et 12 ; pour deux quantités de véhicules : 6 et 12. Faisant l'hypothèse (H.2) que 12 clients créés toutes les 50 itérations engendrent une forte densité en fin de simulation (même avec une flotte de 12 véhicules), nous avons exclu les combinaisons avec 12 clients pour 6 véhicules. Cela donnerait rapidement un état de forte saturation des modèles. Nous testons deux facteurs de vitesse entre les clients et les véhicules : 15 et 30. En admettant qu'un piéton se déplace en moyenne à 2 km/h, un facteur de vitesse de 15 équivaut à une vitesse de déplacement des véhicules de 30 km/h (e.g. services de transport collectif en milieu urbain dense). Un facteur de 30 équivaut alors à une vitesse de 60 km/h (e.g. service de transport en milieu périurbain ou urbain peu dense). Enfin, nous avons choisi 3 capacités de véhicules représentatifs des différents services semi-collectifs présentés dans la première partie : 4 places (automobile), 7 places (monospace), 20 places (minibus). Comme le montre l'illustration 65, l'ensemble de ces paramètres combinés aux 6 modèles et aux deux types de réseaux nous donne un total de 360 versions de simulations paramétrées.

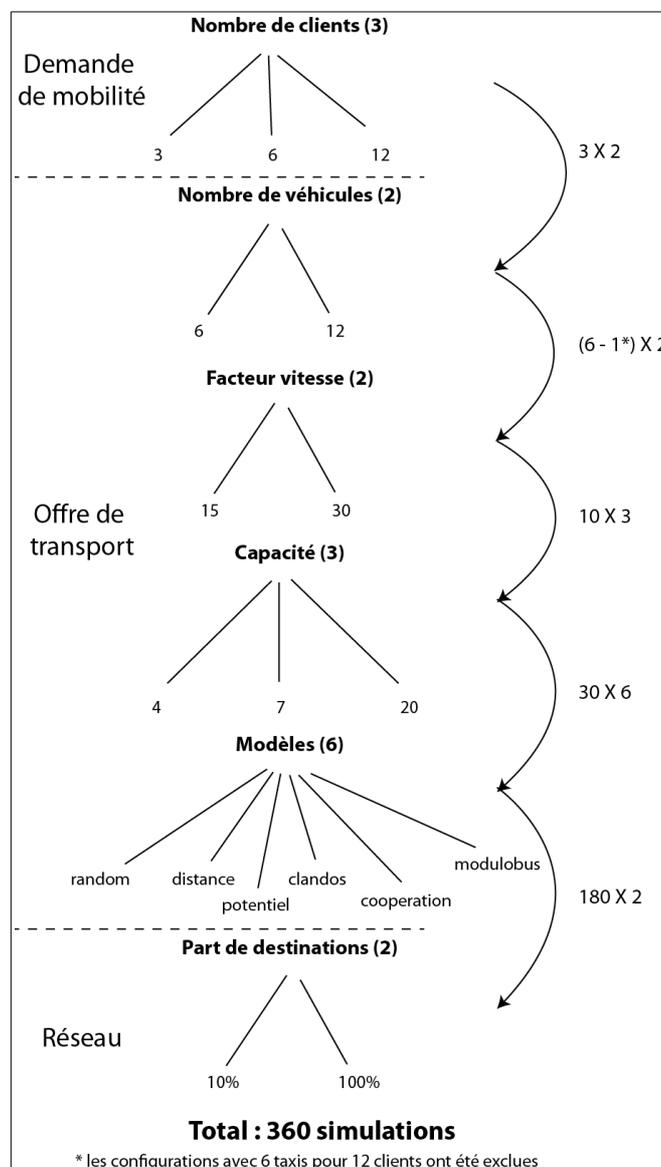


Illustration 65: Arbre de simulation pour l'exploration des modèles

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Le tableau 22 présente le détail des combinaisons pour chacune des versions de simulation.

Simulation	Nb taxis	Nb clients	Facteur vitesse	Capacité d'occupation	Réseau
V1	6	3	15	20	R1
V2	6	3	15	4	R1
V3	6	3	15	7	R1
V4	6	3	30	20	R1
V5	6	3	30	4	R1
V6	6	3	30	7	R1
V7	6	6	15	20	R1
V8	6	6	15	4	R1
V9	6	6	15	7	R1
V10	6	6	30	20	R1
V11	6	6	30	4	R1
V12	6	6	30	7	R1
V13	12	3	15	20	R1
V14	12	3	15	4	R1
V15	12	3	15	7	R1
V16	12	3	30	20	R1
V17	12	3	30	4	R1
V18	12	3	30	7	R1
V19	12	6	15	20	R1
V20	12	6	15	4	R1
V21	12	6	15	7	R1
V22	12	6	30	20	R1
V23	12	6	30	4	R1
V24	12	6	30	7	R1
V25	12	12	15	20	R1
V26	12	12	15	4	R1
V27	12	12	15	7	R1
V28	12	12	30	20	R1
V29	12	12	30	4	R1
V30	12	12	30	7	R1
V31	6	3	15	20	R2
V32	6	3	15	4	R2
V33	6	3	15	7	R2
V34	6	3	30	20	R2
V35	6	3	30	4	R2
V36	6	3	30	7	R2
V37	6	6	15	20	R2
V38	6	6	15	4	R2
V39	6	6	15	7	R2
V40	6	6	30	20	R2
V41	6	6	30	4	R2
V42	6	6	30	7	R2
V43	12	3	15	20	R2
V44	12	3	15	4	R2
V45	12	3	15	7	R2
V46	12	3	30	20	R2
V47	12	3	30	4	R2
V48	12	3	30	7	R2
V49	12	6	15	20	R2
V50	12	6	15	4	R2
V51	12	6	15	7	R2
V52	12	6	30	20	R2
V53	12	6	30	4	R2
V54	12	6	30	7	R2
V55	12	12	15	20	R2
V56	12	12	15	4	R2
V57	12	12	15	7	R2
V58	12	12	30	20	R2
V59	12	12	30	4	R2
V60	12	12	30	7	R2

Tableau 22 : ensemble des versions simulées.

1.2.2 Grille d'analyse des résultats

Notre objectif ici est d'établir une synthèse de toutes les données extraites des simulations pour comparer les performances dans leur globalité. Grâce à une grille d'analyse intégrant les 360 simulations, nous proposons une typologie des services selon les trois approches : client, opérateur et territoire. Pour ce faire, nous analysons les valeurs d'une sélection d'indicateurs clés.

La grille d'analyse est composée de 6 indicateurs. Chaque approche est caractérisée par deux indicateurs :

- approche clients : temps d'attente moyen des clients et nombre moyen de clients en attente ;
- approche opérateur : taux de chargement et voyageurs par kilomètres (VPK) ;
- approche territoire : taux de desserte et part des stations avec des clients en attente.

Pour simplifier l'information et pour dégager de nos analyses des tendances générales, nous avons choisi de discrétiser chaque indicateur en 4 classes. Ce procédé nous permet de transformer les données quantitatives brutes en données qualitatives ordonnées, plus faciles à analyser. Chaque indicateur possède sa propre méthode de discrétisation. Néanmoins les classes sont identiques pour tous les modèles et pour toutes les versions de simulation (les deux types de réseaux confondus). Pour définir les classes, nous nous sommes appuyés sur les nuages de points présentés sur l'illustration 66. Ils représentent la distribution des résultats obtenus au cours de simulation pour chaque indicateur. Nous présentons ci-dessous chacune des discrétisations choisies.

Part des stations avec des clients en attente (%)

On observe sur le nuage de point une répartition relativement homogène des points avec un minimum de 1,28 et un maximum de 92,31. Cela nous permet de découper la série statistique en classe d'amplitude égale de la manière suivante : [0-25[; [25-50[; [50- 75[; [75-100].

Nombre moyen de clients en attente

Pour cet indicateur, on observe une forte concentration des valeurs entre 0,1 et 10, puis une dispersion de plus en plus forte jusqu'à la valeur maximale 299. Nous utilisons alors une progression géométrique avec un facteur 10, ce qui nous donne les classes suivantes : [0,1-1[; [1-10[; [10-100[; [100-1000].

Temps d'attente moyen des clients aux stations

On constate un fort regroupement de valeurs entre le minimum 143 et 2 500. On observe aussi un nombre important de points dans les valeurs hautes (entre 30 000 et 50 000). L'amplitude des valeurs étant importante (49 800), nous proposons de regrouper toutes les valeurs au-dessus de 12 500 au sein d'une même classe grâce à une progression géométrique de facteur 5. D'après nos observations, les valeurs supérieures à 12 500 correspondent généralement à des états de saturation dont les seuils peuvent varier d'un modèle à l'autre. C'est pourquoi nous pensons qu'il est plus intéressant de discrétiser finement les valeurs basses. Cela nous donne la discrétisation suivante : [100-500[; [500-2500[; [2500-12500[; [12500-62500].

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Taux de desserte (%)

On constate un très fort regroupement des valeurs entre 90 et 99,9. On observe aussi quelques valeurs proches du minimum 0,84. En vérifiant, nous avons constaté que ces taux extrêmement faibles correspondent aux 30 simulations du modèle *Clandos* sur le réseau en point à point (R2). Nous considérons que nous sommes en présence d'une anomalie et qu'il n'est pas nécessaire de mettre en avant ces valeurs extrêmes. Nous expliquerons ces résultats dans le paragraphe suivant. Pour définir les classes, nous avons utilisé la méthode des seuils observés : [0-70[; [70-90[; [90-95[; [95-100].

Taux de chargement

La plupart des valeurs sont regroupées entre un minimum à 2,41 et 30. Ici aussi, les valeurs au-delà de 30 sont une particularité du modèle *Clandos*. Nous utilisons la méthode des seuils observés pour garder de la précision au niveau des valeurs basses : [0-5[; [5-15[; [15-30[; [30-90].

Rentabilité du service

En analysant chacune des bases de données extraites, on constate que les valeurs du modèle *Clandos* sont encore une fois très différentes des 5 autres modèles. Sur le nuage de point, cela se traduit par une très forte concentration de points entre le minimum 0,06 et 2,5 et la présence de quelques points entre 5 et 23. Nous proposons alors de discrétiser la série selon la méthode des seuils observés avec les classes suivantes : [0-0,1[; [0,1-0,5[; [0,5-2,5[; [2,5-25].

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

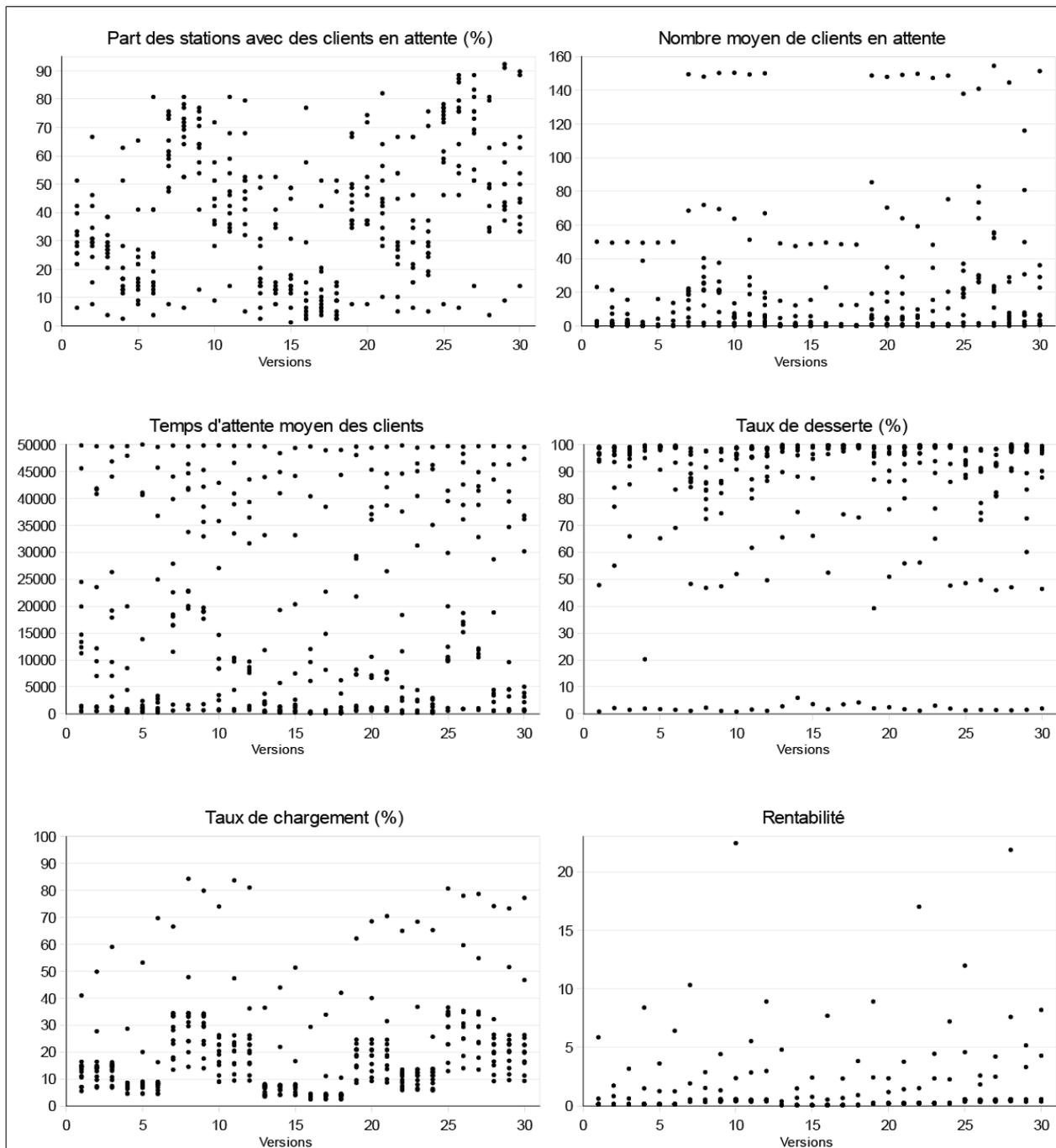


Illustration 66: Distribution des valeurs pour chaque indicateur, tous modèles confondus (*dot plot*)

La discrétisation de chaque indicateur en quatre classes nous permet de travailler ensuite à partir de données qualitatives ordinales. Nous pouvons alors identifier les "très mauvais" (gris clair), les "mauvais", les "bons" et les "très bons" (noir) résultats pour chaque indicateur (cf. tableau 23). Pour les trois premiers indicateurs, de faibles valeurs correspondent à de bons résultats. Ils signifient qu'il y a peu de clients en attente, qu'ils attendent peu et que la desserte du territoire est relativement homogène. C'est l'inverse pour les trois autres indicateurs (taux de desserte, taux de chargement et VPK).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Clients		Territoire		Opérateur	
Temps d'attente moyen des clients	Nombre moyen de clients en attente	Part des stations avec des clients en attente	Taux de desserte	Taux de chargement	Rentabilité
12500-62500	100-1000	75-100	95-100	30-90	2,5-25
2500-12500	10-100	50-75	90-95	15-30	0,5-2,5
500-2500	1-10	25-50	70-90	5-15	0,1-0,5
100-500	0,1-1	0-25	0-70	0-5	0-0,1

Tableau 23 : présentations des classes et caractérisation des résultats.

À partir de cette classification, nous avons attribué des scores pour chaque indicateur et pour chaque version de simulation. Ces scores varient de 1 (très mauvais résultat) à 4 (très bons résultats) et nous disposons d'un tableau de scores pour chaque modèle et pour chaque réseau (cf. tableau 24).

Versions de simulation	Temps d'attente moyen des clients	Nombre moyen de clients en attente	Part des stations avec des clients en attente	Taux de desserte	Taux de chargement	Rentabilité
V1	1	3	3	4	2	2
V2	1	3	3	3	2	2
V3	1	3	3	4	2	2
V4	2	4	4	4	2	2
V5	3	4	3	4	2	2
V6	2	4	3	4	2	2
V7	1	2	2	3	3	3
V8	1	2	2	2	3	2
V9	1	2	2	2	3	3
V10	1	3	3	4	3	3
V11	1	2	3	2	3	2
V12	1	2	3	3	3	3
V13	3	4	4	4	2	1
V14	3	4	4	4	2	1
V15	3	4	4	4	2	1
V16	4	4	4	4	1	1
V17	4	4	4	4	1	1
V18	4	4	4	4	1	1
V19	1	3	3	4	2	2
V20	1	2	3	3	3	2
V21	1	2	3	3	3	2
V22	2	3	3	4	2	2
V23	1	3	3	3	2	2
V24	2	3	3	4	2	2
V25	1	2	2	3	3	3
V26	1	2	2	2	3	2
V27	1	2	2	2	3	2
V28	1	3	3	4	3	3
V29	1	2	3	2	3	3
V30	1	2	3	3	3	3

Tableau 24 : exemple d'attribution des scores pour le modèle *Random* (réseau R1).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Nous avons ensuite fait la somme de ces scores pour chaque approche en distinguant toujours les deux types de réseaux. Comme le montre le tableau 25, nous avons calculé le pourcentage des scores obtenus dans chaque simulation par rapport au score maximum possible (toutes approches confondues). Pour illustrer le calcul, prenons pour exemple les scores obtenus pour la version 1 de simulation (cf. tableau 25). Le maximum de scores possibles étant $8+8+8=24$, et les scores obtenus pour cette version étant $7+5+4=16$, cela nous donne une part de 67 %.

Versions de simulation	Territoire	Client	Opérateur	Total %
V1	7	5	4	67
V2	6	5	4	63
V3	7	5	4	67
V4	8	7	4	79
V5	8	7	4	79
V6	7	7	4	75
V7	5	4	6	63
V8	4	3	5	50
V9	4	3	6	54
V10	7	5	6	75
V11	5	3	5	54
V12	6	3	6	63
V13	8	7	3	75
V14	8	7	3	75
V15	8	7	3	75
V16	8	8	2	75
V17	8	8	2	75
V18	8	8	2	75
V19	7	5	4	67
V20	6	3	5	58
V21	6	4	5	63
V22	7	6	4	71
V23	6	4	4	58
V24	7	6	4	71
V25	5	4	6	63
V26	4	3	5	50
V27	4	3	5	50
V28	7	5	6	75
V29	5	3	6	58
V30	6	3	6	63
Tot brut	192	151	133	Moyenne
Tot %	80	62,92	55,42	66,11

Tableau 25 : synthèse des scores obtenus pour le modèle *Random* (réseau R1).

À partir de ces tableaux, nous avons calculé la moyenne des scores obtenus pour toutes les versions de simulation (les trois approches confondues). Ces pourcentages nous permettent de comparer les performances globales de chaque modèle (cf. 1.3.1). Nous avons ensuite calculé le pourcentage des scores obtenus pour chaque approche, nous permettant ainsi d'établir une typologie des modèles (cf. 1.3.2). Puis nous avons regroupé les versions de simulation en fonction des trois paramètres suivants : le rapport entre le nombre de véhicules et le nombre de clients créés, le facteur de vitesse entre les clients et les véhicules et la capacité des véhicules. Ce

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

procédé nous permet d'analyser l'influence de chaque paramètre sur les performances des modèles (cf. 1.3.3).

1.3 Résultats

1.3.1 Comparaison des performances générales

À partir des scores, nous proposons dans un premier temps une synthèse des résultats obtenus pour chaque indicateur et pour les deux types de réseau : R1 et R2. Les diagrammes nous permettent de visualiser le pourcentage de scores obtenus sur les trente versions de simulation (par réseau). Afin d'évaluer la fiabilité des observations, nous avons calculé les intervalles de confiance (IC 95%) de chaque score. L'IC permet de visualiser la zone d'incertitude de chacune des valeurs. Nous considérons que les scores ont 95 % de chance d'être contenus dans leur intervalle respectif. Par conséquent, nous considérons que chacun des scores est plus ou moins exact dans l'intervalle considéré. Par exemple, si nous obtenons un score de 81 % avec un intervalle de confiance compris entre 80 % et 82 %, nous admettons que la vraie valeur n'est pas exactement 81 %, mais qu'elle est comprise entre 80 % et 82 %. Lorsque nous comparons les performances des modèles, nous devons donc distinguer trois cas de figure. Dans le cas où deux intervalles de confiance se superposent, nous admettons que la distinction est incertaine. Lorsque les deux intervalles se chevauchent, nous considérons que la différence observée est relativement fiable d'autant plus si la zone d'incertitude commune est réduite. Enfin, si les deux intervalles sont complètement distincts, alors la comparaison est tout à fait pertinente.

Performances observées sur le réseau aléatoire en convergence R1 (cf. illustration 67)

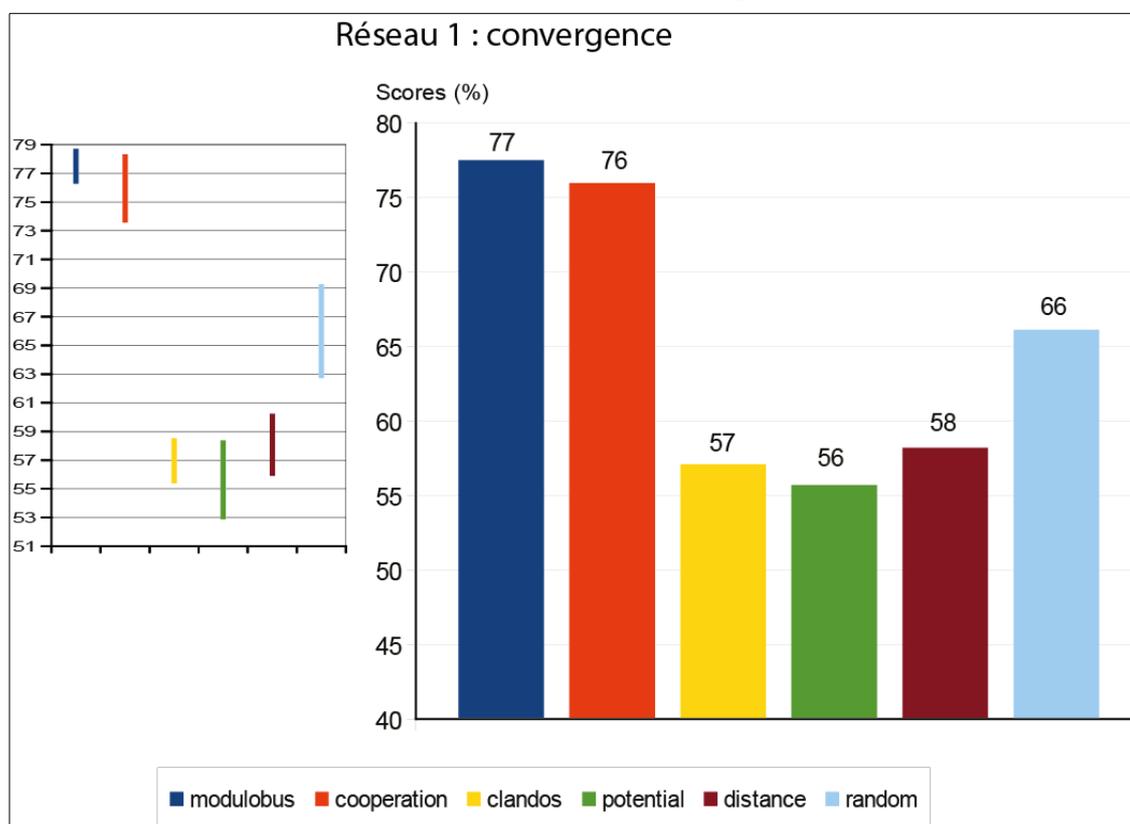


Illustration 67: Intervalles de confiance et performances générales pour le réseau en convergence (R1)

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Tout d'abord, on constate que les modèles *Modulobus* et *Cooperation* présentent les meilleurs scores. Ils affichent des performances très proches avec un écart de 1 % seulement. Leurs intervalles de confiance étant superposés, il ne nous semble pas pertinent à ce stade de les départager.

À l'opposé, nous observons que les modèles *Clandos* et *Potential* affichent les plus mauvaises performances. Ils sont eux aussi très proches et difficiles à comparer. Il n'est pas étonnant de trouver le modèle *Clandos* dans le bas du classement car son mode de fonctionnement est très différent des 5 autres modèles. C'est en effet le seul modèle qui ne circule pas en continu tout au long de la simulation. En revanche, nous sommes étonnés des faibles résultats obtenus par le modèle *Potential*, surtout en comparaison avec les deux autres modèles *Random* et *Distance*. Le modèle *Potential* fait en effet intervenir des agents plus sophistiqués puisque les véhicules peuvent évaluer l'attractivité des stations.

A contrario, le modèle *Random* est le plus simplifié des trois puisque les véhicules se déplacent toujours aléatoirement de station en station. Il arrive pourtant en troisième position du classement, largement au-dessus du modèle *Distance* et *Potential*. Est-ce que cela est dû au fait que les stations du réseau ont été disposées aléatoirement et/ou que les clients apparaissent également aléatoirement ? Nous essayerons de répondre à ces questions dans une seconde étape.

Performances observées sur le réseau aléatoire en point à point R2 (cf. illustration 68)

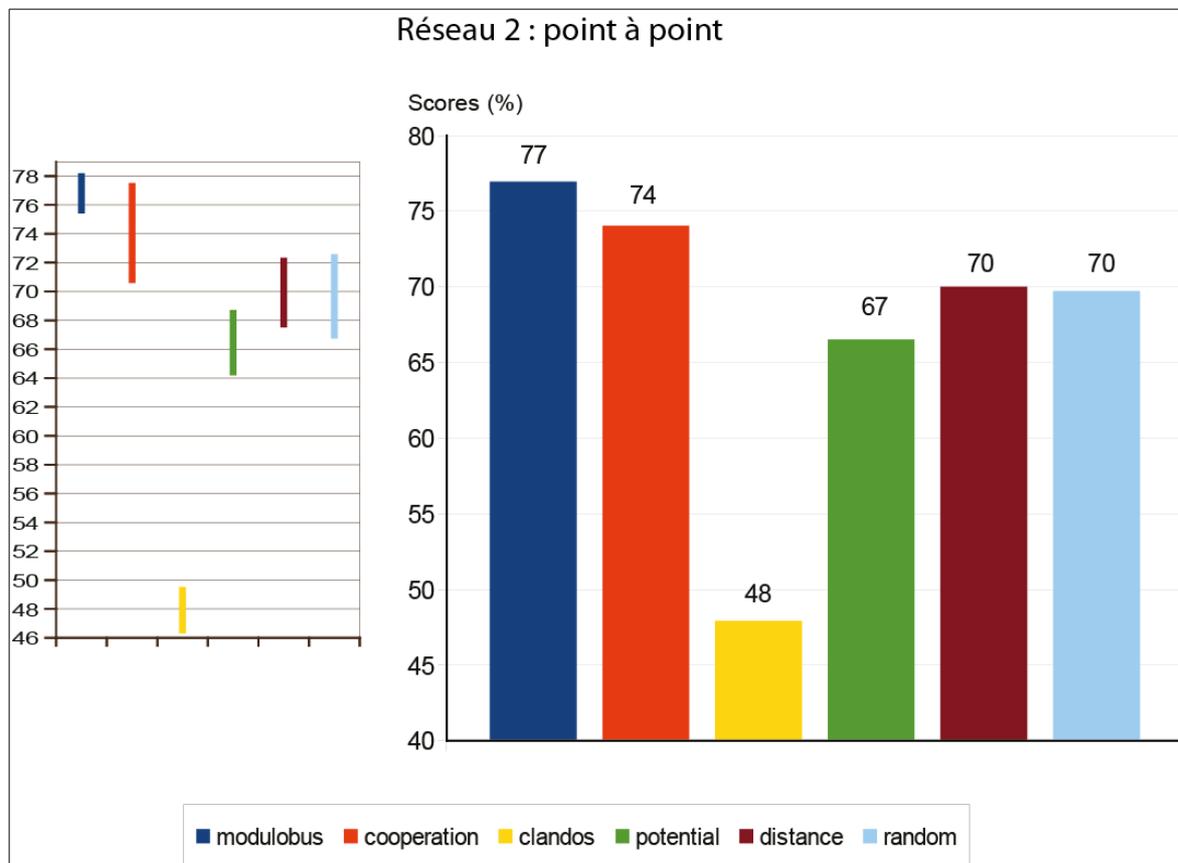


Illustration 68 : intervalles de confiance et performances générales pour le réseau en convergence (R2).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

La première chose qui ressort sur l'illustration 68 c'est la très faible performance du modèle *Clandos*, surtout comparé aux 5 autres modèles (20 à 30 % d'écart). Vraisemblablement, l'attente des clients aux stations nuit aux performances générales du système, certainement à cause de la faible capacité d'exploration et d'adaptation des véhicules. La part des scores obtenus est encore plus faible que sur le réseau en convergence avec une perte de 10 % environ. Le réseau en point à point constitue une contrainte assez forte pour ce modèle. Avant de partir, les véhicules attendent toujours de trouver un minimum de clients avec une destination commune. Or, le réseau en point à point démultiplie le nombre de destinations possibles et réduit la chance de trouver des clients avec une même destination.

Les modèles *Modulobus* et *Cooperation* se situent toujours en tête du classement. Les bonnes performances de ces deux modèles nous montrent que les capacités de communication et de *Cooperation* de leurs agents respectifs permettent une certaine optimisation du système. Dans ce cas, les deux modèles peuvent être départagés. On constate que la performance du *Modulobus* est proche de celle observée sur le précédent réseau alors que celle du modèle *Cooperation* a été légèrement diminuée. Les intervalles de confiance nous permettent d'affirmer que le modèle coopératif est un peu moins performant que le *Modulobus* sur le réseau en point à point.

On constate enfin que les performances des modèles *Potential* et *Distance* sont largement améliorées avec le réseau R2. On observe des résultats très proches entre ces deux modèles et le modèle *Random*. Au vu des IC, il n'est pas possible de départager le modèle *Random* et *Distance*. En revanche, le modèle *Potential* apparaît une fois de plus comme le moins performant des trois. Visiblement, la desserte des stations les plus attractives n'est pas suffisante pour rendre efficace l'optimisation du système dans ces conditions de simulations.

1.3.2 Typologie des modèles

À présent, nous proposons d'établir une typologie des services selon les trois approches : opérateur, territoire et clients. Chacune des trois approches est caractérisée par deux indicateurs. Nous présentons deux diagrammes triangulaires : un pour chaque réseau. Leurs axes indiquent le pourcentage de scores obtenus pour chacune des approches. Comme précédemment, nous avons calculé les intervalles de confiance de chaque score pour évaluer la fiabilité des comparaisons. Le détail des IC est disponible en annexe 6.

Typologie observée sur le réseau en convergence R1 (cf. illustration 69)

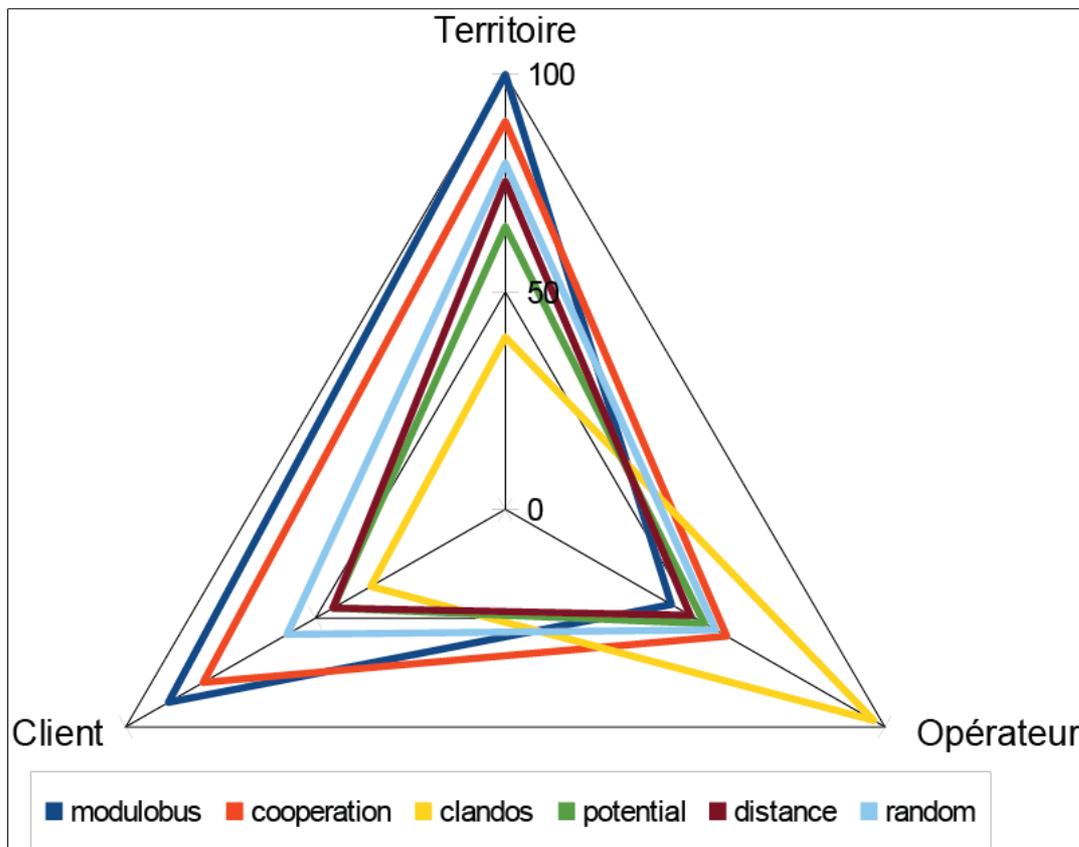


Illustration 69 : comparaison des performances selon les trois approches pour le réseau R1.

L'illustration 69 nous montre qu'une fois de plus le modèle *Clandos* se distingue très largement des 5 autres modèles. Il affiche de très bons résultats concernant l'approche opérateur, par contre les résultats concernant l'approche client et territoire sont plutôt mauvais (en dessous de 50 %). Cela n'est pas surprenant puisque, dans ce modèle, les véhicules explorent assez peu l'espace et ils ne cherchent pas vraiment à s'adapter à la demande de mobilité. Ils sont très rentables, car ils ne se déplacent jamais à vide.

À l'opposé, le modèle *Modulobus* affiche les meilleurs résultats dans l'approche client et territoire. Cela nous montre que l'interaction entre les clients et les véhicules est utile pour améliorer la qualité de service. En revanche, il est étonnant de constater que c'est le modèle le moins performant dans l'approche opérateur. Cette information est tout à fait fiable au vu des intervalles de confiance. La communication véhicules-clients permet donc une bonne desserte, mais ne semble pas très rentable pour le service de transport. Elle induit en effet une augmentation significative des détours.

Le modèle *Cooperation* apparaît comme le modèle le plus équilibré. Il se situe en deuxième position pour chacune des approches. Les IC nous montrent que ce modèle peut être distingué des autres sans risque d'erreur. Il sera intéressant de voir par la suite si ce modèle est réellement équilibré dans toutes les conditions de simulations et pourquoi.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Viennent ensuite les modèles *Random*, *Distance* et *Potential*. Ils sont assez proches des précédents du point de vue de l'opérateur, mais bien moins performants concernant l'approche client (e.g. 20 % d'écart entre *Random* et *Cooperation*). Les IC entre les trois modèles ne nous permettent pas vraiment de les départager bien que le modèle *Random* se démarque légèrement.

Typologie observée sur le réseau en point à point R2 (cf. illustration 70)

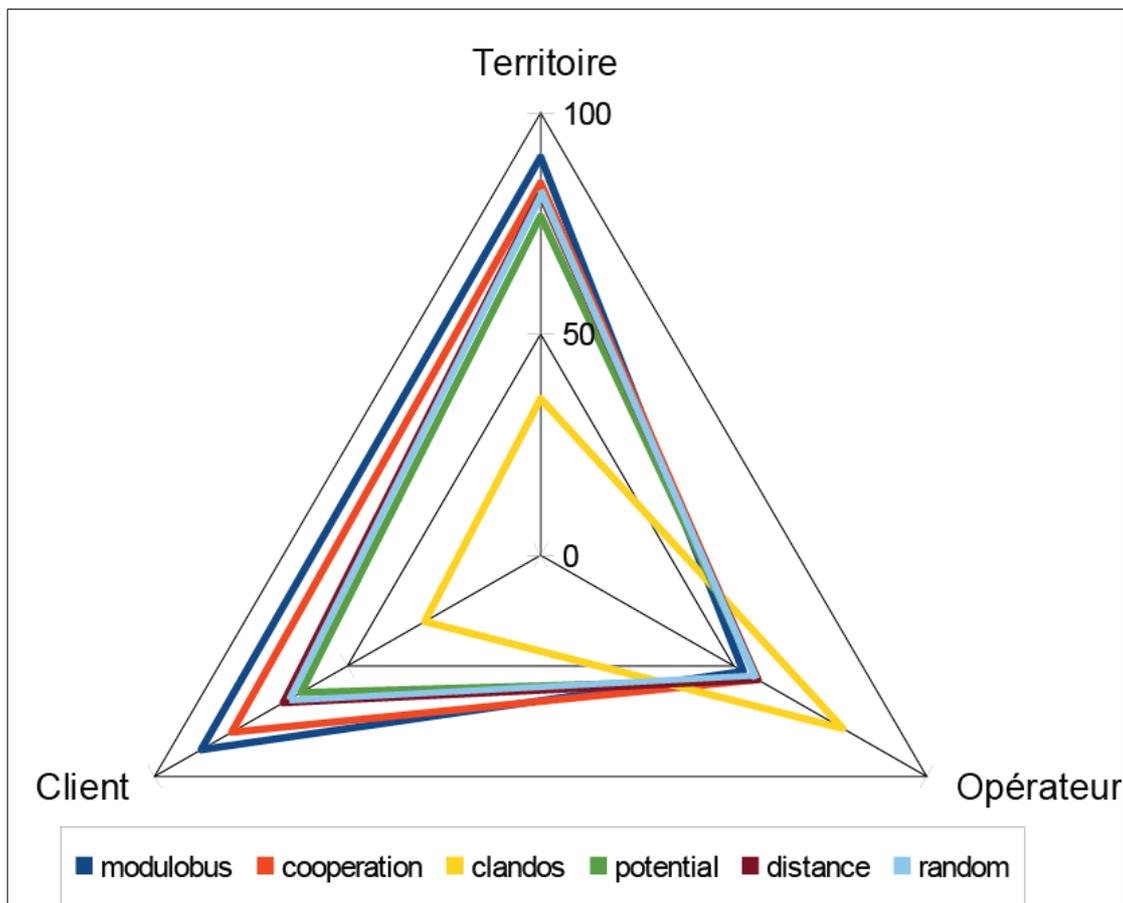


Illustration 70 : comparaison des performances selon trois approches pour le réseau R2.

Avec le réseau R2, les résultats sont relativement proches, ce qui nous permet de confirmer la typologie des modèles. On notera comme différence une légère baisse des performances du *Modulobus* pour l'approche territoire, ainsi qu'une baisse significative des performances du modèle *Clandos* pour l'approche opérateur. On passe en effet de 97 % à 78 % des scores obtenus. Ce constat coïncide avec les éléments présentés précédemment et il nous amène à penser qu'il n'est pas pertinent de simuler le modèle *Clandos* sur des réseaux en point à point.

On notera aussi que sur le réseau R2 les performances concernant l'approche opérateur ont globalement diminué pour tous les modèles. Si la desserte en point à point ne semble pas particulièrement avantageuse pour les clients, elle semble en tout cas contraindre la rentabilité des services. *A priori*, sur ce type de réseau les véhicules explorent davantage les stations, donc ils augmentent leur distance de parcours, ce qui fait mécaniquement baisser l'indicateur de rentabilité.

1.3.3 Exploration de l'espace des paramètres

Dans cette section, nous ne distinguons plus les deux types de réseau. Les performances présentées sont une moyenne des scores obtenus sur chacun des réseaux pour les 30 versions de simulation. Nous nous focalisons sur l'influence des différents paramètres sur les performances générales des modèles. Pour cela, nous avons regroupé les simulations et calculé les scores obtenus selon les trois paramètres suivants : la vitesse de déplacement des véhicules, leur capacité d'occupation et le facteur entre le nombre de clients créés périodiquement et le nombre de véhicules simulés. Pour chaque valeur, nous avons une fois de plus calculé les intervalles de confiance, disponibles en annexe.

Vitesse de déplacement des véhicules (cf illustration 71)

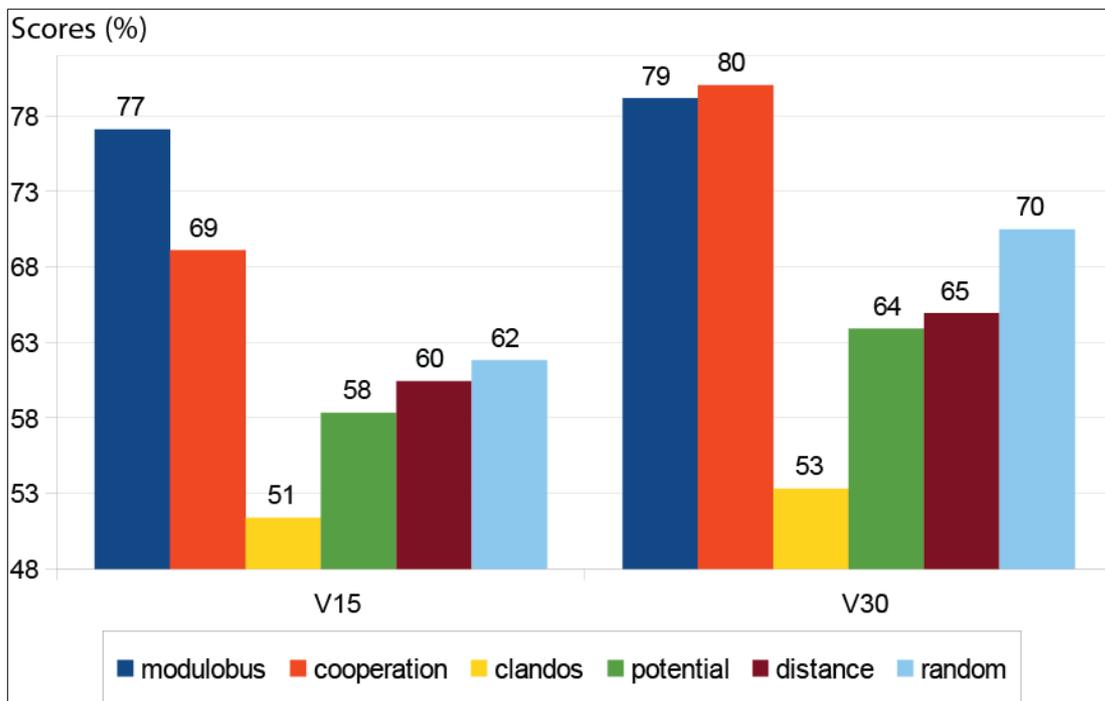


Illustration 71 : comparaison des scores selon la vitesse de déplacement des véhicules (e.g. V15 signifie que les véhicules se déplacent 15 fois plus rapidement que les piétons).

Les modèles *Modulobus* et *Clandos* semblent être peu affectés par le changement de vitesse. Les différences de performances ne sont pas significatives au vu des intervalles de confiance. Ce résultat n'est pas étonnant concernant le modèle *Clandos* puisque la spécificité des agents est de rouler seulement lorsque la course est rentable. Pendant leurs tournées, ils explorent très peu l'espace comme le montre l'illustration 73. Le changement de vitesse des véhicules leur permet donc d'atteindre plus rapidement leur destination mais ne les aide pas à trouver plus de clients sur la route. Concernant le *Modulobus*, l'illustration 72 nous montre que les véhicules explorent plutôt bien le réseau. La vitesse de déplacement des véhicules devrait donc avoir une influence sur les performances du service. Notre hypothèse est que le fait d'augmenter la vitesse de déplacement permet certes de desservir plus de stations au cours d'une simulation, mais cela nuit aussi à la rencontre avec les clients. En effet, lorsque les clients reçoivent l'itinéraire *via* le *push*,

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

il leur faut un temps minimum de marche pour atteindre la station cible. Or, si les véhicules roulent trop vite, les clients peuvent arriver en retard à la station et manquer le passage du véhicule. Il est donc possible que le *Modulobus* nécessite un équilibre entre ces deux principes, autrement dit une vitesse de déplacement optimale.

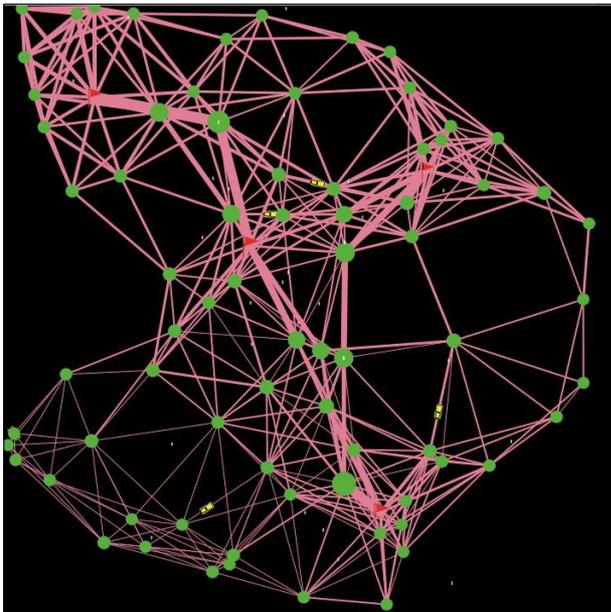


Illustration 72 : version 4 de simulation avec le modèle *Modulobus*.

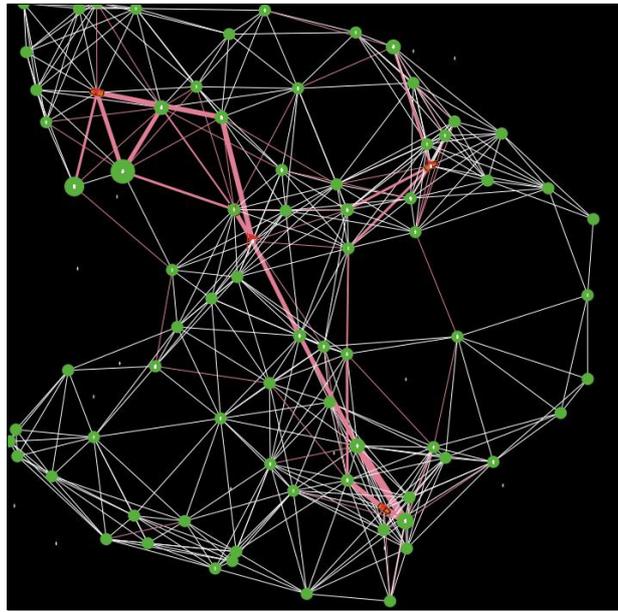


Illustration 73 : version 4 de simulation avec le modèle *Clandos*.

Paramètres : nb clients : 3 ; nb véhicules : 6 ; facteur vitesse : 30 ; capacité : 20.
(L'épaisseur des axes en rose est proportionnelle à la fréquence de passages des véhicules)

L'augmentation de la vitesse semble améliorer les performances des modèles *Potential* et *Distance*. Cette information est fiable au vu des IC qui sont bien distincts. Toutefois, cette légère amélioration montre la faible capacité d'exploration des véhicules avec ces deux modèles. Comme le montre les illustrations 74 et 75, les véhicules répètent leurs itinéraires soit autour des stations les plus attractives (*Potential*) soit sur les axes les plus courts (*Distance*). Le fait d'augmenter la vitesse leur permet donc de passer plus rapidement d'une station à l'autre, ce qui est avantageux avec une forte densité de clients. En revanche, cela ne va pas vraiment les aider à desservir d'autres stations.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

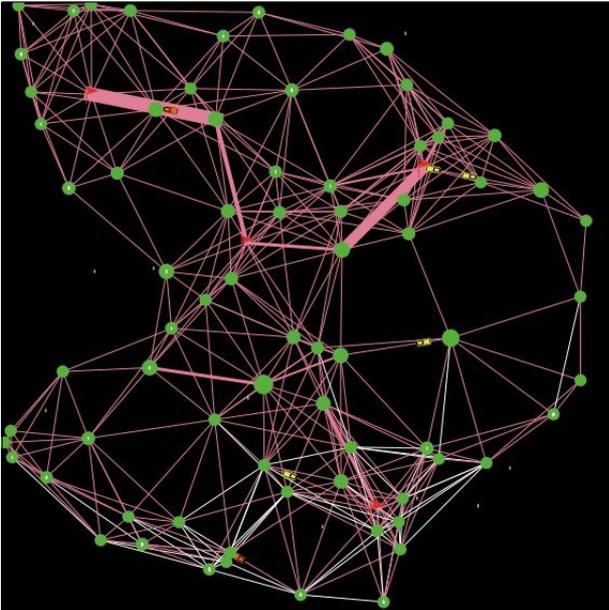


Illustration 74 : version 4 de simulation avec le modèle *Potential*.

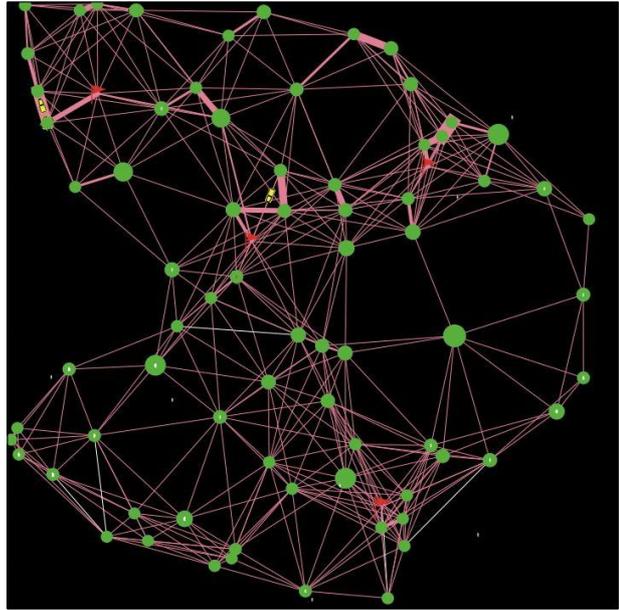


Illustration 75 : version 4 de simulation avec le modèle *Distance*.

A contrario, on constate pour le modèle *Cooperation* et *Random* une amélioration significative des performances (de l'ordre de + 10 %). Les véhicules peuvent desservir plus de stations durant la simulation et cela est bénéfique pour leur performance. Il n'est pas étonnant de voir que ces deux modèles réagissent de la même manière à la variation de ce paramètre. En effet, avec le modèle *Cooperation*, lorsqu'aucune station n'est marquée, les véhicules se comportent exactement comme ceux du modèle *Random*.

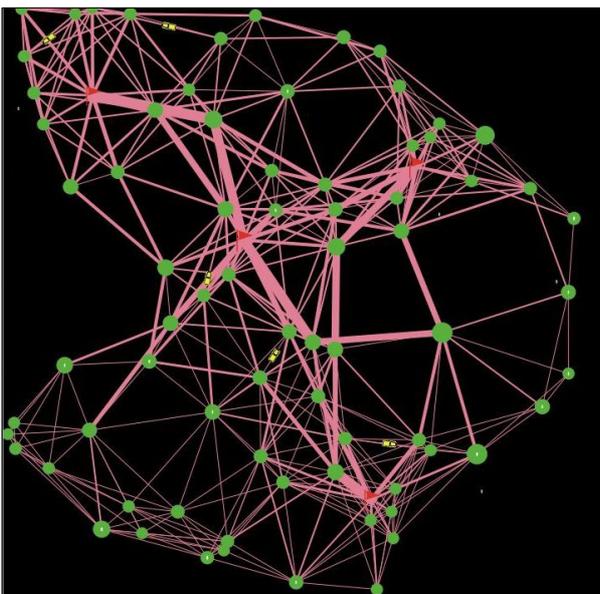


Illustration 76 : version 4 de simulation avec le modèle *Cooperation*.

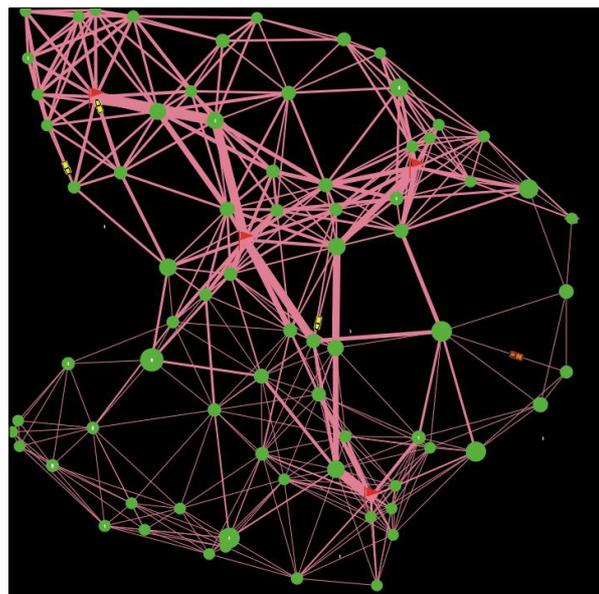


Illustration 77 : version 4 de simulation avec le modèle *Random*.

Capacité d'occupation des véhicules (cf illustration 78)

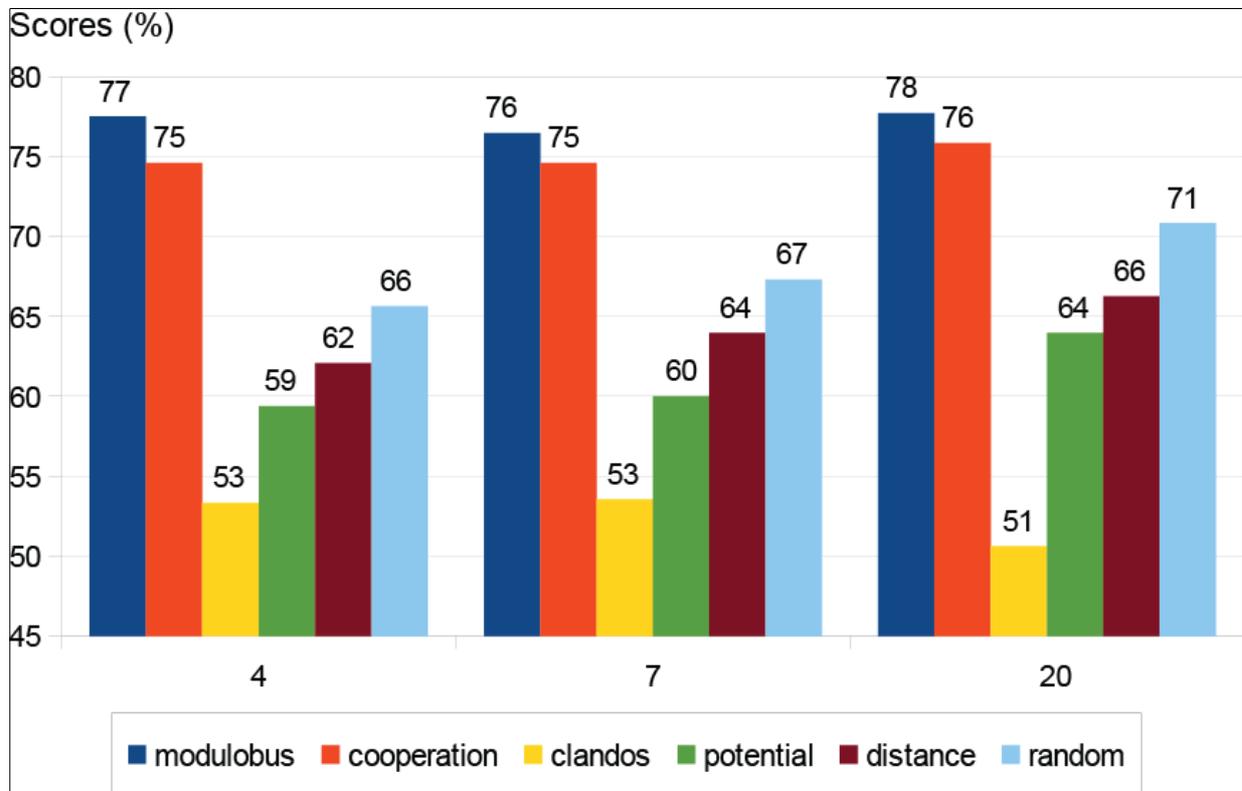


Illustration 78 : comparaison des scores selon la capacité d'occupation des véhicules (4, 7 et 20 places).

Dans l'ensemble, la capacité des véhicules ne semble pas avoir beaucoup d'influence sur les performances des modèles. Pour *Modulobus*, *Cooperation* et *Clandos*, l'augmentation de la capacité des véhicules n'a pas permis d'améliorer leurs performances. Pour le modèle *Clandos*, on observe même une légère baisse (validée par les intervalles de confiance). Cela s'explique par le fait que les véhicules cherchent à atteindre un taux de remplissage de 50 % minimum avant de partir. Or pour 20 places disponibles, il faut vraiment une très forte densité de clients pour trouver 10 clients ayant la même destination, surtout dans une situation de desserte en point à point (cf. illustration 78).

On observe une certaine amélioration pour les trois autres modèles. Au vu des IC cette amélioration n'est pas vraiment significative entre des véhicules de 4 et 7 places. En revanche, les véhicules avec 20 places ont permis d'améliorer les performances et notamment pour le modèle *Random*.

Indirectement, ce résultat montre que les modèles *Cooperation* et *Modulobus*, malgré leurs bonnes performances générales, remplissent assez peu leurs véhicules au cours des simulations. Visiblement, ils sont relativement peu efficaces pour regrouper de manière importante les clients sur des itinéraires communs. Par exemple, les illustrations 79 et 80 permettent de comparer le taux d'occupation de deux véhicules sélectionnés au hasard pour le modèle *Cooperation* et *Random* respectivement. Les conditions de simulation choisies sont : 12 véhicules pour 12

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

clients, un facteur vitesse de 15 (faible vitesse), une capacité de 20 places, avec le réseau en aléatoire en convergence (R1). On observe à droite des taux de remplissage élevés un peu plus fréquents que sur l'image de gauche. Il apparaît que les modèles *Cooperation* et *Modulobus* effectuent très peu de déplacements à vide (ce qui expliquerait les bons résultats), mais exécutent assez peu de tournées avec des taux d'occupation importants.

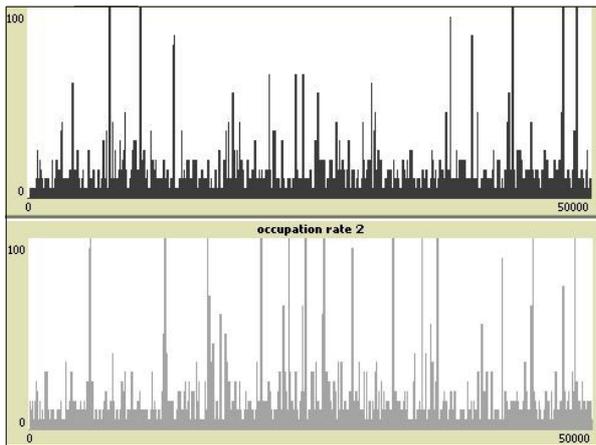


Illustration 79 : évolution du taux d'occupation (%) au cours de la simulation pour 2 véhicules (modèle *Cooperation* ; Version 25).

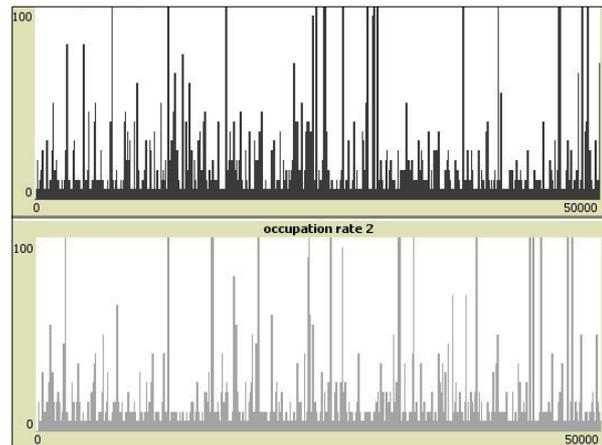


Illustration 80 : évolution du taux d'occupation (%) au cours de la simulation pour 2 véhicules (modèle *Random* ; Version 25).

Facteur entre le nombre de clients et de véhicule (cf illustration 81)

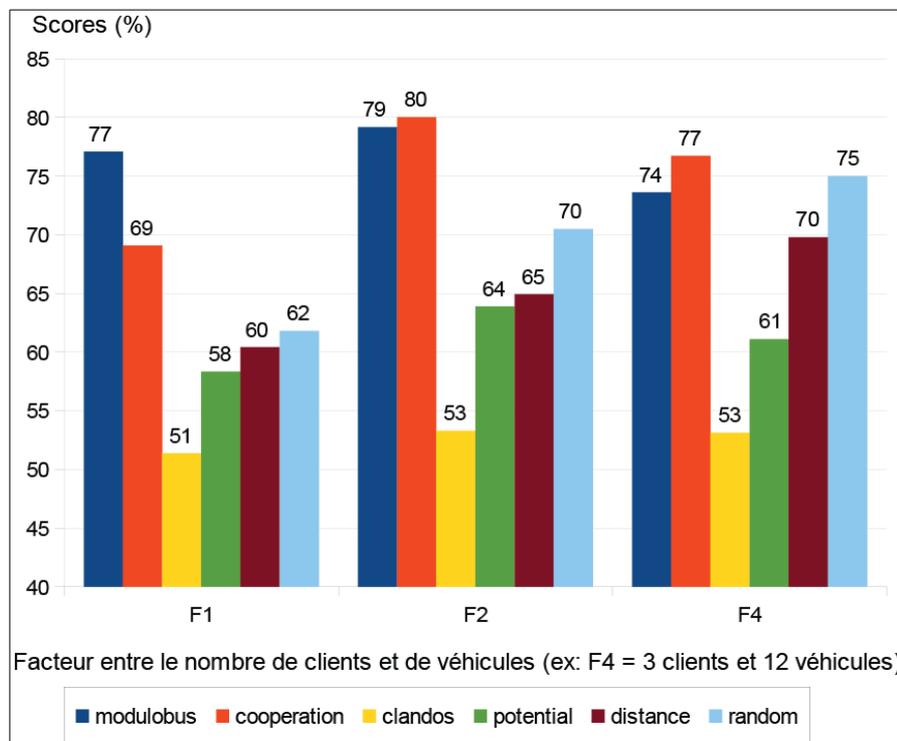


Illustration 81 : comparaison des scores selon la proportion de clients et de véhicules.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Nous analysons ici la capacité des modèles de monter en charge. Nous avons identifié trois facteurs qui correspondent aux combinaisons suivantes :

- F1 : 6 clients / 6 véhicules ou 12 clients / 12 véhicules (forte densité) ;
- F2 : 6 clients / 12 véhicules ou 3 clients / 6 véhicules (densité moyenne) ;
- F4 : 3 clients / 12 véhicules (faible densité).

Une fois de plus les performances du modèle *Clandos* sont faibles et elles évoluent peu selon les trois niveaux de densité. Cette observation nous laisse penser que ce modèle nécessite en réalité des densités de clients encore plus faibles que celles testées dans les 60 versions de simulation (paradoxal par rapport à la réalité de mise en œuvre).

Les modèles *Cooperation*, *Potential* et *Modulobus* semblent présenter des conditions de fonctionnement optimales avec une densité moyenne. Cela rejoint notre hypothèse H.2 selon laquelle les conditions de fonctionnement des modèles sont bornées par des cas de forte et de faible densité. On constate que les écarts de performance entre les trois niveaux sont beaucoup plus importants avec le modèle *Cooperation*. On observe par exemple une chute considérable des performances en forte densité (- 10 %). Ce modèle semble donc être assez sensible aux variations de densité de clients. Le modèle *Modulobus* est, quant à lui, le seul à présenter de meilleures performances en forte densité et ces écarts sont faibles au vu des intervalles de confiance (stabilité face à la montée en charge). En revanche, les deux autres modèles présentent des performances qui décroissent de manière quasi linéaire au fur et à mesure que la densité augmente.

1.4 Synthèse

Avant de débiter une deuxième phase de simulation, nous proposons ici une première synthèse des résultats, en revenant sur nos hypothèses et leur validation éventuelle. Nous caractérisons ensuite chacun des modèles et nous identifions leurs conditions de fonctionnement.

1.4.1 Retour sur les hypothèses

H.1 : Comme nous le pensions, la plupart des modèles présentent des baisses de performances avec de fortes densités de clients. Le modèle *Clandos* semble même nécessiter des densités plus faibles que celles qui ont été testées ici. En revanche, les modèles ne semblent pas tous strictement bornés par des niveaux de faible et de forte densité. Par exemple, le modèle *Modulobus* ne semble pas avoir atteint de seuil de saturation avec ces conditions de simulation. Il nous semble intéressant de tester des densités plus élevées pour la prochaine étape de simulation.

H.2 : Excepté le modèle *Clandos* qui se distingue sur de nombreux points, tous les modèles peuvent être simulés et comparés sur l'espace des paramètres sélectionnés. Il semble même intéressant de tester des conditions de plus forte densité pour *Modulobus* et de plus faible densité pour *Cooperation*.

1.4.2 Typologie des services

Au vu de cette première phase de simulation, nous pouvons regrouper les différents modèles testés en 4 types de service :

1. *Modulobus* correspond à un service performant et tourné vers la qualité de service. Il semble à l'aise aussi bien sur des réseaux en convergence qu'en point à point. En revanche, ce n'est pas un service particulièrement rentable. Il est intéressant de noter que cela correspond bien au prototype présenté dans le projet ANR du même nom. Pourtant nous n'avons modélisé ici qu'une petite partie de son fonctionnement. Le service semble à l'aise en forte ou en faible densité, la vitesse de déplacement et la capacité des véhicules n'ayant peu d'influence sur ses performances. Il présente ainsi les conditions de fonctionnement les plus étendues, qui couvrent toutes les combinaisons testées dans cette première phase ;
2. *Cooperation* est le service le plus polyvalent. Il présente de bons résultats à la fois dans les trois approches et sur les deux types de réseau. En revanche, il n'excelle dans aucun des domaines. Ce modèle ne permet pas un bon regroupement des clients sur des tournées communes. Sa force est plutôt sa capacité d'exploration. Il perd en efficacité lorsque la densité est forte, mais demeure efficace en situation de faible densité. Nous pouvons faire l'analogie avec les opérateurs de taxis légaux de Dakar qui malgré leurs prix relativement élevés offrent une bonne qualité de service, ont une bonne capacité d'adaptation et bien sûr sont rentables ;
3. *Clandos* correspond à un service porté sur la "rentabilité" opérateur exclusivement. Il présente de faibles capacités d'adaptation et surtout il ne semble pas adapté aux réseaux en point à point. L'analogie avec des services de transport réels n'est pas évidente car même si tous les transports informels sont portés vers la rentabilité, cela ne veut pas dire pour autant qu'ils soient très rémunérateurs. De plus, les taxis clandestins tels que nous les avons décrits dans la première partie ont cet avantage de pouvoir s'adapter facilement et spontanément aux contraintes urbaines et à la demande de mobilité (c'est d'ailleurs la force de la plupart des systèmes informels). Or ce n'est visiblement pas le cas pour notre modèle, sûrement parce que l'interaction entre les clients et les chauffeurs de véhicules est très simplifiée. Le *Clandos* présente les conditions de fonctionnement les plus restreintes. Il nécessite un réseau en convergence (peu de destinations possibles), une densité de clients peu élevée et des véhicules de capacité intermédiaire ;
4. Les modèles *Random*, *Distance* et *Potential* correspondent à des services globalement peu performants. Leur point fort, notamment pour le modèle *Random*, est la capacité d'exploration du réseau. Ils semblent d'ailleurs plus à l'aise sur des réseaux en point à point qu'en convergence. Ils sont sensibles à la variation de la densité de clients. L'augmentation de la vitesse des véhicules et de leurs capacités améliore légèrement les performances. Là aussi, il nous est difficile d'établir une comparaison avec des services réels. Nous pensons qu'ils représentent plutôt des comportements ponctuels que peuvent avoir les chauffeurs de transport artisanaux en France et au Sénégal. Les trois modèles se ressemblent beaucoup sur la totalité des critères et le modèle *Random* se situe toujours au-dessus des autres en termes de performances.

Sur l'ensemble des modèles, on a pu constater que l'augmentation de la vitesse et de la capacité des véhicules avait une très faible influence sur les performances. Ces paramètres ne

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

sont donc pas déterminants dans leur fonctionnement. Pour plus de simplicité, nous les fixerons respectivement à 15 (faible vitesse) et 20 (minibus) pour la suite des simulations. En revanche, nous avons pu vérifier que la densité de clients jouait un rôle important sur le fonctionnement des modèles. Pour la deuxième phase, nous proposons de fixer le nombre de véhicules à 12 et de faire varier la densité sur 6 niveaux pour analyser plus en détails le fonctionnement des modèles.

Chapitre 2. Analyses de variabilité et caractérisation des modèles

Après avoir comparé les performances des modèles dans un cadre général, nous proposons d'analyser le fonctionnement des modèles dans leur variabilité. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux trois modèles *Modulobus*, *Cooperation* et *Clandos*. Au vu des premiers résultats, ils apparaissent comme les modèles les plus typés et les plus intéressants du point de vue de leur fonctionnement. Nous proposons tout d'abord d'évaluer la variabilité des modèles en les simulant de manière itérative avec des conditions de simulation identiques (20 simulations par modèle). Nous cherchons ensuite à comprendre l'influence que peut avoir la forme des réseaux sur le fonctionnement des différents modèles (6 réseaux testés). Nous étudions ensuite la capacité de montée en charge des trois services en les soumettant à 6 niveaux de densité de clients. Comme le montre l'illustration 82, nous analysons dans ce chapitre un total de 66 simulations. En guise de synthèse, nous proposons une typologie comparative et nous présentons les caractéristiques clés de chacun des modèles avec le protocole ODD (Grimm et al. 2006; Grimm et al. 2010).

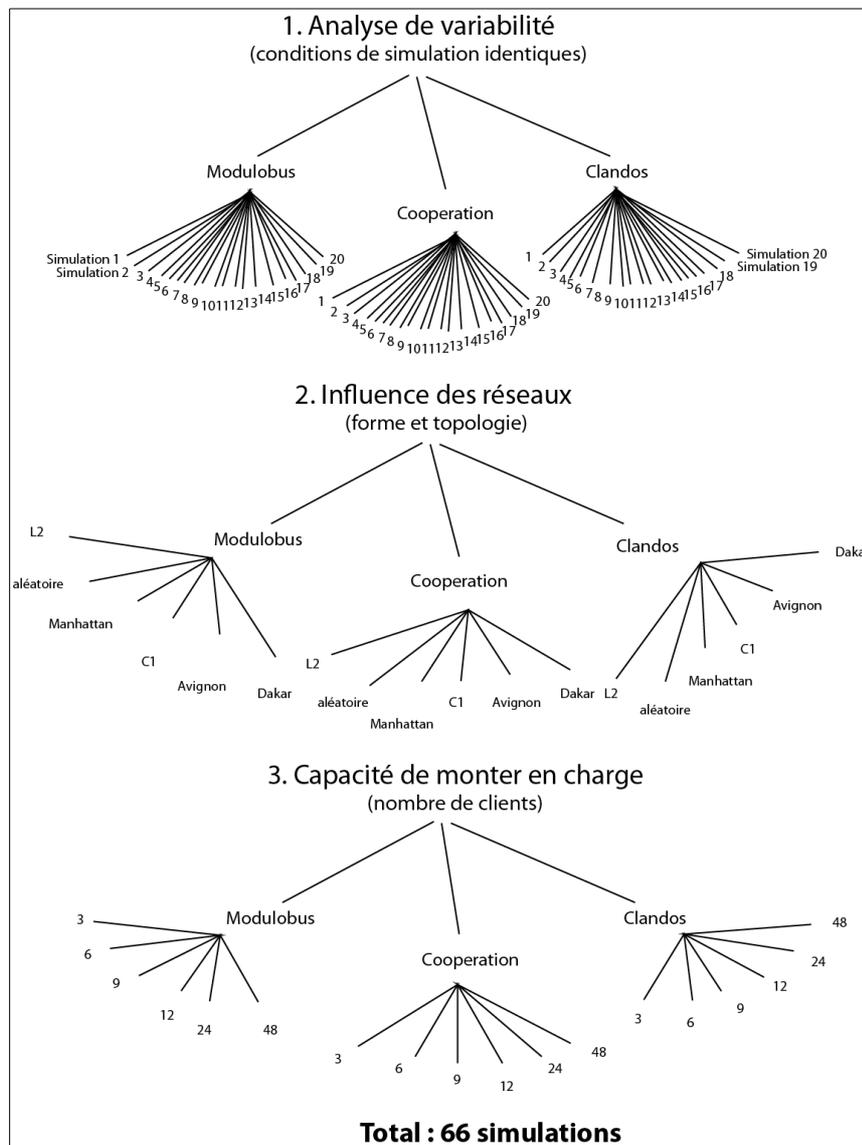


Illustration 82 : arbre de simulations (phase 2).

2.1 Variabilité des modèles

2.1.1 Problème posé

Postulat

Nous admettons que la variabilité des résultats est plus importante en faible densité de clients plutôt qu'en forte. Le principe d'auto-renforcement des systèmes joue un rôle majeur dans le déroulement des simulations. Ainsi, plus le nombre d'agents augmente, plus le temps de simulation est important, et plus les résultats vont tendre vers l'espérance mathématique.

Hypothèses

H.3 : Dans des conditions de simulation identiques, les résultats de chaque indicateur varient assez peu d'une simulation à l'autre (pour un même modèle). Autrement dit, chaque résultat obtenu au cours d'une simulation est significatif et représentatif du fonctionnement des modèles.

H.4 : Néanmoins, la variabilité des résultats n'est pas strictement identique d'un modèle à l'autre. Leur stabilité dépend du comportement des agents et de la part de procédures aléatoires dans les algorithmes.

Objectifs

Nos objectifs de simulation sont les suivants :

- Évaluer la variabilité des résultats pour chaque indicateur et pour chaque modèle.
- Analyser et comparer la stabilité des trois types de transport modélisés.

2.1.2 Méthodologie

Pour évaluer la variabilité des simulations, nous avons simulé chacun des 3 modèles 20 fois avec des paramètres fixes et identiques pour les 60 simulations. Comme le montre le tableau 26, la plupart des paramètres sont identiques à ceux utilisés précédemment. Pour pouvoir analyser les plus fortes variations possibles, nous avons simulé, selon notre premier postulat (cf. Chapitre 1.1.1), un cas de faible densité : 3 clients créés toutes les 50 itérations. Pour chaque simulation, nous avons exporté une capture d'écran, ainsi que le détail des variables et des indicateurs. À partir des tableaux de données, nous avons calculé le coefficient de variation (CV) pour chaque indicateur. Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type à la moyenne exprimé en pourcentage. Plus la valeur du CV est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande. Il nous permet de comparer la distribution des valeurs de nos indicateurs dont les échelles de mesure sont difficilement comparables.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Catégories	Paramètres	Valeurs
Temps (discret en nombre d'itérations)	Temps de simulation	100 000
	Fréquence de création des clients	50
Espace	Forme	aléatoire
	Nombre de stations	80
	Part de destinations	10 % (convergence)
	Taille du territoire	700*700 pixels
Offre de transport	Nombre de véhicules	12
	Capacité des véhicules	20
	Facteur vitesse	15
Demande de mobilité	Nombre de clients	3
	Distance de marche maximale	50
	Rayon d'attractivité des stations	18

Tableau 26 : conditions de simulation pour analyser la variabilité des modèles.

2.1.3 Résultats

L'illustration 83 nous présente les 6 indicateurs que nous allons analyser tout au long de cette partie, avec leur abréviation et leur code couleur. Les formules de calcul des indicateurs ont été expliquées dans la partie 2 (cf. Partie 2, Chapitre 3.4). Ils sont classés selon les trois approches : clients, territoire et opérateur.

Clients		Territoire		Opérateur	
temps d'attente moyen des clients	nombre moyen de clients en attente aux stations	proportion de stations avec des clients en attente	taux de desserte	taux de chargement	voyageurs par kilomètre
■ TAC	■ CA	■ tSCA	■ tD	■ tC	■ VPK

Illustration 83 : légende des indicateurs.

L'illustration 84 nous permet de comparer sur un même diagramme les coefficients de variation des indicateurs, pour chaque modèle.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

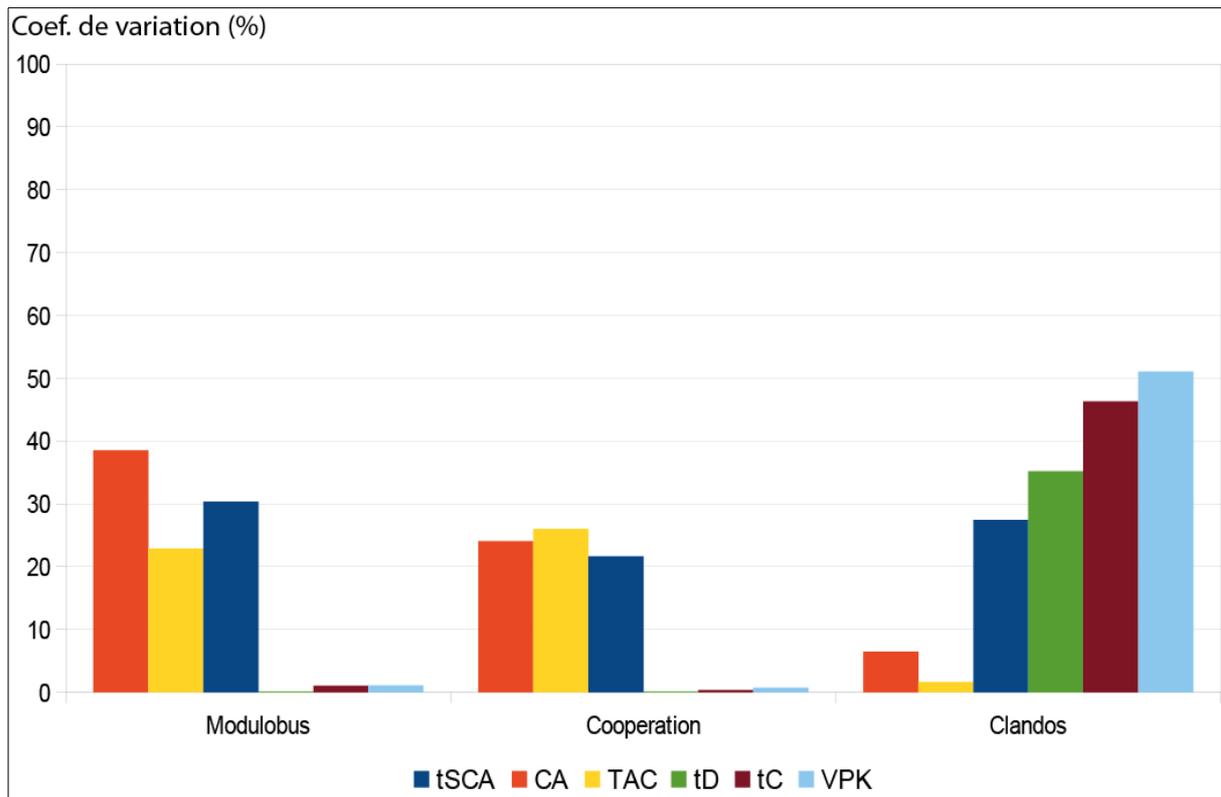


Illustration 84 : coefficients de variation des résultats obtenus au cours des 20 simulations.

On constate tout d'abord que la majorité des indicateurs se situe en dessous de 30 % avec 8 indicateurs sur 18 inférieurs à 10 % de variation. Seuls deux indicateurs sont compris entre 40 et 50 % (ce qui constitue une variation relativement importante). Cela concerne le VPK et le taux de chargement pour le modèle *Clandos*.

Les modèles *Modulobus* et *Cooperation* présentent des résultats très proches avec trois indicateurs stables (< 5 % de variation) : le VPK, le taux de desserte et le taux de chargement. Les trois autres indicateurs varient relativement peu. Si nous analysons les résultats selon les trois approches, on constate que les indicateurs concernant l'opérateur sont tous deux stables. Les deux indicateurs concernant les clients présentent les variations les plus importantes. Concernant l'approche par le territoire, on observe une certaine différence entre les deux indicateurs : le taux de desserte est très stable alors que la part de stations avec des clients en attente présente 20 et 30 % de variation.

La logique est inversée avec le modèle *Clandos* puisque les plus fortes variations concernent l'approche opérateur et les plus faibles concernent les clients. C'est le modèle le moins stable. Cela s'explique par le nombre de tournées exécutées, notamment en faible densité.

2.1.4 Synthèse

Au vu de ces résultats, nous pouvons valider nos hypothèses H.3 et H.4. Globalement, les modèles présentent des coefficients de variation faibles et cette conclusion est fiable au vu des

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

intervalles de confiance (cf. tableau 27). Les résultats acquis dans nos simulations sont donc fiables et représentatifs de leur fonctionnement. On constate néanmoins de légères différences selon les indicateurs. Nous pouvons donc identifier ceux étant les plus stables et donc les plus significatifs pour nos analyses.

Modèles	Intervalles de confiance	Part des stations avec des clients en attente	Nombre moyen de clients en attente	Temps d'attente moyen des clients	Taux de desserte	Taux de chargement	Rentabilité
Clandos	IC min	39,05	27,49	47254,16	10,83	12,2	3,4
	IC max	49,77	29,11	47937,74	14,8	18,48	5,39
Cooperation	IC min	10,83	0,15	510,28	99,27	4,07	0,08
	IC max	13,1	0,18	641,52	99,37	4,08	0,08
Modulobus	IC min	6,62	0,07	560,12	98,98	3,27	0,08
	IC max	8,65	0,1	684,98	99,1	3,3	0,08

Tableau 27 : intervalles de confiance obtenus pour 20 simulations identiques.

Le modèle *Clandos* présente des variations un peu plus importantes. Ces résultats nous montrent qu'en faible densité, le modèle est relativement sensible à l'aléa. Cela est compréhensible dans la mesure où les véhicules s'arrêtent à la première station avec des clients en attente et ne la quittent qu'une fois le taux de remplissage minimum atteint. Ils sont donc soumis à la difficulté de trouver un nombre satisfaisant de clients ayant une destination commune. En faible densité, le nombre de tournées et la fréquentation des stations sont faibles. Les résultats dépendent alors du choix des stations à desservir et du besoin de déplacement des clients, tous deux aléatoires.

2.2 Influence des réseaux

Dans cette section, nous analysons précisément l'influence des réseaux sur le fonctionnement des modèles. N'ayant simulé qu'un réseau dans la première phase de simulation, nous n'avons pu conclure quant à l'influence de sa forme sur les performances des modèles. Néanmoins, nous avons remarqué que selon les cas, les résultats sont meilleurs avec un réseau en convergence ou en point à point. Il existe donc une relation entre le type de desserte et le comportement des agents. On a notamment constaté que les performances du modèle *Clandos* sont mauvaises sur le réseau en point à point. Ce modèle n'est en effet pas adapté à ce type de configuration. Ainsi, tous les réseaux simulés dans cette première phase fonctionnent en convergence.

2.2.1 Problème posé

Postulat

Dans les simulations suivantes, les véhicules se déplacent à la même vitesse sur le réseau et les calculs de distance sont strictement identiques pour tous les réseaux et toutes les simulations. Nous analysons donc l'influence de la forme, uniquement, sur le fonctionnement des modèles, à partir de quelques réseaux typiques.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Hypothèses

H.5 : Nous faisons l'hypothèse que les modèles ne sont pas restreints à une certaine forme ou topologie des réseaux. Autrement dit, le réseau ne constitue pas un facteur limitant dans le déroulement des simulations.

H.6 : Néanmoins, nous pensons que les réseaux ont une certaine influence sur les résultats de simulation. Par leurs caractéristiques, ils vont améliorer ou dégrader l'efficacité de la desserte. Il nous semble donc possible d'identifier les réseaux les plus contraignants ou les plus efficaces pour chacun des modèles.

Objectifs

Nos objectifs de simulation sont doubles :

- Évaluer la stabilité des modèles en les simulant sur 6 réseaux de forme et de topologie différentes.
- Rechercher les réseaux les mieux adaptés aux différents modèles.

2.2.2 Méthodologie

Pour cette étude, nous avons simulé chacun des 3 modèles sur 6 types de réseaux. Quatre d'entre eux sont entièrement théoriques et deux autres sont inspirés de la réalité. Comme le montre le tableau 28, nous simulons cette fois-ci un niveau de densité intermédiaire, avec 6 clients créés toutes les 50 itérations. Le reste des paramètres est identique aux simulations précédentes. Pour analyser la variabilité des résultats, nous avons là aussi calculé les coefficients de variation pour chaque indicateur.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Catégories	Paramètres	Valeurs
Temps (discret en nombre d'itérations)	Temps de simulation	100 000
	Fréquence de création des clients	50
Espace	Forme	L2 ; aléatoire ; Manhattan ; étoile ; Avignon ; Dakar
	Nombre de stations	80 à 100
	Part de destinations	10 % (convergence)
	Taille du territoire	700*700 pixels
Offre de transport	Nombre de véhicules	12
	Capacité des véhicules	20
	Facteur vitesse	15
Demande de mobilité	Nombre de clients	6
	Distance de marche maximale	50
	Rayon d'attractivité des stations	18

Tableau 28 : conditions de simulation pour analyser l'influence des réseaux.

Le premier réseau théorique est un graphe aléatoire complet et non planaire³⁴ (de norme L2). Les stations ont été disposées dans l'espace aléatoirement puis chacune d'entre elles a été reliée à l'ensemble des stations. Le déplacement des véhicules d'une station à l'autre est donc calculé en distance euclidienne (cf. illustration 85). Ce réseau simule l'accès le plus direct entre les stations. Le second réseau théorique est celui simulé dans la première phase de simulation. Les stations ont été réparties de manière aléatoire et connectées selon une distance maximale (cf. illustration 86). C'est un réseau non complet et non-planaire.

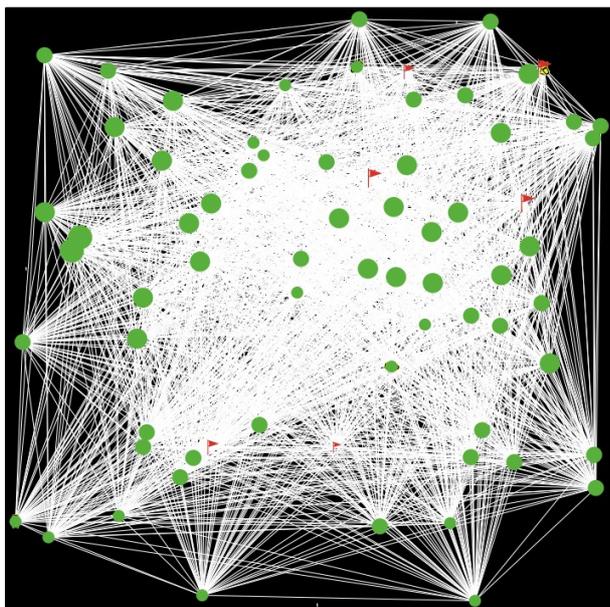


Illustration 85 : réseau L2.

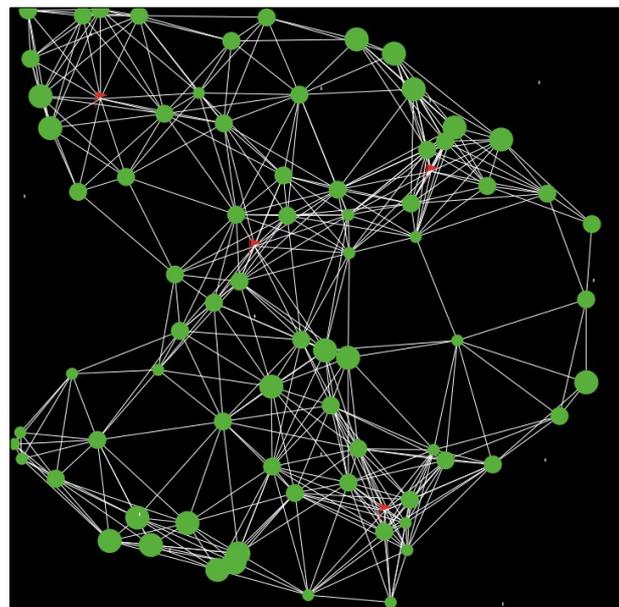


Illustration 86 : réseau aléatoire.

³⁴ Il est possible d'aller de tout nœud en tout nœud de façon directe, par une distance purement euclidienne.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Le troisième réseau est celui dit de Manhattan (norme $L1^{35}$) en référence au maillage des villes nord-américaines. Chaque station (sauf celles situées en bordures) est strictement reliée à quatre autres stations. La distance entre chaque station est identique et les arêtes ont toutes la même longueur (cf. illustration 87). C'est un réseau non complet mais cette fois-ci planaire, i.e. à chaque croisement d'arêtes, il existe un nœud (une station). Le quatrième réseau est construit à partir du modèle de Manhattan, mais cette fois-ci les stations sont toutes reliées aux 8 stations voisines de contiguïté 1. Cela forme un réseau en étoile qui est non-planaire et dont la métrique se situe entre les normes $L1$ et $L2$ (cf. illustration 88), puisqu'il est possible de rejoindre certains nœuds « à vol d'oiseau ».

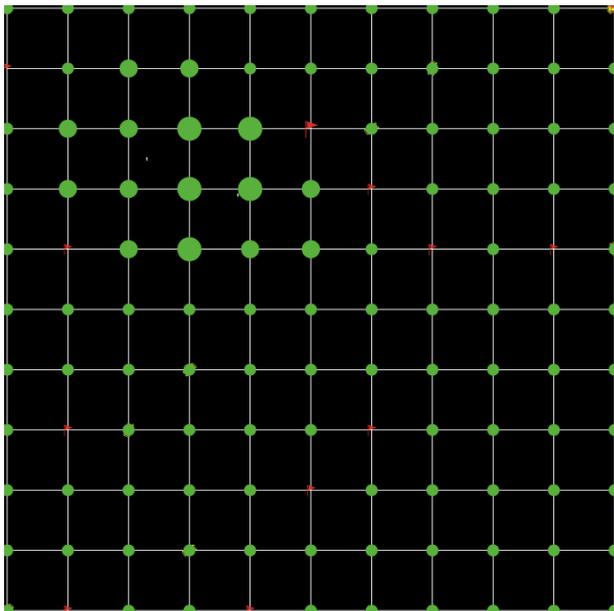


Illustration 87 : réseau de Manhattan.

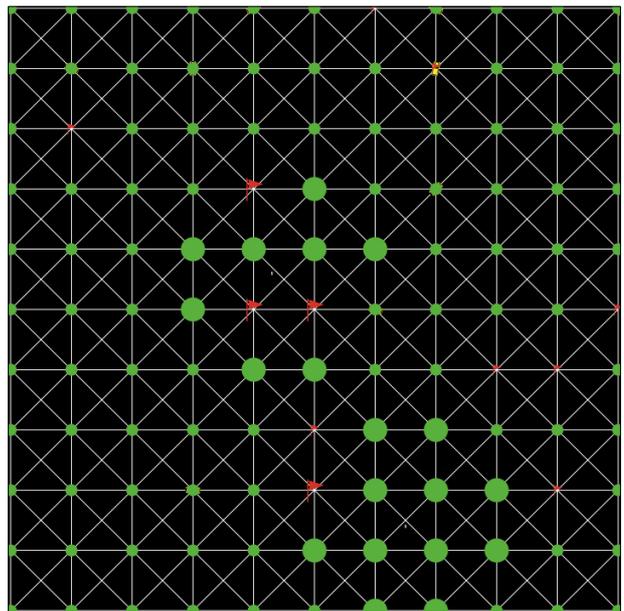


Illustration 88 : réseau en étoile.

Le cinquième réseau est une modélisation du centre-ville d'Avignon (cf. illustration 89). Nous l'avons dessiné en nous appuyant sur une image Google Maps (cf illustration 90). Les impasses ainsi que les routes étroites intra-muros n'ont pas été représentées. Nous avons dessiné le Rhône qui correspond à une surface où les clients ne peuvent apparaître. Le réseau est planaire, i.e. chaque croisement est matérialisé par une station. Nous n'avons donc pas cherché à localiser les arrêts de bus réels. En revanche les destinations correspondent à des générateurs de flux ou à des lieux très fréquentés à Avignon (place principale, gare SNCF, université, etc.). Ce réseau épuré s'arrête au niveau des quartiers périphériques de la ville, juste avant les zones commerciales et les espaces périurbains.

35 Tout nœud relie tout autre nœud par une distance rectilinéaire.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

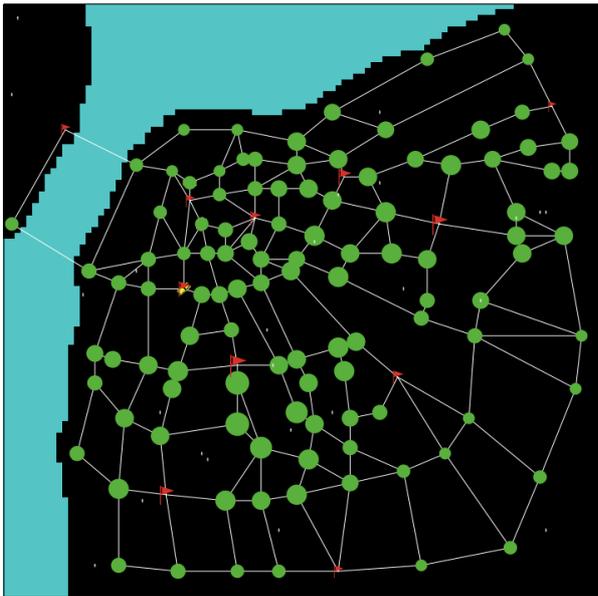


Illustration 89 : réseau d'Avignon.

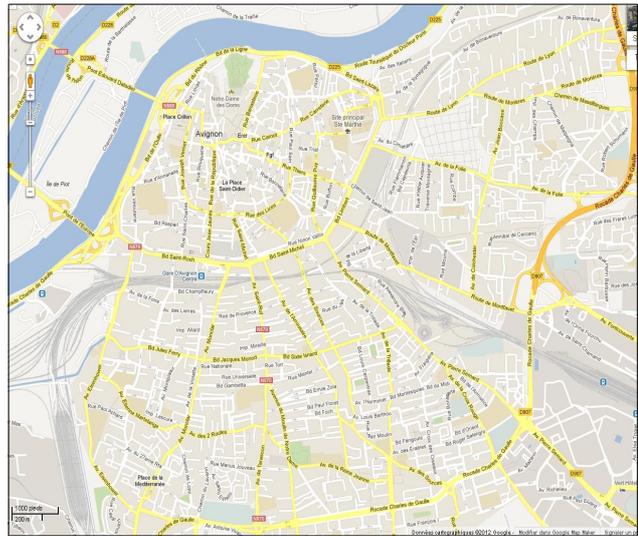


Illustration 90 : plan d'Avignon de référence.

Enfin, le sixième réseau est une modélisation d'une partie de la ville de Dakar et de sa proche banlieue (cf. illustration 91). Nous y avons représenté les arrondissements Parcelles Assainies, Cambéréne, Grand Yoff, Pattes d'oies, Dieuppeul Derklé ; une partie de Yoff, de Hann-bel-air et de Liberté ; ainsi que les communes agglomérées Pikine, Thiaroye et Guediawaye. Comme le précédent réseau, nous nous sommes appuyés sur une image Google Maps (cf illustration 92). Nous avons représenté les principaux axes et la majorité des routes goudronnées. En revanche, nous avons exclu toutes les impasses et toutes les voies en terre qui constituent l'essentiel du maillage en banlieue. Le réseau est également planaire. Nous avons essayé de localiser les principaux générateurs de flux, tout en respectant la proportion de station et de destination des autres réseaux (10 % environ). En plus de l'océan, nous avons représenté en vert foncé la zone humide Deekh Meeh, sur laquelle les clients ne peuvent apparaître.



Illustration 91 : réseau de la banlieue de Dakar.

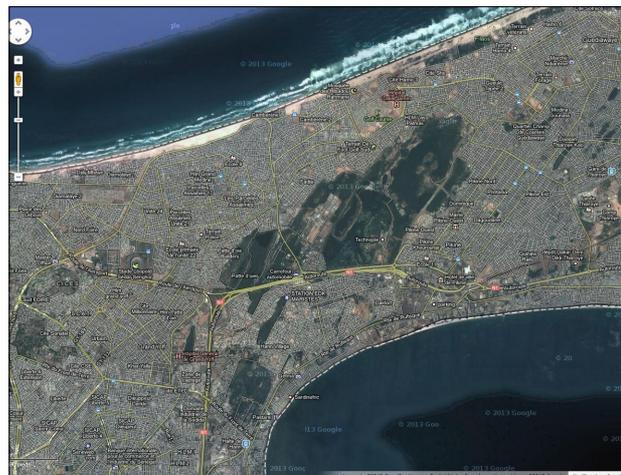


Illustration 92 : plan de référence de la banlieue Dakar.

2.2.3 Résultats

Nous rappelons sur l'illustration 93 les 6 indicateurs analysés, ainsi que leur code couleur qui restera identique sur tous les graphiques.

Clients		Territoire		Opérateur	
temps d'attente moyen des clients	nombre moyen de clients en attente	taux de stations avec des clients en attente	taux de desserte	taux de chargement	voyageurs par kilomètre
■ TAC	■ CA	■ tSCA	■ tD	■ tC	■ VPK

Illustration 93 : légende des indicateurs.

Sensibilité des modèles

Les diagrammes qui suivent nous montrent le détail des coefficients de variation pour chaque indicateur et pour chaque modèle. L'illustration 94 représente la variation des résultats obtenus sur les 6 réseaux. Sur l'illustration 95, a été exclu le réseau complet L2 qui est finalement très irréaliste comparé aux 5 autres et dont la métrique est très différente du fait que les véhicules se déplacent toujours de station en station à vol d'oiseau. Pour analyser l'influence des réseaux, il est important de comparer ces résultats à ceux obtenus précédemment (pour des conditions de simulation identiques).

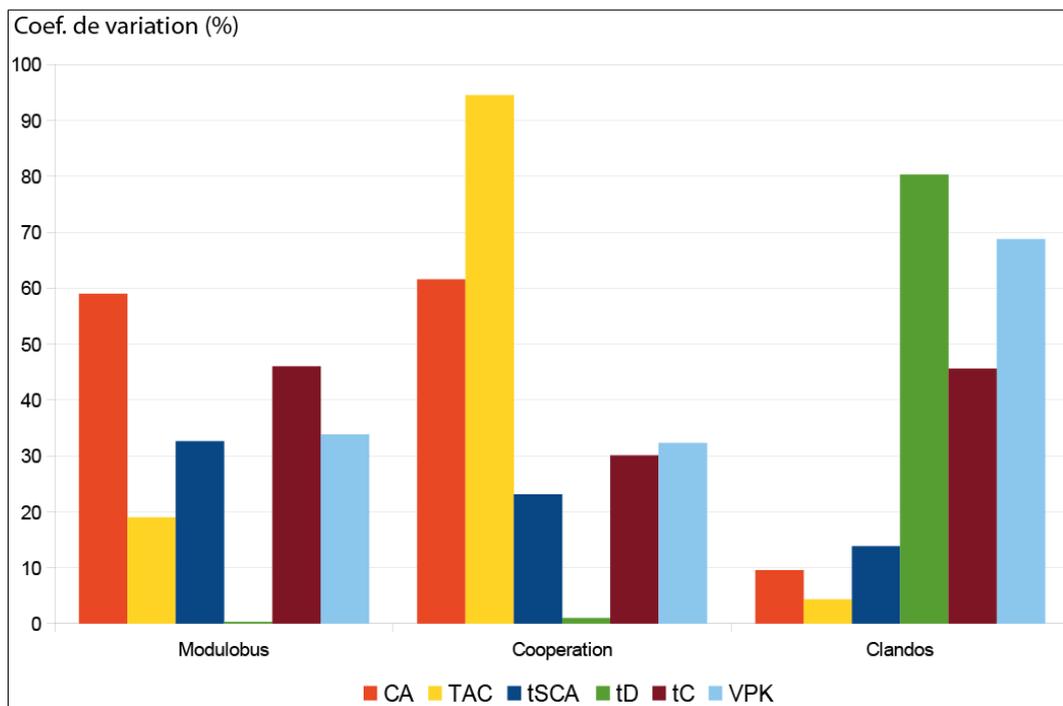


Illustration 94 : coefficient de variation des résultats de simulation.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

On constate sur ce premier graphique que les indicateurs ont un peu plus varié que pour le cas d'étude précédent. Les coefficients de variation sont globalement un peu supérieurs mais il ne sont pas excessifs et on retrouve à peu près la même distribution. Seul 7 indicateurs sur 18 présentent des CV supérieurs à 40 %. Trois d'entre eux concernent le modèle *Clandos* qui, nous le savons, est le moins stable des trois. Ces indicateurs sont le taux de desserte et les deux indicateurs de l'approche opérateur (VPK et taux de chargement).

Pour *Modulobus* et *Cooperation*, les indicateurs les plus sensibles concernent une fois de plus l'approche client (temps d'attente et nombre de clients en attente). On constate toutefois que le VPK et le taux de chargement sont légèrement variables alors qu'ils étaient stables pour les simulations précédentes. Le modèle *Cooperation* est globalement moins stable que le *Modulobus*.

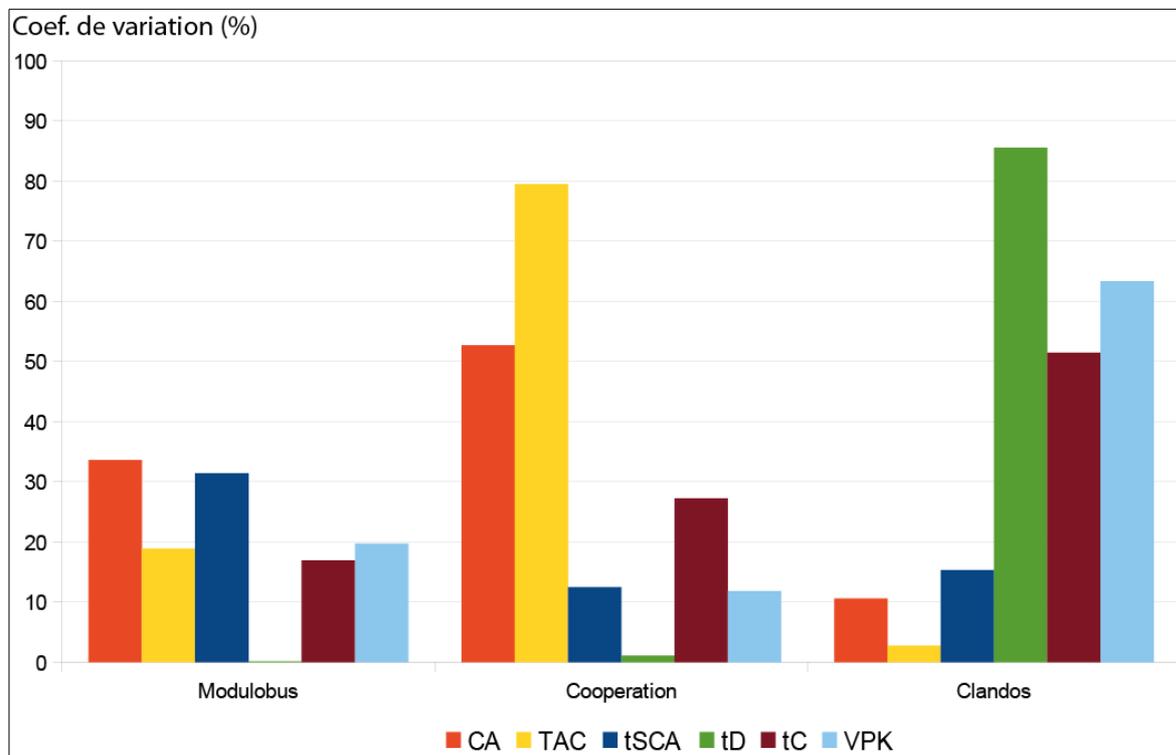


Illustration 95 : coefficient de variation des résultats de simulation (sans le réseau L2).

En écartant le réseau L2, nous constatons que les coefficients de variations chutent. On retrouve à peu près la distribution observée pour les 20 versions de simulations identiques. Les principales différences concernent le temps d'attente des clients pour le modèle *Cooperation* et le taux de desserte pour le modèle *Clandos* qui sont ici très élevés.

Au vu de ces résultats, nous pouvons confirmer notre hypothèse H.5 : même si nous observons des différences importantes pour certains indicateurs, dans l'ensemble les modèles sont assez peu sensibles aux différents types de réseau. La forme des réseaux n'est donc pas un facteur limitant pour nos modèles.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

L'analyse des coefficients de variation ne nous permet pas de dire quels sont les réseaux les plus appropriés aux différents modèles. C'est pourquoi nous proposons d'analyser avec les deux graphiques ci-dessous le détail des résultats pour trois indicateurs. Dans chaque approche, nous avons sélectionné l'indicateur le plus stable (selon l'analyse de sensibilité précédente). Chaque résultat a été normalisé en divisant la valeur par le maximum observé, le tout exprimé en pourcentage. Les résultats concernant le *Modulobus* et *Cooperation* étant assez proches, nous avons représenté sur l'illustration 96 la moyenne des deux modèles. L'illustration 97 nous présente les résultats pour le modèle *Clandos*.

Classification des réseaux

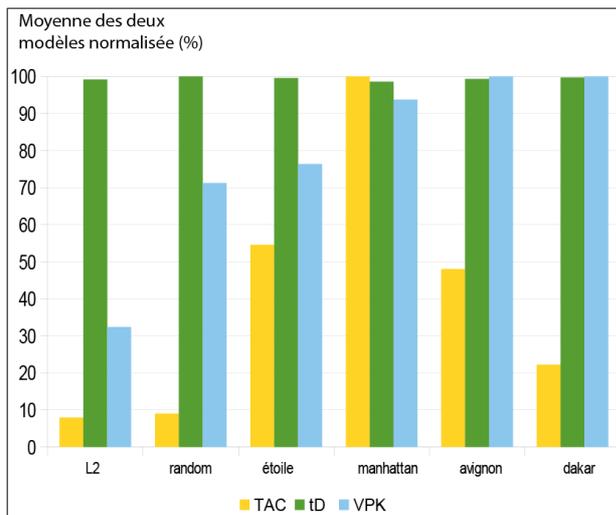


Illustration 96 : comparaison de l'efficacité des réseaux pour *Modulobus* et *Cooperation*.

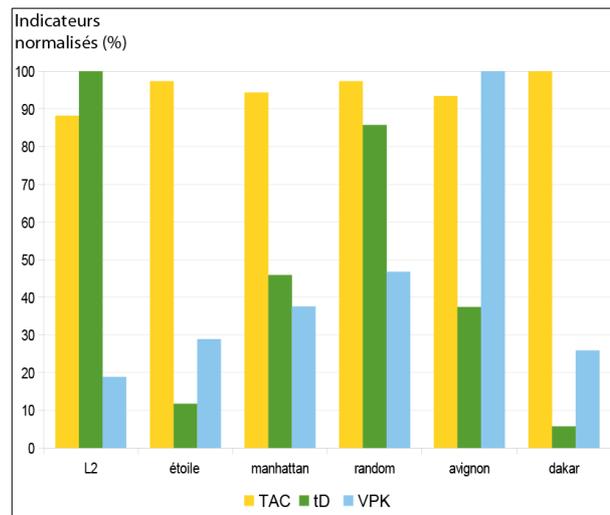


Illustration 97 : comparaison de l'efficacité des réseaux pour le modèle *Clandos*.

En comparant les graphiques 96 et 97, on s'aperçoit que la forme de la distribution est similaire, mais qu'elle ne concerne pas les mêmes indicateurs. En effet, pour les deux premiers modèles, nous constatons que le taux de desserte est presque au maximum pour tous les réseaux (excepté le réseau de Manhattan). Le temps d'attente moyen des clients aux stations varie beaucoup d'un réseau à l'autre avec un maximum atteint pour Manhattan. Pour le modèle *Clandos*, c'est le temps d'attente qui est maximal pour tous les réseaux et les deux autres indicateurs sont très variables. En analysant plus finement ces différences, nous pouvons établir une typologie des réseaux.

Les réseaux les plus efficaces (maximisation des trois indicateurs)

Pour *Modulobus* et *Cooperation*, le réseau le plus adapté semble être Dakar. Le temps d'attente des clients est le plus bas et les deux autres indicateurs sont maximums. Cela s'explique certainement par sa forme allongée et par la présence de grands axes de dessertes (voie rapide et autoroute) qui permettent de desservir facilement une grande partie de l'espace en s'autorisant du cabotage. Les illustrations 98 et 99 nous montrent d'ailleurs que ces axes ont connu la plus forte fréquentation pour les deux modèles (traits les plus épais).



Illustration 98 : structure des flux obtenue sur le réseau de Dakar avec le modèle *Cooperation*.



Illustration 99 : structure des flux obtenue sur le réseau de Dakar avec le modèle *Modulobus*.

Pour le modèle *Clandos*, ce sont les réseaux théoriques qui semblent être les plus efficaces. Le réseau aléatoire, notamment, présente les résultats les plus équilibrés. Cela s'explique probablement par le nombre de destinations présentes sur le réseau. Plus les destinations possibles sont nombreuses, plus les véhicules vont devoir attendre pour trouver le nombre de clients suffisant. Les mauvais résultats obtenus sur le réseau de Dakar (qui a le plus grand nombre de destinations) vont dans le même sens. Ce résultat nous montre que le modèle *Clandos* n'est pas vraiment sensible à la forme des réseaux, mais plutôt à la quantité de destinations à desservir. L'illustration 100 met en exergue ce résultat. On observe une très bonne structuration des flux, avec des corridors de desserte qui relient les 4 destinations et quelques stations bien positionnées, jouant le rôle de relais.

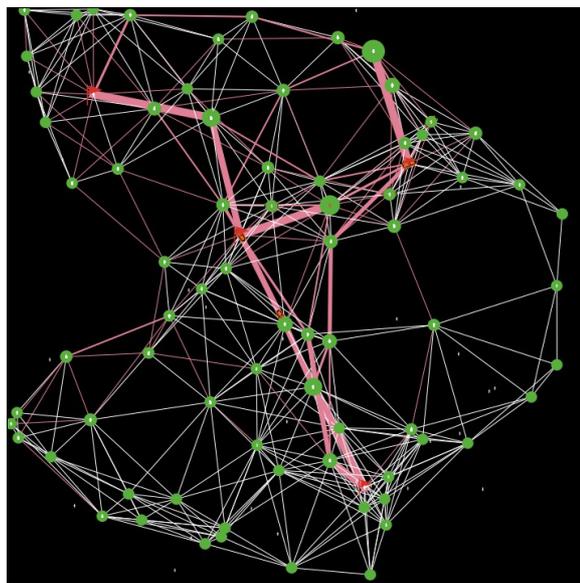


Illustration 100 : structure des flux obtenue sur le réseau aléatoire avec le modèle *Clandos*.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Les réseaux les plus contraignants

Le réseau le plus contraignant pour *Clandos* est sans aucun doute celui de Dakar avec un taux de desserte et un VPK très faibles. Pour les deux autres modèles, il semblerait que le réseau le plus contraignant (au vu des trois indicateurs) soit celui de Manhattan. En effet, il présente le taux de desserte le plus bas (même si les différences sont minimes), et surtout un temps d'attente des clients maximum. Le VPK, en revanche, n'est pas mauvais, certainement parce que le réseau oblige les véhicules à traverser un nombre important de stations, ce qui leur permet de prendre plus de clients en cours de route que dans les autres réseaux.

Le réseau avec les résultats les plus extrêmes

On constate que pour les trois modèles, le réseau L2 a entraîné des résultats avec des extrêmes opposés. Pour *Clandos*, on observe paradoxalement un très bon taux de desserte et un VPK très faible. Pour les deux autres modèles, on observe un très faible temps d'attente, mais aussi un très faible VPK. Cela s'explique par la forme du réseau qui est vraiment particulière. À l'opposé du réseau de Manhattan, le réseau complet ne permet pas d'embarquer des clients en cours de route, ce qui fait baisser le VPK. En revanche, les déplacements en distance euclidienne permettent de transporter les clients directement et rapidement, ce qui fait considérablement baisser le temps d'attente des clients. La planéité des réseaux a donc une influence sur la capacité des services à effectuer leur desserte.

Les trois autres réseaux présentent des résultats intermédiaires. Pour *Clandos*, on notera que le réseau d'Avignon permet de très bons résultats concernant le VPK. C'est aussi le cas pour les deux autres modèles. Cela est sûrement dû à sa forme en convergence vers le centre historique. Pour *Modulobus* et *Cooperation*, on notera que le modèle aléatoire semble considérablement réduire le temps d'attente des clients aux stations.

2.2.4 Synthèse

Au vu des ces résultats nous pouvons valider nos deux hypothèses. La forme et la topologie des réseaux ne constituent pas un facteur limitant pour les trois modèles (H.5). Ils peuvent néanmoins faciliter ou contraindre la desserte du territoire dans une certaine mesure (H.6). Selon le type de service et le niveau de souplesse, la topologie a donc un rôle sur l'efficacité de la desserte.

Parmi les résultats les plus intéressants, on notera que :

- le réseau aléatoire semble être le plus polyvalent, il est assez bien adapté aux trois types de modèles ;
- le réseau d'Avignon, par sa forme circulaire et en convergence, donne de bons résultats concernant l'approche opérateur ;
- le réseau de Dakar permet une bonne desserte du territoire et une bonne qualité de service pour les modèles *Cooperation* et *Modulobus*.

2.3 Capacité de montée en charge

Pour finir, nous proposons de tester la capacité de montée en charge de nos modèles. Nous procédons à une analyse de sensibilité sur 6 niveaux de densité de clients.

2.3.1 Problème posé

Hypothèses

H.7 : Nous proposons de tester plus finement l'hypothèse H.1 de la première phase de simulation. Nous pensons que les conditions de fonctionnement des modèles sont bornées par des cas de forte et de faible densité. Au-delà d'un certain seuil, les modèles atteignent un état de saturation. En deçà d'un autre seuil, la densité est insuffisante pour tester le comportement des agents et donc pour faire fonctionner correctement les modèles.

H.8 : Au delà du seuil de saturation, nous pensons que l'efficacité des modèles décroît progressivement au fur et à mesure que la densité de clients augmente. Autrement dit, nous ne pensons pas pouvoir observer des changements de phase très marqués.

Objectifs

Nos objectifs de simulation peuvent se résumer ainsi :

- Analyser la sensibilité de chaque modèle aux différents niveaux de demande de mobilité.
- Identifier les seuils permettant de définir les conditions de fonctionnement optimales des modèles.

2.3.2 Méthodologie

Afin de nous focaliser sur l'influence du nombre de clients simulés, nous fixons certains paramètres de simulation. Nous utilisons le réseau aléatoire qui est relativement performant pour l'ensemble des modèles. Nous simulons les niveaux de densité suivants : 3 ; 6 ; 9 ; 12 ; 24 et 48 clients créés toutes les 50 itérations, pour 12 véhicules (cf. tableau 29).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Catégories	Paramètres	Valeurs
Temps (discret en nombre d'itérations)	Temps de simulation	100 000
	Fréquence de création des clients	50
Espace	Forme	aléatoire
	Nombre de stations	80
	Part de destinations	10 % (convergence)
	Taille du territoire	700*700 pixels
Offre de transport	Nombre de véhicules	12
	Capacité des véhicules	20
	Facteur vitesse	15
Demande de mobilité	Nombre de clients	3 ; 6 ; 9 ; 12 ; 24 ; 48
	Distance de marche maximale	50
	Rayon d'attractivité des stations	18

Tableau 29 : conditions de simulation pour analyser la capacité de montée en charge des modèles (**paramètre variable**).

2.3.3 Résultats

Les résultats de simulation sont analysés par l'intermédiaire des 6 indicateurs, toujours regroupés selon les trois approches. Pour chacun d'entre eux, nous avons représenté sur une courbe les valeurs obtenues en fin de simulation, en fonction de la quantité de clients créée périodiquement.

Approche clients

Comme nous l'avons déjà observé précédemment, nous constatons sur les illustrations 101 et 102 une totale stabilité pour le *Modulobus*. Cela s'explique bien sûr par le fait que contrairement aux autres modèles, les clients ont la capacité de changer de station en cours de simulation. Le fait de pouvoir circuler n'explique pas tout, car les clients pourraient se déplacer de station en station sans trouver de solution de déplacement. Or visiblement, la communication véhicules-clients testée dans ce modèle permet de répondre efficacement aux besoins de mobilité même avec des densités de clients très élevées. En termes de qualité de service, le *Modulobus* surpasse les deux autres modèles.

Pour *Clandos* et *Cooperation*, nous observons sur les deux graphiques un changement de phase, à partir de 12 clients. Le modèle *Cooperation* présente de bons résultats stabilisés avant ce seuil, puis entre en saturation une fois le seuil franchi, i.e. le nombre et le temps d'attente des clients augmentent significativement. On observe pour ce modèle un deuxième seuil autour des 24 clients. En effet, on constate que le temps d'attente des clients se stabilise à nouveau à peu près au même niveau que pour le modèle *Clandos*.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Ce dernier présente de mauvais résultats dans cette approche. Le temps d'attente des clients est très élevé, même en faible densité (avec un pic à 6 clients) et le nombre moyen de clients en attente augmente considérablement au-delà du seuil de 9 clients environ.

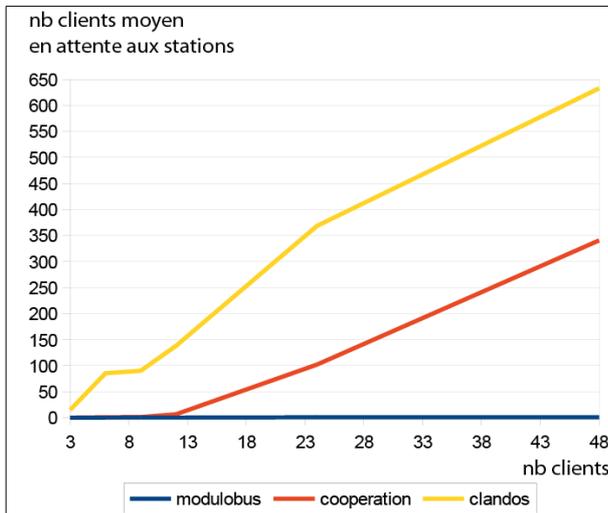


Illustration 101 : nombre de clients moyen en attente aux stations.

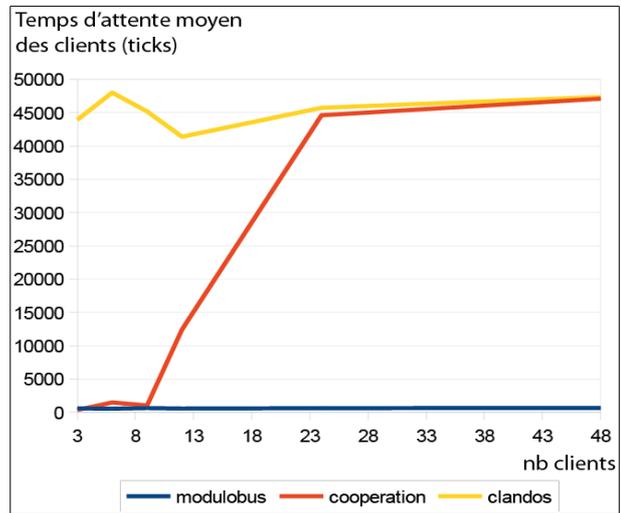


Illustration 102 : temps d'attente moyen des clients aux stations.

Approche territoire

À nouveau, le *Modulobus* se distingue des deux autres modèles en matière de qualité de desserte. Les résultats sont parfaitement stables pour le taux de desserte et ils varient très peu pour la part de station avec des clients en attente. Cela rejoint donc notre typologie établie dans la première phase de simulation : le *Modulobus* présente une excellente qualité de service et une très bonne exploration du territoire.

La tendance des deux autres modèles est relativement proche. Jusqu'à 12 clients, nous observons une forte augmentation de la part de stations avec des clients en attente, puis une stabilisation. Pour le taux de desserte, on constate qu'il décroît à partir de ce même seuil. Néanmoins, le modèle *Cooperation* présente de bien meilleurs résultats que le *Clandos*, pour les deux indicateurs et notamment en faible densité. On conserve donc le même classement des modèles pour l'approche territoire. À noter que le modèle *Clandos* présente encore une fois des pics à 6 clients. Il semblerait que cette version de simulation se distingue un peu des autres ou présente un cas particulier.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

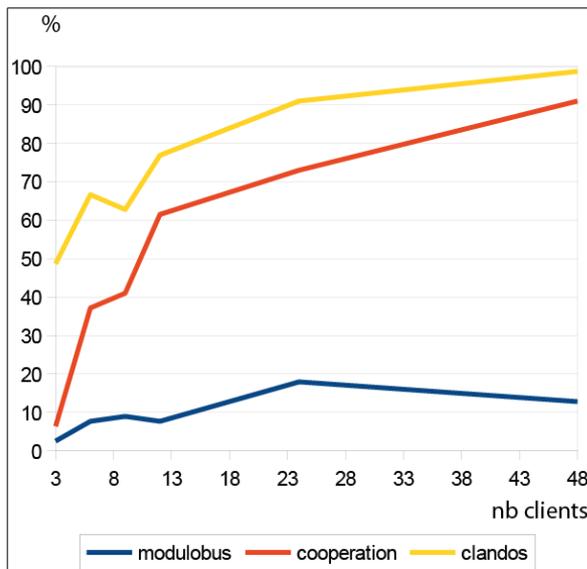


Illustration 103 : part des stations avec des clients en attente.

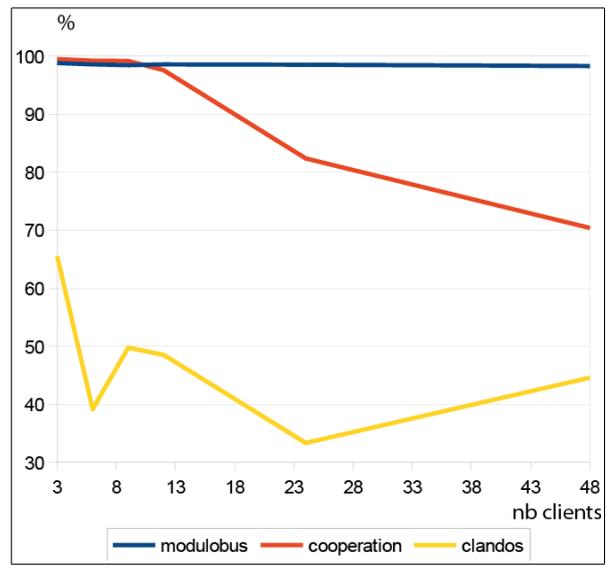


Illustration 104 : taux de desserte

Approche opérateur

Enfin, pour l'approche opérateur le classement est inversé. Le *Clandos* apparaît largement comme le modèle le plus performant. Viennent ensuite *Cooperation*, puis *Modulobus* qui sont finalement assez proches. Le modèle *Clandos* témoigne d'une très forte augmentation du taux de chargement et du VPK jusqu'à 12 clients. On observe donc le même seuil que sur les courbes précédentes. Le taux de chargement augmente ensuite très peu au-delà de 80 % et le VPK se stabilise autour de 13. Pour les deux autres modèles, les résultats sont significativement inférieurs. Le VPK évolue de manière linéaire pour les deux modèles et atteint la valeur maximale 2, pour 48 clients créés. Le taux de chargement du modèle *Cooperation* est un peu meilleur que celui du *Modulobus*. Il atteint les 50 % environ pour la plus forte densité. Une fois de plus, nous observons sur cette courbe le même seuil à environ 12 clients.

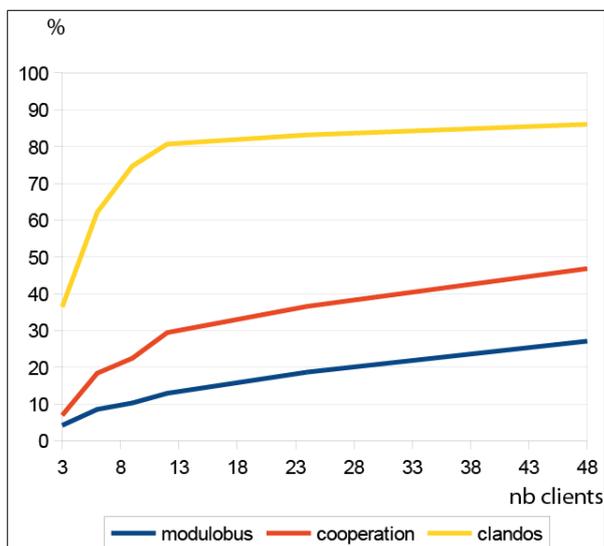


Illustration 105 : taux de chargement des véhicules.

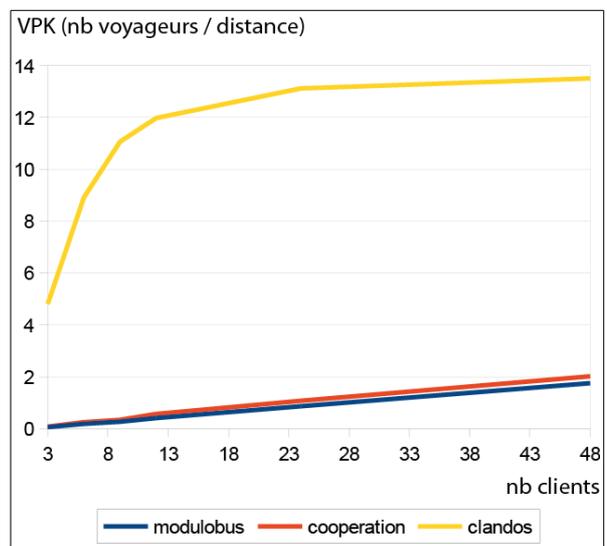


Illustration 106 : voyageurs par kilomètres.

2.3.4 Synthèse

Pour conclure sur la capacité de monter en charge des modèles, nous pouvons valider en partie notre première hypothèse H.7. Les modèles *Cooperation* et *Clandos* atteignent un état de saturation au-delà d'une certaine densité de clients. Ce seuil semble se situer aux alentours de 12 clients créés toutes les 50 itérations. En revanche, ils ne semblent pas nécessiter une densité minimale de clients pour fonctionner efficacement. Le modèle *Cooperation* présente d'ailleurs de très bons résultats en faible densité. Le modèle *Modulobus*, quant à lui, est assez peu sensible à l'augmentation du nombre de clients. On a pu constater de bons résultats sur l'ensemble des conditions de simulation testées et des variations très progressives sur l'ensemble des indicateurs.

Contrairement à ce qui avait été annoncé dans notre hypothèse H.8, nous avons pu observer un changement de phase relativement significatif entre 9 et 12 clients pour le modèle *Cooperation* (et dans une moindre mesure pour *Clandos*). Ce changement est visible sur la plupart des indicateurs : les performances du modèle sont sensiblement réduites au-delà de ce seuil.

2.4 Caractéristiques détaillées des modèles

Pour conclure ce deuxième chapitre, nous proposons en premier lieu une typologie des trois modèles intégrant les 6 indicateurs. Nous proposons ensuite une présentation complète de chacun des modèles en suivant le protocole ODD.

2.4.1 Comparaison des modèles

La typologie que nous proposons est basée sur un cas de simulation qui, dans l'ensemble, a présenté de bons résultats pour les trois modèles. Il s'agit d'une densité de clients intermédiaire (9 clients pour 12 véhicules) simulée sur le réseau aléatoire (cf tableau 30). On se situe donc en amont du seuil de saturation révélé par les modèles *Cooperation* et *Clandos*.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Catégories	Paramètres	Valeurs
Temps (discret en nombre d'itérations)	Temps de simulation	100 000
	Fréquence de création des clients	50
Espace	Forme	aléatoire
	Nombre de stations	80
	Part de destinations	10 % (convergence)
	Taille du territoire	700*700 pixels
Offre de transport	Nombre de véhicules	12
	Capacité des véhicules	20
	Facteur vitesse	15
Demande de mobilité	Nombre de clients	9
	Distance de marche maximale	50
	Rayon d'attractivité des stations	18

Tableau 30 : conditions de simulation retenues pour établir la typologie des modèles.

Nous comparons les modèles à l'aide d'un graphique en étoile sur l'illustration 107. Pour le construire, nous avons réutilisé la méthode d'attribution des scores de la première phase de simulation. Nous avons détaillé les classes en les partageant chacune en deux classes. On obtient 8 classes et une gamme de scores variant de 1 à 8 (cf. tableau 31).

Scores	CA	TAC	tSCA	tD	tC	VPK
8	0-0,5	0-250	0-12,5	97,5-100	60-90	15-25
7	0,5-1	250-500	12,5-25	95-97,5	30-60	2,5-15
6	1-5	500-1500	25-37,5	92,5-95	22,5-30	1,5-2,5
5	5-10	1500-2500	37,5-50	90-92,5	15-22,5	0,5-1,5
4	10-50	2500-7500	50-62,5	80-90	10-15	0,25-0,5
3	50-100	7500-12500	62,5-75	70-80	5-10	0,1-0,25
2	100-500	12500-37500	75-87,5	35-70	2,5-5	0,05-0,1
1	500-1000	37500-62500	87,5-100	0-35	0-2,5	0-0,05

Tableau 31 : méthode de discrétisation pour l'attribution des scores.

Nous retrouvons sur l'illustration 107 les tendances observées dans la première phase de simulation. Dans l'ensemble, *Modulobus* demeure le modèle le plus performant. Il excelle pour les deux indicateurs de l'approche territoire, mais présente des performances moyennes dans l'approche opérateur. Le modèle *Cooperation* arrive en deuxième position. Globalement, c'est le modèle le plus équilibré. Il affiche de bons résultats pour au moins un des deux indicateurs de chaque approche. Enfin, le modèle *Clandos* est le plus typé des trois. Il excelle dans l'approche opérateur, mais présente de mauvais résultats dans les deux autres approches. Son point faible est incontestablement le temps d'attente des clients aux stations qui est toujours très élevé.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

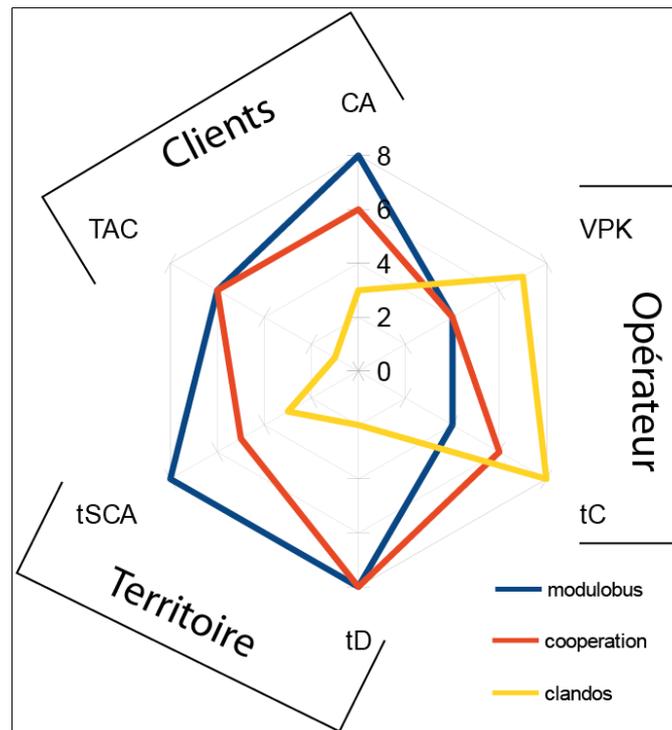


Illustration 107 : typologie détaillée des modèles.

2.4.2 Présentation ODD

Pour finir, nous présentons chacun des modèles selon le protocole *Overview Design concepts Details* (ODD). Nous complétons le protocole de base en y intégrant les observations clés de nos simulations. Notre objectif est de caractériser le fonctionnement des modèles et de mettre en exergue leurs points forts et leurs points faibles. Cette présentation se veut générique et représentative de toutes les simulations analysées.

Modulobus

Overview	<p>Purpose: Évaluer les apports d'une communication clients-véhicules pour l'optimisation d'un système de transport flexible</p>
	<p>Entities, state variables, and scales :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nous simulons deux catégories d'agents : les véhicules et les clients - Pour faire communiquer les deux types d'agents, nous utilisons un <i>push</i>. Cette variable permet d'enregistrer les routes de chaque véhicule. Elle peut être lue par tous les clients - Il n'y a pas de référence spatiale ni temporelle. Les agents évoluent dans un espace isotrope. Les réseaux peuvent être planaires ou non-planaires. Ils sont composés de stations et au minimum d'une destination.
	<p>Process overview and scheduling :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les véhicules se déplacent en continu de station en station à la recherche de clients. Dès qu'un client est embarqué, ils transmettent l'itinéraire au <i>push</i> et se dirigent directement vers la destination. - Des clients sont créés périodiquement. Ils choisissent une destination au hasard, puis se dirigent vers la station la plus proche et la plus attractive. Lorsque le <i>push</i> leur

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

	indique qu'un véhicule se dirige vers la destination souhaitée, les clients changent de stations pour rejoindre le véhicule en question à la prochaine station desservie.
Design concepts	<p>Objectives</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les clients cherchent à rejoindre leur destination le plus rapidement possible. - Les véhicules cherchent à embarquer le maximum de clients (maximisation du VPK)
	<p>Interaction</p> <p>Lors de leur rencontre aux stations, les deux types d'agent interagissent. Le véhicule peut compter le nombre de clients ayant une destination commune. Il choisit la destination la plus demandée et embarque les clients concernés par cette destination.</p>
	<p>Sensing</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les véhicules et les clients sont sensibles à l'état du <i>push</i>. Les véhicules sont capables d'écrire dans le <i>push</i> et les clients sont capables de lire l'information. En fonction des informations lues, ils vont prendre une décision. - Les clients sont capables de sentir l'attractivité des stations
	<p>Adaptation</p> <p>Les clients sont capables de se déplacer en fonction des itinéraires des véhicules</p>
	<p>Stochasticity</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lorsque les véhicules sont vides, ils choisissent aléatoirement les stations à desservir. - À leur création, les clients choisissent une destination au hasard
	<p>Observation</p> <p>Les indicateurs sont calculés dynamiquement et exportés en fin de simulation. Des graphiques sont également tracés dynamiquement sur l'interface de simulation. L'épaisseur des axes est calculée dynamiquement en fonction de la fréquentation des véhicules.</p>
	<p>Emergence</p> <p>Au fur et à mesure que le système se structure, des corridors de desserte apparaissent sur l'écran de simulation</p>
Détails	<p>Initialization</p> <p>A l'initialisation, la forme du réseau et la localisation des destinations sont importés dans le simulateur (ils ne varient jamais). En revanche, les agents sont disposés dans l'espace de manière aléatoire à leur initialisation.</p>
	<p>Input data</p> <p>Les simulations ne sont pas alimentées par des données en cours de simulation</p>
	<p>Submodels</p> <p>Les sous modèles concernent les procédures de choix des véhicules et des clients. Ils ont été présentés dans la partie 2 sous forme de diagramme UML d'état transition (cf. Partie 2, Chapitre 3.3.5).</p>
Main results	<p>Très bonne qualité de service</p> <p>Pour la totalité des simulations analysées, les indicateurs concernant l'approche clients et territoire affichent toujours les meilleurs résultats.</p>
	<p>Très bonne stabilité</p> <p>Le modèle est peu sensible aux caractéristiques des réseaux. Il présente une capacité de montée en charge très importante (e.g. de 3 à 48 clients créés toutes les 50 itérations). C'est le modèle qui bénéficie de conditions de fonctionnement les plus étendues.</p>
	<p>Faible « rentabilité »</p> <p>Quelque soit 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.</p>

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Cooperation

Overview	<p>Purpose : Évaluer les apports d'une <i>Cooperation</i> inter-véhicules pour l'optimisation d'un système de transport flexible.</p>
	<p>Entities, state variables, and scales : - Nous simulons deux catégories d'agents : les véhicules et les clients - Il n'y a pas de référence spatiale ni temporelle. Les agents évoluent dans un espace isotrope. Les réseaux peuvent être planaires ou non-planaires. Ils sont composés de stations et au minimum d'une destination.</p>
	<p>Process overview and scheduling : - Les véhicules se déplacent en continu de station en station à la recherche de clients. Lorsque des clients sont embarqués à une station et qu'il reste des clients à prendre, le véhicule va marquer la station. L'information est partagée avec tous les véhicules. Quand ils sont vides, les véhicules desservent en priorité les stations marquées. - Des clients sont créés périodiquement. Ils choisissent une destination au hasard, puis se dirigent vers la station la plus proche et la plus attractive. Ils attendent alors qu'un véhicule vienne les prendre.</p>
Design concepts	<p>Objectives Idem <i>Modulobus</i></p>
	<p>Interaction Idem <i>Modulobus</i></p>
	<p>Sensing - Les véhicules sont capables de distinguer les stations marquées et non marquées. Ils peuvent donc lire et modifier l'état des stations. - Les clients sont capables de sentir l'attractivité des stations.</p>
	<p>Collectives Une organisation collective de la desserte émerge de la coopération des véhicules. Ce comportement individuel leur permet de mieux explorer l'espace et de se répartir les stations à desservir.</p>
	<p>Stochasticity - Lorsqu'aucune station n'est marquée, les véhicules choisissent les stations à desservir aléatoirement. - À leur création, les clients choisissent une destination au hasard</p>
	<p>Observation - Idem <i>Modulobus</i>. - Les stations marquées changent de couleur : elles deviennent bleues.</p>
	<p>Emergence - Au fur et à mesure que le système se structure, des corridors de desserte apparaissent sur l'écran de simulation. - On peut également observer la répartition des stations avec des clients en attente (stations bleues).</p>
Details	<p>Initialization Idem <i>Modulobus</i>.</p>
	<p>Input data Idem <i>Modulobus</i>.</p>
	<p>Submodels cf. diagramme UML d'état transition Partie 2, Chapitre 3.3.4</p>

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Main results	<p>Polyvalence La spécificité du modèle est de présenter de bons résultats pour les trois approches. En revanche il n'excelle dans aucun des domaines. De plus, c'est un modèle relativement peu sensible à la forme du réseau et aux caractéristiques du territoire.</p>
	<p>Très bons résultats dans certaines conditions de simulation Le modèle est relativement peu sensible aux différents paramètres testés. Le paramètre le plus influent est la densité de clients. Les conditions de fonctionnement optimales correspondent à un réseau de type convergence et une densité de clients inférieure à 12 clients créés toutes les 50 itérations pour 12 véhicules simulés. Dans cet espace de paramètres, le modèle présente globalement de bonnes performances.</p>
	<p>Dégradation importante de la qualité de service en forte densité En très faible densité, le modèle présente les meilleures performances notamment grâce à sa capacité d'exploration du territoire. En revanche, au-delà du seuil de 12 clients, le modèle sature rapidement les performances se dégradent considérablement.</p>

Clandos

Overview	<p>Purpose : Simuler des pratiques observées chez les opérateurs de transport informels.</p>
	<p>Entities, state variables, and scales : - Nous simulons deux catégories d'agents : les véhicules et les clients - Il n'y a pas de référence spatiale ni temporelle. Les agents évoluent dans un espace isotrope. Les réseaux peuvent être planaires ou non-planaires. Ils sont composés de stations et au minimum d'une destination.</p>
	<p>Process overview and scheduling : - Les véhicules se déplacent aléatoirement sur le réseau jusqu'à ce qu'ils trouvent une station avec des clients en attente. Ils s'arrêtent alors à la station pour embarquer des clients ayant une destination commune. Ils entament leurs tournées seulement lorsque le taux de remplissage du véhicule dépasse les 50 %. - Des clients sont créés périodiquement. Ils choisissent une destination au hasard, puis se dirigent vers la station la plus proche et la plus attractive.</p>
Design concepts	<p>Objectives Idem <i>Modulobus</i></p>
	<p>Interaction - Lors de leur rencontre aux stations, les deux types d'agent interagissent. Le véhicule peut compter le nombre de clients ayant une destination commune. Il choisit la destination la plus demandée et embarque les clients concernés par cette destination. - Tant que le remplissage du véhicule n'est pas satisfaisant et au fur et à mesure que de nouveaux clients arrivent, le véhicule recalcule la destination la plus sollicitée. Si nécessaire, il peut changer de destination, i.e. faire descendre les clients déjà embarqués et embarquer de nouveaux clients (plus nombreux).</p>
	<p>Sensing Les clients sont simplement capables de sentir l'attractivité des stations</p>
	<p>Stochasticity Idem <i>Modulobus</i></p>
	<p>Observation Idem <i>Modulobus</i></p>

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

	<p>Emergence Idem <i>Modulobus</i></p>
Details	<p>Initialization Idem <i>Modulobus</i></p>
	<p>Input data Idem <i>Modulobus</i></p>
	<p>Submodels cf. diagramme UML d'état transition Partie2, Chapitre 3.3.3</p>
Main results	<p>Très bonne "rentabilité" Ce modèle présente généralement les meilleurs résultats concernant l'approche opérateur. Les différences observées avec les deux autres modèles sont très importantes (jusqu'à X10).</p>
	<p>Très faible capacité d'adaptation C'est le modèle qui présente les conditions de fonctionnement les plus restreintes. Il nécessite un réseau de type convergence, avec peu de destinations et une densité de clients idéalement comprise entre 9 et 12 clients environ.</p>
	<p>Très faible qualité de service Pour toutes les conditions de simulation testées, ce modèle présente de mauvais résultats concernant l'approche clients et territoire. Il permet seulement de maximiser le profit des opérateurs.</p>

Chapitre 3. Confrontation et complémentarité des systèmes

Pour parfaire notre étude, nous proposons de dépasser le stade de la comparaison et d'entrer pleinement dans la confrontation des services de transport. Pour ce faire, nous avons mis en place un ensemble de modèles associant différents services. Ils nous permettent de simuler en simultané ou de manière séquentielle les trois modèles de références : *Modulobus*, *Cooperation* et *Clandos*. Nous ajoutons à ces trois modèles le modèle Bus qui a été mis à l'écart dès le chapitre 1. Il ne nous semblait pas vraiment comparable aux autres modèles du fait de sa rigidité. Son fonctionnement et ses performances sont en effet largement déterminés par le tracé des lignes sur lesquelles il opère. Nous pensons toutefois qu'il est intéressant de le combiner avec les autres modèles dans ce dernier chapitre.

Pour justifier nos choix, nous établissons un résumé des points forts et des points faibles de chacun des modèles dans le tableau 32. L'objectif est de pouvoir facilement identifier les modèles qui semblent *a priori* complémentaires ou en compétition.

	Points forts	Points faibles
<i>Modulobus</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne qualité de service (excellent drainage et temps d'attente minimum) - Très bonne stabilité (peu sensible aux modifications de contraintes), adaptable et ubiquiste 	Faible efficacité de regroupement (faible VPK)
<i>Cooperation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Polyvalence (performances correctes pour les 3 approches) - Très bons résultats dans les conditions de fonctionnement optimales (réseau en convergence et faible densité de client) 	Dégradation importante de la qualité de service en forte densité
<i>Clandos</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne efficacité de regroupement (meilleurs VPK observés) - Aucun déplacement à vide (départ avec un taux d'occupation > 50 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Très faible qualité de service (temps d'attente des clients maximal) - Dégradation importante de la desserte en forte densité
<i>Bus</i>	Très bonne capacité de regroupement	<ul style="list-style-type: none"> - Faible qualité de service - Desserte spatiale limitée aux lignes préétablies (aucune flexibilité)

Tableau 32 : caractéristiques clés des modèles.

À partir de ces 4 modèles types, nous proposons 5 modèles mixtes, puis un modèle hybride. Chacun d'entre eux reflète soit des systèmes de transports plus ou moins plausibles, soit des contextes de mobilités relativement proches de ceux observés en France ou au Sénégal.

Le modèle hybride est composé des trois modèles *Modulobus*, *Cooperation* et *Clandos* fonctionnant de manière graduelle. Les 5 modèles mixtes sont tous composés de deux types de service en fonctionnant en simultané Concernant l'ordonnancement des procédures, à chaque itération sont appelées les procédures de création et de déplacement des clients, puis les procédures de déplacement des deux modèles, enfin les procédures concernant l'affichage et le tracé des graphiques (cf. annexe 5).

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Nous avons défini les modèles mixtes de la manière suivante (cf. illustration 108) :

1. le modèle *Formel* est composé du *Modulobus* et d'un service de bus (analogie aux systèmes français)
2. le modèle *Informel* est composé de véhicules de type *Cooperation* et *Clandos* (analogie au système dakarois) ;
3. le modèle *Flexible* est composé des deux services les plus souples, à savoir le *Modulobus* et le *Cooperation* (système théorique français) ;
4. le modèle *Régulier* est composé des deux modèles les moins flexibles, à savoir le *Clandos* et le *Bus* (analogie au système dakarois) ;
5. le modèle *France-Sénégal* intègre les deux modèles types de chacun des deux contextes sociétaux, à savoir le *Modulobus* et le *Clandos*. Ce sont aussi deux modèles très différents en matière de fonctionnement et de performances (système purement expérimental).

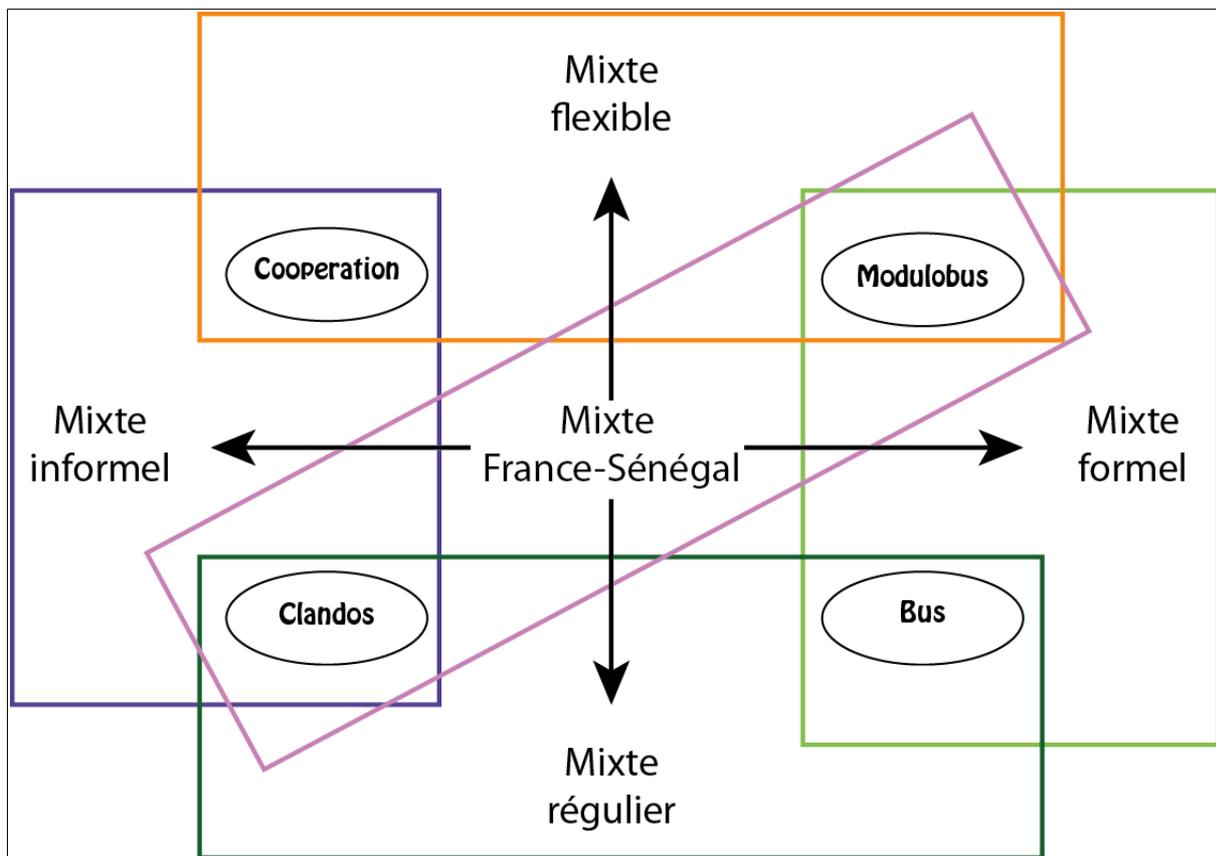


Illustration 108 : composition des 5 modèles mixtes.

3.1 Problème posé

Hypothèses

H.9 : En simulant deux modèles en simultanée, nous pensons pouvoir faire émerger des phénomènes de compétition ou de complémentarité en matière de desserte et de structuration du

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

territoire. Selon le comportement des agents, nous pensons que, dans certains cas, le fonctionnement d'un modèle peut gêner le bon fonctionnement d'un autre. *A contrario*, nous pensons que la mixité peut dans d'autres cas, apporter un gain d'efficacité pour l'approche clients, opérateur ou territoire.

H. 10 : Les résultats des analyses précédentes nous ont montré que les modèles les plus performants (toutes approches confondues) étaient en premier lieu *Modulobus* (malgré la faible efficacité opérateur), puis le service *Cooperation*. *A priori*, nous pensons que le modèle mixte le plus performant est le modèle *Flexible* puisqu'il combine les deux meilleurs modèles. *A contrario*, nous pensons que le modèle mixte le moins bon est le *Régulier* puisqu'il combine deux modèles très spécifiques et peu performants sur l'ensemble des indicateurs.

Objectifs

Nos objectifs pour ce dernier chapitre sont à la fois méthodologiques et thématiques. Nous visons à :

- Évaluer les apports et les contraintes de la mixité grâce aux différentes combinaisons de modèles possibles (fonctionnement en simultané de deux services) ;
- Proposer et calibrer un modèle hybride faisant intervenir de manière graduelle trois modèles ayant des caractéristiques complémentaires ;
- Comparer les performances des modèles mixtes et hybride, et proposer des configurations types en fonction des objectifs visés (rentabilité, qualité de service, homogénéité, etc.).

3.2 Méthodologie

Dans ces deux paragraphes, nous expliquons le protocole mis en place pour cette dernière phase de simulation. Nous expliquons également nos choix méthodologiques concernant l'exploitation des résultats et la caractérisation des modèles.

3.2.1 Protocole de simulation

Nous faisons intervenir ici un nouveau type de configuration spatiale. Il s'agit du réseau d'Avignon et de la banlieue de Dakar, auxquels nous avons ajouté des zones de plus ou moins forte densité de clients. Nous avons aussi dessiné pour chaque réseau deux lignes régulières de bus. Pour Avignon, les lignes virtuelles ont été définies selon le tracé des lignes 1 et 2 du réseau de bus du Grand Avignon. Les deux lignes du réseau de Dakar ont été tracées sur des itinéraires très fréquentés par les transports publics, aussi bien par les bus réguliers que par les mini-bus (cf. illustration 109 et 110). Pour plus de détails sur la construction de ces espaces, se référer à la partie 2 (cf. Partie 2. Chapitre 3.2).

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

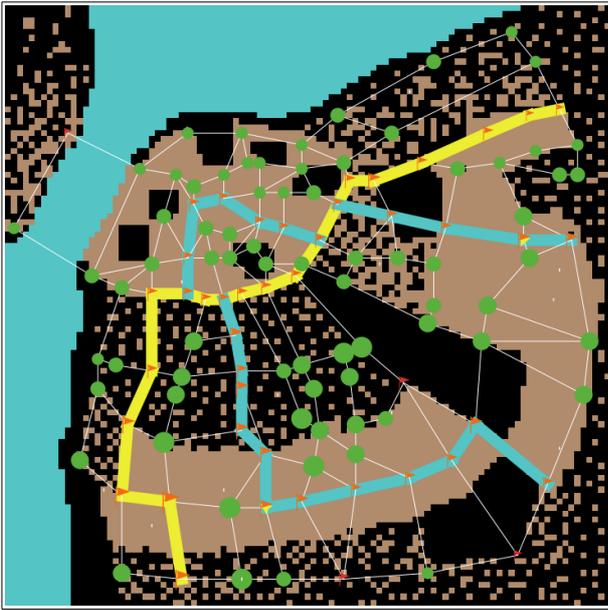


Illustration 109 : le réseau d'Avignon polarisé et ses deux lignes de bus.



Illustration 110 : le réseau de Dakar polarisé et ses deux lignes de bus.

Les clients apparaissent exclusivement sur les zones teintées en marron clair. Cela nous permet de générer une demande de mobilité mieux répartie. La localisation des clients est davantage cohérente avec la forme du réseau. Les zones de vides (espaces noirs et espaces naturels verts ou bleus) sont plus nombreuses que sur les espaces précédents, ce qui entraîne une densification des clients sur les zones urbaines résidentielles identifiées.

Concernant les paramètres de simulation, nous avons choisi de conserver la plupart des valeurs des simulations précédentes (cf. tableau 33). Pour chaque espace, nous faisons simplement varier le nombre de clients créés périodiquement. Grâce à l'analyse précédente de capacité de montée en charge (cf. Partie 3.2.3), nous avons pu identifier trois niveaux de densité pertinents :

- le cas de faible densité (3 clients/50 itérations) qui met en difficulté les modèles nécessitant un fort regroupement des clients aux stations (e.g. le bus) ;
- le cas de moyenne densité (9 clients/50 itérations) qui donne généralement des résultats convenables pour l'ensemble des modèles ;
- le cas de forte densité (24 clients/50 itérations) qui entraîne pour la plupart des modèles un état de saturation.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Catégories	Paramètres	Valeurs
Temps (discret en nombre d'itérations)	Temps de simulation	100 000
	Fréquence de création des clients	50
Espace	Forme	Avignon (polarisé) ; Dakar (polarisé)
	Nombre de stations	80
	Part de destinations	10 % (convergence)
	Taille du territoire	700*700 pixels
Offre de transport	Nombre de véhicules	12
	Capacité des véhicules	20
	Facteur vitesse	15
Demande de mobilité	Nombre de clients	3 ; 9 ; 24
	Distance de marche maximale	50
	Rayon d'attractivité des stations	18

Tableau 33 : liste complète des paramètres de simulation (**paramètres variables**).

Pour pouvoir établir une comparaison pertinente entre les modèles mixtes et les modèles de références, nous avons dû simuler à nouveau ces derniers sur les deux nouveaux espaces, pour les trois niveaux de densité identifiés. Comme le montre l'illustration 111, nous avons donc simulé 9 modèles, sur deux espaces et pour les trois niveaux de densité, ce qui nous donne un total de 54 simulations pour cette dernière phase de simulation.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

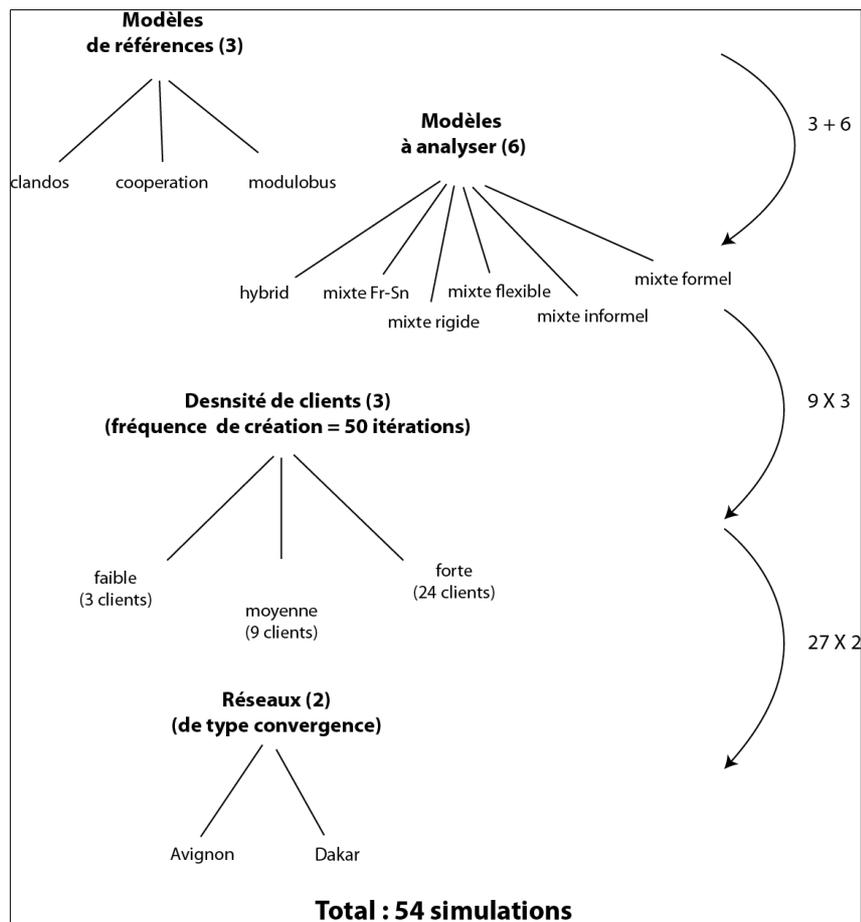


Illustration 111 : arbre de simulation pour la confrontation des modèles.

3.2.2 Comparaison des modèles

Pour comparer les performances des modèles mixtes avec celles des modèles de référence, nous testons la capacité de montée en charge des services. Comme nous l'avons vu, la quantité de clients créés au cours des simulations est le paramètre ayant le plus d'influence sur le fonctionnement des modèles. Dans le chapitre précédent, nous les avons simulés sur 6 niveaux de densité. Excepté pour le *Modulobus*, nous avons pu observer un point d'inflexion des courbes à partir de 12 clients créés toutes les 50 itérations. Ce point correspond à un changement de phase des systèmes. Nous avons ainsi pu conclure que nos modèles saturaient au-delà de ce seuil.

Pour réduire le nombre de simulations à exécuter, nous nous sommes limités dans ce chapitre aux trois niveaux de densité présentés ci-dessus. En effet, nous avons pu constater que les courbes tracées à partir de ces trois points étaient finalement très proches des tendances observées avec 6 niveaux de densité et suffisantes pour caractériser les modèles. Comme le montre l'illustration 112, tous les graphiques que nous analysons ici sont organisés de la même manière. Les deux courbes en trait fin représentent les modèles de référence et la courbe épaisse représente le modèle mixte (ou hybride). Chaque courbe est tracée à partir de trois points (3, 9 et 24 clients) et lissée selon la fonction automatique du logiciel Calc de Libre Office, pour plus de lisibilité.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

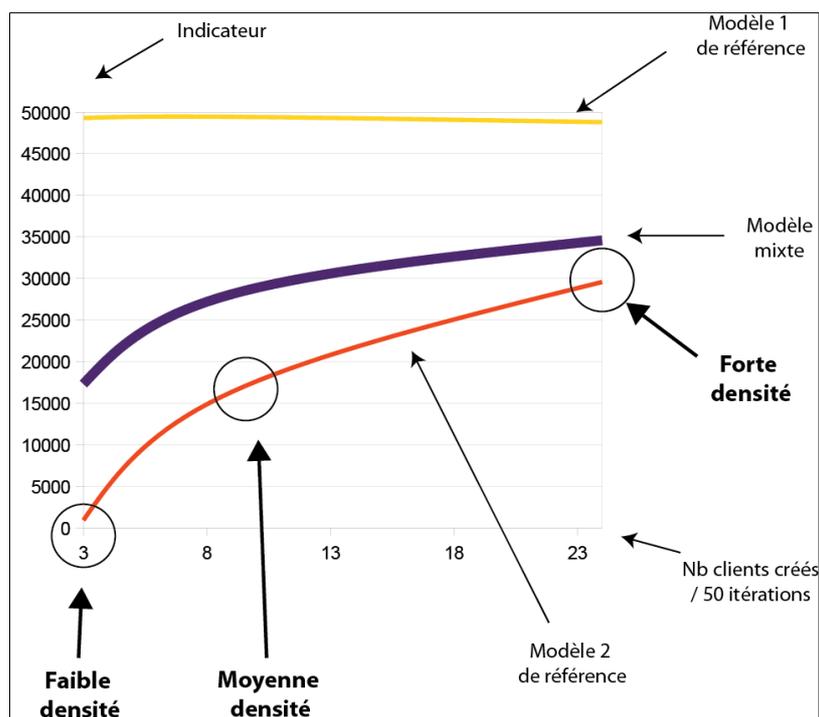


Illustration 112 : structure des graphiques permettant de comparer les performances des modèles mixtes avec leurs modèles de référence.

3.3 Résultats

Comme pour les simulations précédentes, les performances des modèles sont analysées à l'aide des 6 indicateurs regroupés en trois approches (clients, opérateur et territoire). Pour approfondir l'analyse territoriale, nous étudions également la structure des flux obtenus en fin de simulation. Pour cela, nous nous référons aux animations, nous utilisons des captures d'écran, ainsi que des graphiques affichant le trafic routier de chaque axe. Les résultats étant peu variables d'un réseau à l'autre, ou du moins la tendance étant conservée, nous analysons chacun des modèles sur un seul espace : celui sur lequel il affiche les meilleures performances.

3.3.1 Modèle mixte *Formel*

Le modèle mixte *Formel* est composé de 8 véhicules de type *Modulobus* et de 4 bus répartis sur deux lignes. Nous rappelons ci-dessous les caractéristiques clés des modèles.

Modèle mixte <i>Formel</i> (analogie aux systèmes français)			
<i>Modulobus</i>		<i>Bus</i>	
Points forts : - très bonne qualité de service - très bonne stabilité	Point faible : faible performance opérateur	Point fort : bonne performance opérateur en forte densité	Points faibles : - faible qualité de service - desserte spatiale limitée

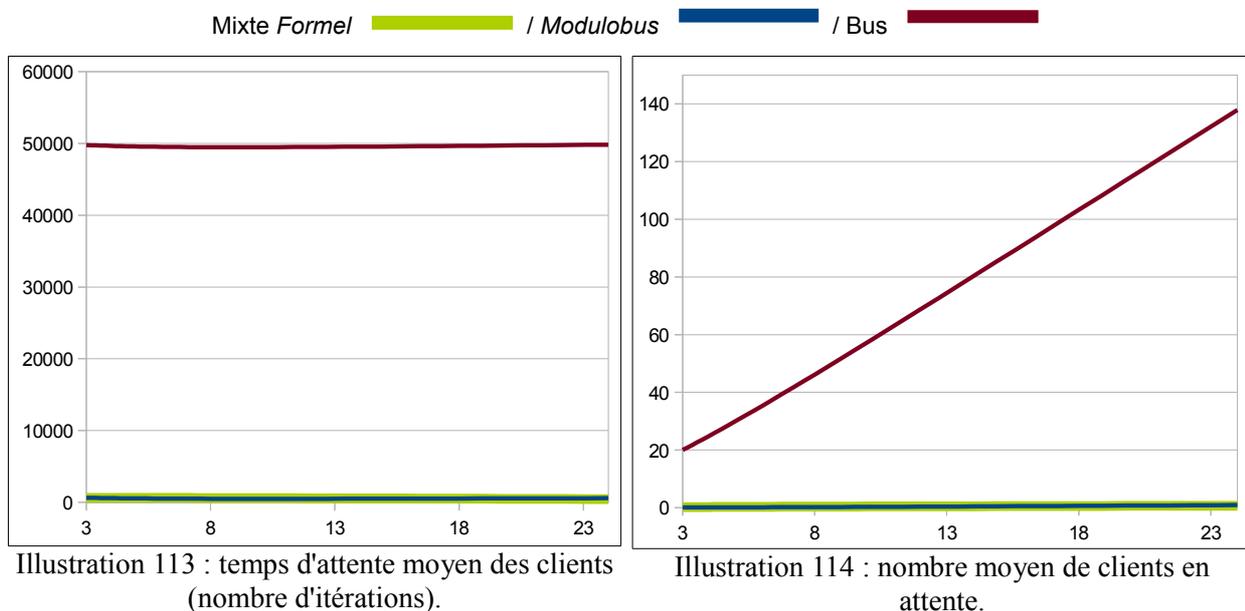
Tableau 34 : composition du modèle mixte *Formel*.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Il est intéressant de constater que globalement les résultats du modèle mixte sont meilleurs sur le réseau d'Avignon que sur celui de Dakar, notamment pour l'approche client et opérateur. Cela s'explique peut-être par une bonne adéquation entre le tracé des lignes de bus (tracé réel des lignes 1 et 2 du réseau de bus d'Avignon) et la localisation des foyers de densité. Les résultats que nous présentons ici vont donc concerner les simulations sur le réseau d'Avignon.

Réponse aux clients

Concernant l'approche client, on constate sur les illustrations 113 et 114 que les résultats du modèle mixte sont strictement identiques à ceux du *Modulobus*. Ce résultat est très positif sachant que le *Modulobus* est le modèle le plus performant de tous sur ce point. Le modèle mixte *Formel* présente donc un temps d'attente moyen et un nombre de clients moyen en attente presque nuls pour tous les niveaux de densité.



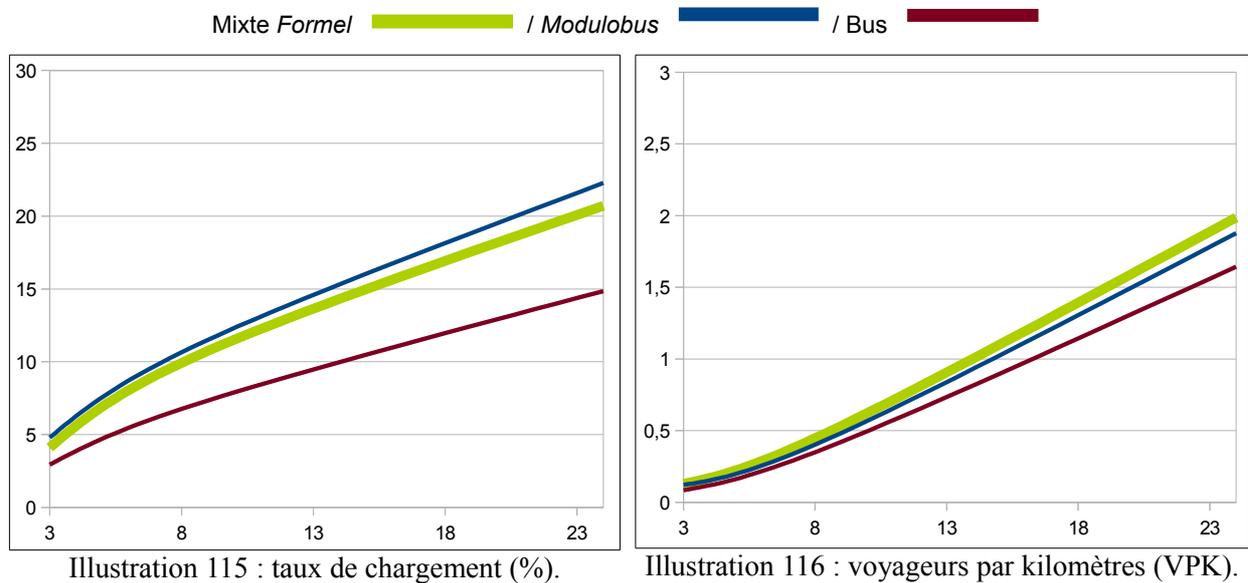
Compétition et complémentarité des opérateurs

Les résultats des indicateurs concernant l'approche opérateur sont contrastés. Le taux de chargement (cf. illustration 115) apparaît légèrement moins bon avec le modèle mixte qu'avec le *Modulobus*. Cela est dû aux bus qui présentent un taux de chargement un peu plus faible que le *Modulobus* (5,5 % d'écart). Sur les animations, il est facile de vérifier que les bus s'arrêtent régulièrement à des stations sans clients.

En revanche, on constate que le VPK (cf. illustration 116) du modèle mixte est supérieur aux deux autres modèles pour l'ensemble des simulations. Ce résultat est très intéressant, car il signifie que la combinaison des deux modèles est plus efficace (pour cet indicateur) que chacun des modèles pris séparément. Nous sommes donc bien en présence d'une complémentarité entre les deux systèmes. En regardant plus en détail, nous constatons qu'avec le modèle mixte, les 4 bus présentent un VPK moyen supérieur à celui observé avec 12 bus seuls. Le fait qu'il y ait trois

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

fois moins de bus en circulation avec le modèle mixte engendre une augmentation du taux de remplissage et donc améliore le nombre de voyageurs par kilomètre.



Analyse spatiale

Concernant la part de stations avec des clients en attente (cf. illustration 117), on observe avec le modèle mixte une tendance différente des deux autres modèles. En faible densité, les résultats sont légèrement moins bons que le *Modulobus*, alors qu'ils sont légèrement meilleurs en forte densité. Cela s'explique par le fait que les bus permettent de desservir certaines stations qui sont finalement excentrées sur le réseau (stations en bout de ligne) et peu desservies par le *Modulobus*. La combinaison avec le bus permet donc d'améliorer la répartition spatiale de la desserte en forte densité, mais elle est moins efficace en faible densité car les bus desservent toutes les stations de la ligne, même si aucun client n'est en attente.

Le taux de desserte du modèle *Formel* (cf. illustration 118) quant à lui demeure excellent. Il est strictement identique au modèle *Modulobus*.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

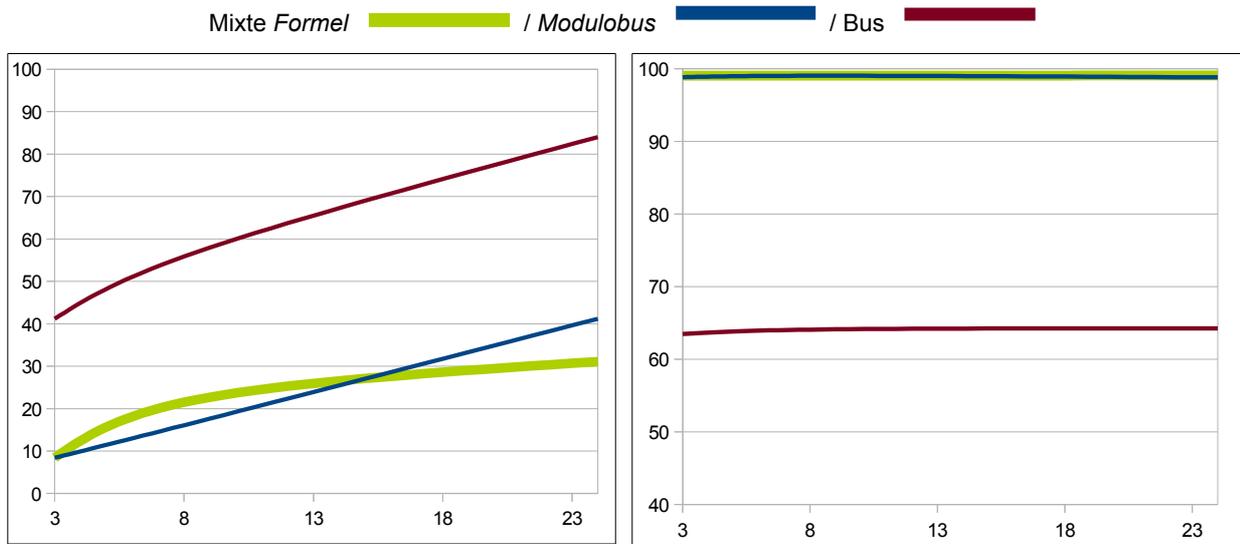


Illustration 117 : proportion de stations avec des clients en attente (%).

Illustration 118 : taux de desserte (%).

Concernant la structuration, il est difficile de repérer sur l'exportation d'image (cf. illustration 119) les corridors de desserte du *Modulobus*. En effet, l'épaisseur des axes étant normalisée par le trafic maximum, les axes les plus épais correspondent aux deux lignes de bus. Tous les autres axes apparaissent très fins, car très peu fréquentés en proportion.

L'illustration 120, présentant la hiérarchie des axes en fonction du trafic routier, nous aide alors à mieux comprendre la structure des flux. Elle nous permet notamment de comparer les trois modèles. Pour le modèle *Bus*, nous pouvons facilement identifier les deux lignes, ainsi que certains axes appartenant aux deux lignes (valeurs maximales). Si nous comparons avec le modèle mixte, nous constatons que la différence entre les deux lignes a été légèrement gommée. Cela nous amène à penser que les véhicules *Modulobus* ont largement utilisé ces axes, autrement dit qu'ils ont empiété sur l'itinéraire des bus au lieu de privilégier les stations non desservies par les bus.

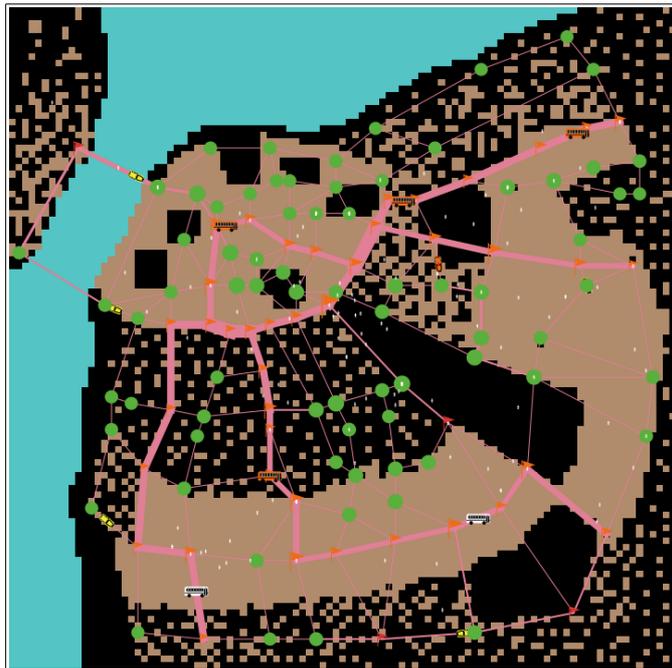


Illustration 119 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité.

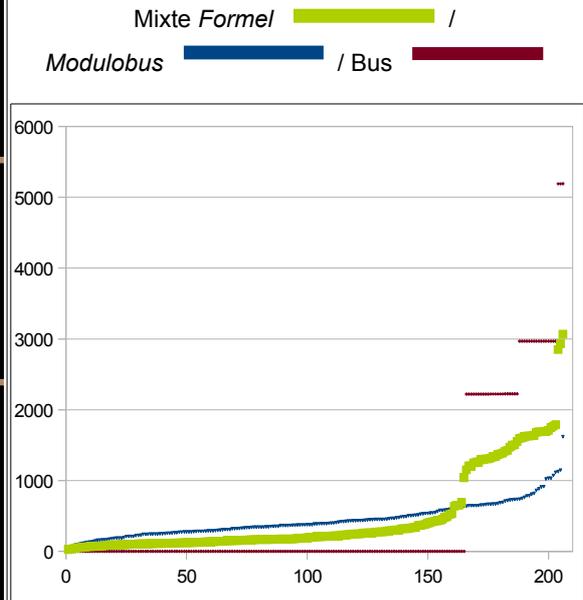


Illustration 120 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau d'Avignon).

Synthèse

Avec le modèle mixte *Formel*, le *Bus* semble avoir peu d'influence sur le fonctionnement du *Modulobus* et réciproquement. Au vu des résultats, ils ne se gênent pas l'un et l'autre, même si le *Modulobus* semble fonctionner régulièrement sur les mêmes itinéraires que les bus. Nous concluons qu'ils ne sont pas en compétition dans ces conditions de simulation. Pour la plupart des indicateurs, les résultats du modèle mixte sont très bons, car très proches du *Modulobus*. On constate même une certaine complémentarité entre les deux services. Le nombre de voyageurs par kilomètre est amélioré et l'exploration du réseau est meilleure en forte densité. La combinaison des deux modèles permet donc de fournir un service de bonne qualité pour les clients et un peu plus efficace du point de vue de l'opérateur.

3.3.2 Modèle mixte *Informel*

Le modèle mixte *Informel* est composé de 6 *Clandos* et de 6 véhicules coopérants. Nous rappelons ci-dessous les caractéristiques clés des modèles.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Modèle mixte <i>Informel</i> (analogie aux systèmes dakarois)			
<i>Clandos</i>		<i>Cooperation</i>	
Point fort : - efficacité de regroupement - très bonnes performances opérateur	Points faibles : très faible qualité de service	Point fort : - polyvalence - efficace en faible densité	Points faibles : faible capacité de monter en charge

Tableau 35 : composition du modèle mixte *Informel*.

Si le modèle *Formel* a été meilleur sur le réseau d'Avignon, on constate que le modèle mixte *Informel* a quant à lui été meilleur sur Dakar. Pris individuellement, les modèles *Clandos* et *Cooperation* ont également bien fonctionné sur Dakar pour cette troisième phase de simulations, alors qu'ils présentaient de meilleurs résultats sur celui d'Avignon dans les simulations précédentes. Ces améliorations sont peut être dues à la polarisation du territoire qui crée une meilleure adéquation entre la localisation des clients et la structure du réseau. Pour l'ensemble des indicateurs, on remarque que les résultats du modèle mixte sont intermédiaires à ceux des deux modèles. Il apparaît donc comme un compromis entre les deux systèmes sans jamais les dépasser dans un sens ou dans un autre.

Réponse aux clients

Pour l'approche clients, nous pouvons observer sur les illustrations 121 et 122 que les résultats sont un peu moins bons que pour le modèle *Cooperation*. Ils sont néanmoins bien meilleurs que ceux du modèle *Clandos*. Cela est rassurant, mais ce n'est pas vraiment un point fort dans la mesure où le *Clandos* est de loin le modèle présentant la plus mauvaise qualité de service. De plus, on constate que le temps d'attente moyen des clients pour le modèle mixte demeure relativement élevé (entre 15 000 et 35 000 itérations) ce qui constitue un réel point faible.

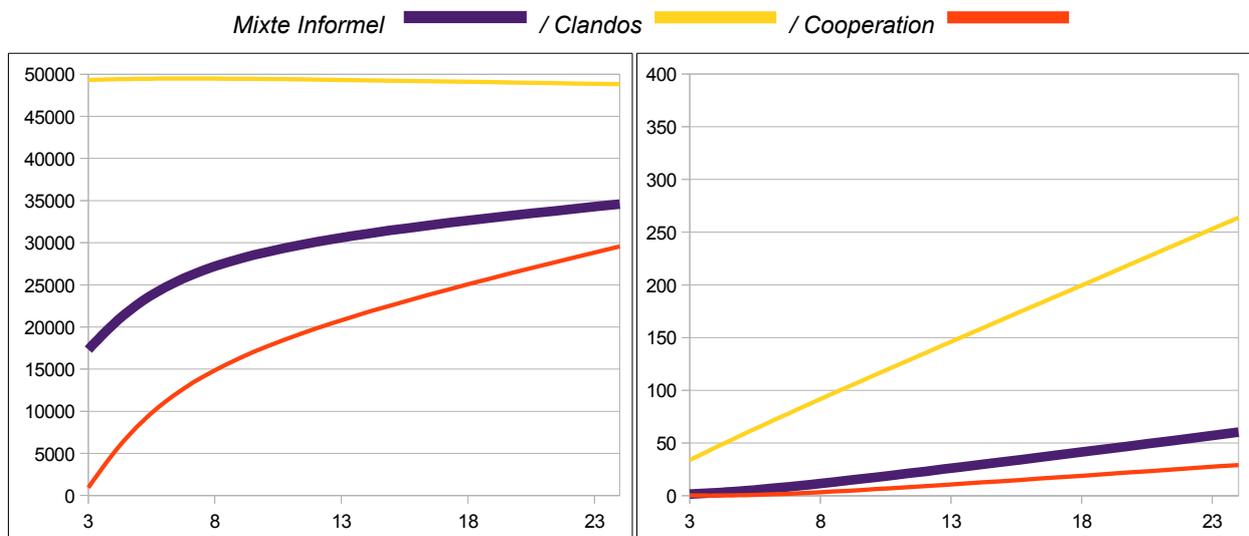


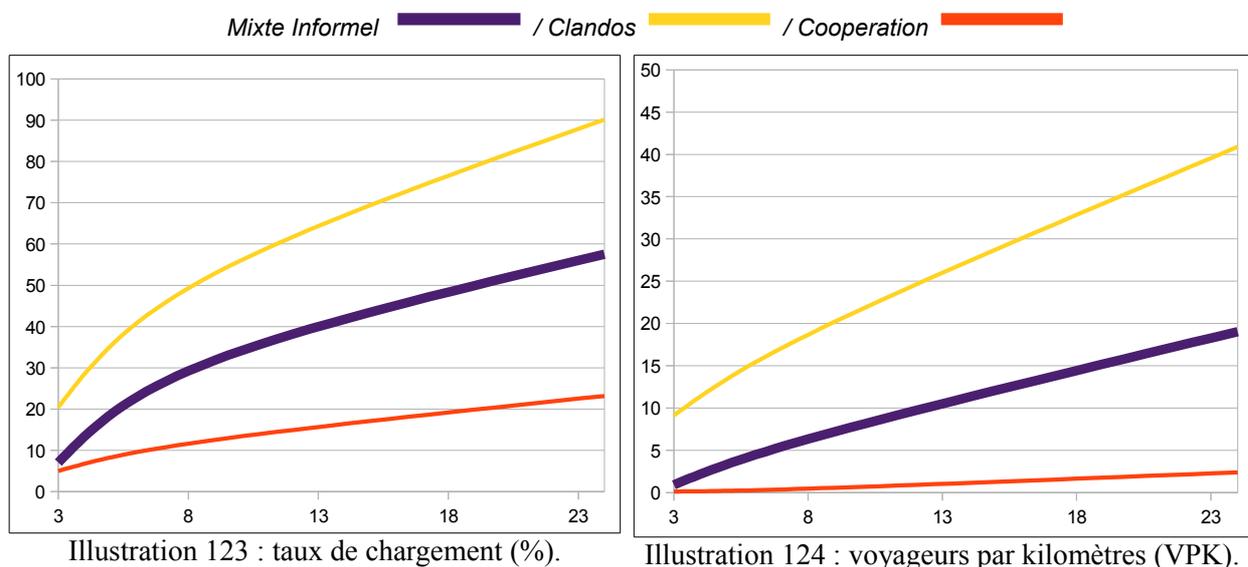
Illustration 121 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).

Illustration 122 : nombre moyen de clients en attente.

Compétition et complémentarité des opérateurs

Pour l'approche opérateur, les résultats du modèle mixte se situent à peu près entre les deux modèles de référence, comme si nous avions tracé la moyenne des deux courbes (cf. illustration 123 et 124). Cette observation est intéressante. Cela signifie que pour l'approche opérateur, le modèle mixte est significativement meilleur que le modèle *Cooperation* seul, sans pour autant être considérablement moins bon concernant l'approche clients. On peut donc parler d'un certain gain d'efficacité.

En observant les indicateurs des deux types de véhicule simulés en simultanément (indicateur indépendant), nous constatons un écart important. Par exemple, en densité moyenne (9 clients/50 itérations) les véhicules *Clandos* affichent un VPK de 13 alors qu'il est de 1 pour les véhicules coopérants. Comme le montrent les deux graphiques ci-dessous, cet écart est similaire à celui observé avec les deux modèles simulés de manière indépendante.



Analyse spatiale

Enfin, nous remarquons sur l'illustration 126 que le taux de desserte du modèle mixte est moins bon que celui du modèle *Cooperation* (entre 10 % et 20 % inférieur) et qu'il est très largement supérieure à celui du modèle *Clandos* (+ 70 %). Pour la proportion de stations avec des clients en attente (cf. illustration 125), nous sommes étonnés de constater que le modèle mixte est moins bon que les deux autres modèles (mis à part en faible densité). Cela signifie que le fonctionnement simultané des deux types de véhicule nuit à la capacité d'exploration du système dans son ensemble. Cela constitue un point faible non négligeable pour ce modèle mixte.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

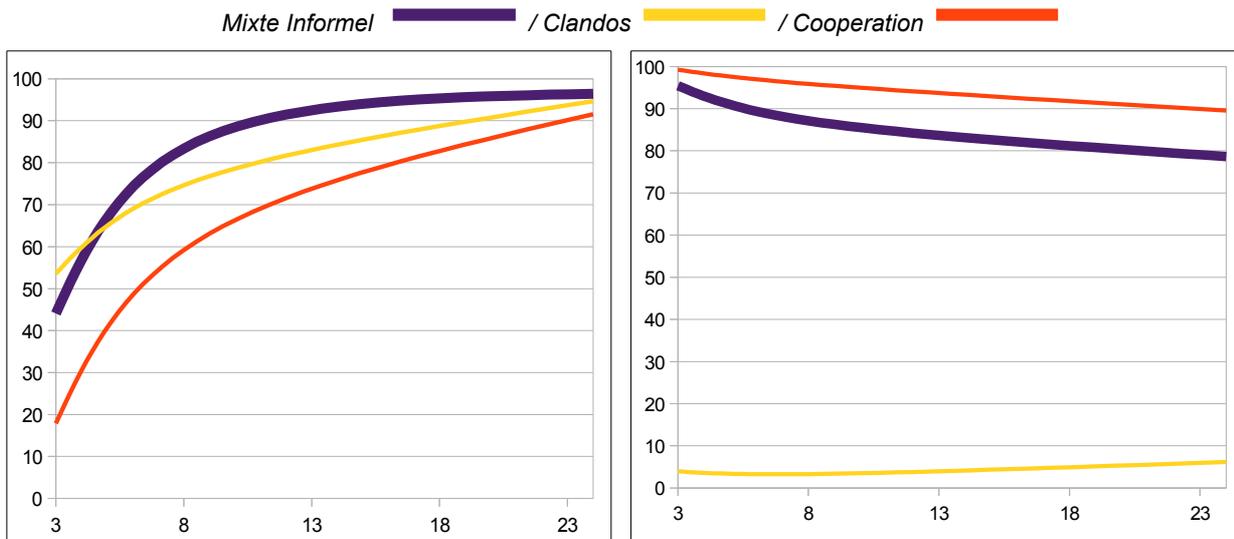


Illustration 125 : proportion de stations avec des clients en attente (%).

Illustration 126 : taux de desserte (%).

En faible densité, nous remarquons sur l'illustration 127 que le réseau a été relativement bien exploré et desservi par le modèle *Informel*. Excepté la partie droite sur laquelle on observe plusieurs stations marquées (en bleu), au centre et sur la partie de gauche du réseau, on observe seulement quelques stations marquées de tailles importantes (forte attractivité) qui jouent le rôle de relais. Cependant, à partir de 9 clients/50 itérations (cf. illustration 128), nous constatons que le nombre de stations marquées par les véhicules coopérants est très important (la grande majorité). Le modèle apparaît donc comme saturé et le principe de coopération perd en efficacité. Nous pensons que cela explique la faible capacité d'exploration de l'espace observé sur le précédent graphique.

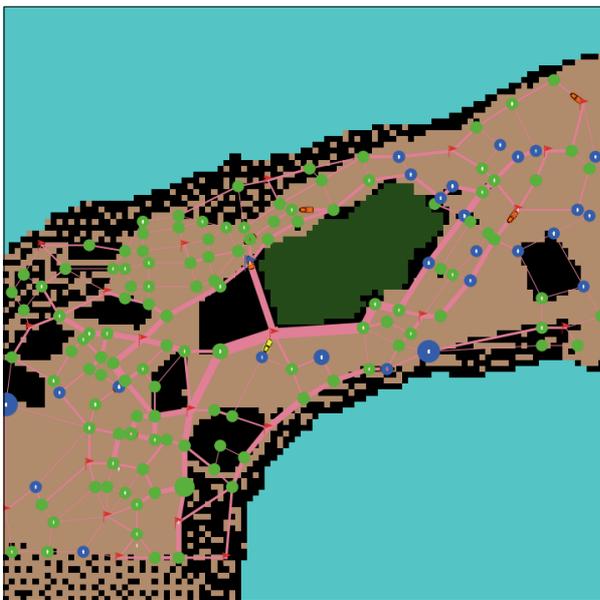


Illustration 127 : structure spatiale obtenue pour le cas de faible densité (3 clients/50 itérations).

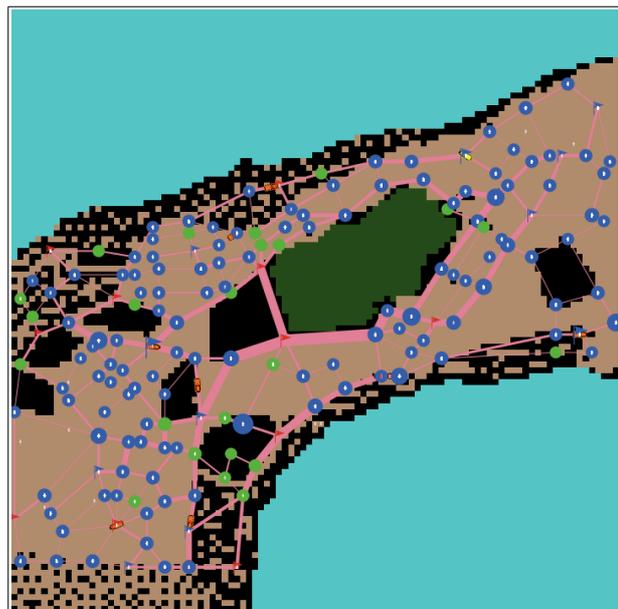


Illustration 128 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité (9 clients/50 itérations).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Concernant la répartition du trafic routier sur les axes, nous constatons que le modèle mixte ne change pas la tendance et au vu des exportations d'images, nous pensons qu'il ne change pas la hiérarchie. L'illustration 129 nous montre que les *Clandos* se déplacent très peu. Leur influence sur la hiérarchie des axes est donc minime. Le fait qu'il y ait moins de véhicules coopératifs diminue simplement la quantité de flux et leur répartition est donc un peu plus homogène que pour le modèle *Cooperation*.

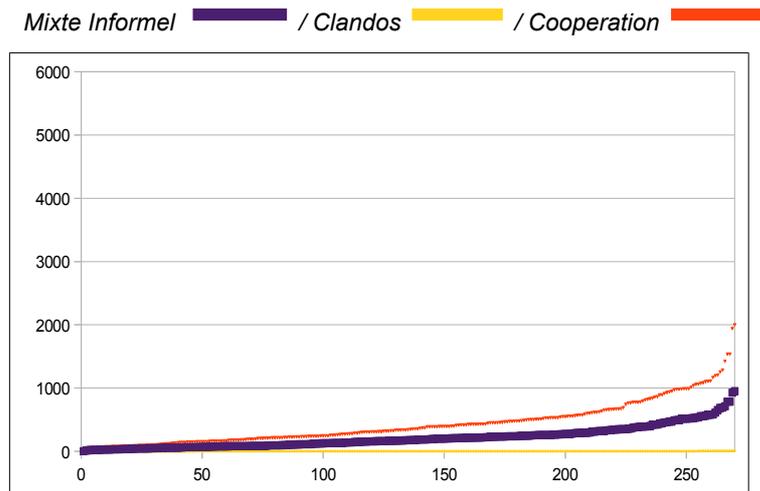


Illustration 129 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).

En nous référant à la base de données exportée en fin de simulation, nous retrouvons les mêmes axes les plus fréquentés que dans les simulations précédentes, à savoir ceux situés au centre desservant le territoire d'est en ouest. Il est intéressant de noter que ces axes correspondent pour la plupart aux voies rapides et à l'autoroute urbaine de Dakar (cf. illustration 130).



Illustration 130 : les principaux axes de desserte observés dans les simulations sur le réseau de Dakar.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Synthèse

Le modèle mixte *Informel* offre un service intermédiaire entre le *Clandos* (qui est très rentable et de faible qualité pour les clients) et le modèle *Cooperation* qui est un service correct pour les trois approches. En résulte donc un modèle relativement équilibré entre l'approche clients et territoire, avec une bonne efficacité côté opérateur. Toutefois, nous ne pensons pas que la combinaison des modèles crée une réelle complémentarité entre les services. Nous avons d'ailleurs constaté qu'avec le nombre réduit de véhicules coopérants, le modèle entrait plus rapidement en état de saturation et perdait considérablement en efficacité.

3.3.3 Modèle mixte *Flexible*

Le modèle *Flexible* est composé de 6 *Modulobus* et de 6 véhicules coopérants. Nous rappelons ci-dessous les caractéristiques clés des modèles.

Modèle mixte <i>Flexible</i>			
<i>Modulobus</i>		<i>Cooperation</i>	
Points forts : - très bonne qualité de service - très bonne stabilité	Point faible : faible performance opérateur	Point fort : - polyvalence - efficace en faible densité	Points faibles : faible capacité de monter en charge

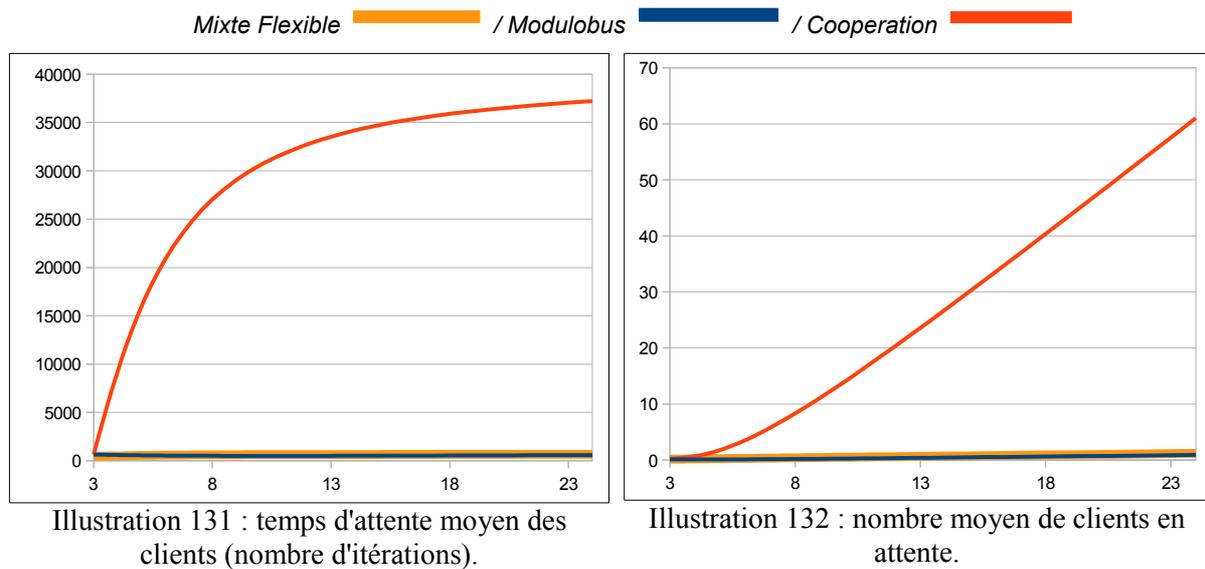
Tableau 36 : composition du modèle mixte *Flexible*.

Globalement, ce modèle présente des résultats très proches sur les deux réseaux. Toutefois, certains indicateurs sont légèrement meilleurs sur le réseau d'Avignon. Nous allons donc le prendre en exemple. Comme nous allons le voir, la quasi-totalité des indicateurs est très proche de ceux du modèle *Modulobus*. Nous expliquons ci-dessous les différences observées.

Réponse aux clients

Concernant l'approche clients (cf. illustration 131 et 132), nous constatons que les résultats sont excellents, et identiques à ceux du *Modulobus*. Cela nous donne l'impression que les véhicules coopératifs n'ont eu aucune influence sur le modèle. Plus étonnant encore, nous simulons deux fois moins de véhicules *Modulobus* dans le modèle mixte et cela ne semble pas non plus avoir d'influence sur la qualité de service.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport



Compétition et complémentarité des opérateurs

Pour l'approche opérateur, nous constatons sur l'illustration 133 que le taux de chargement du modèle mixte est légèrement supérieur à celui du *Modulobus*, notamment en faible densité. Cependant, il demeure inférieur au modèle *Cooperation* pour les trois simulations.

Nous constatons aussi que le VPK (cf. illustration 134) du modèle mixte est inférieur aux deux autres modèles. En forte densité, notamment, on observe un VPK de 1,78 pour le modèle mixte, 1,88 pour le *Modulobus*, et 2,05 pour le *Cooperation*. Même si ces écarts peuvent paraître assez faibles, ils sont en réalité révélateurs. Le VPK est en effet un des indicateurs les plus stables. Pour justifier notre propos, nous avons exécuté 10 simulations avec exactement les mêmes conditions (réseau d'Avignon en forte densité) et pour chaque modèle nous avons observé un coefficient de variation du VPK inférieur à 1 %. Cela signifie donc que les écarts observés entre les trois modèles sont significatifs. Cette observation est importante, car elle signifie que les modèles sont légèrement en compétition ou du moins que le fonctionnement de l'un nuit légèrement aux performances de l'autre. Pourtant, en observant les indicateurs des deux types de véhicules dans les simulations mixtes, nous constatons que les VPK des deux services (simulés en simultanément) sont très proches (écart < 0,1).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Mixte Flexible / Modulobus / Cooperation

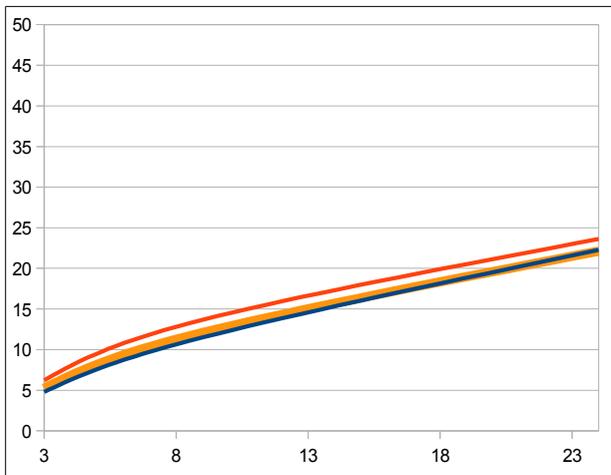


Illustration 133 : taux de chargement (%).

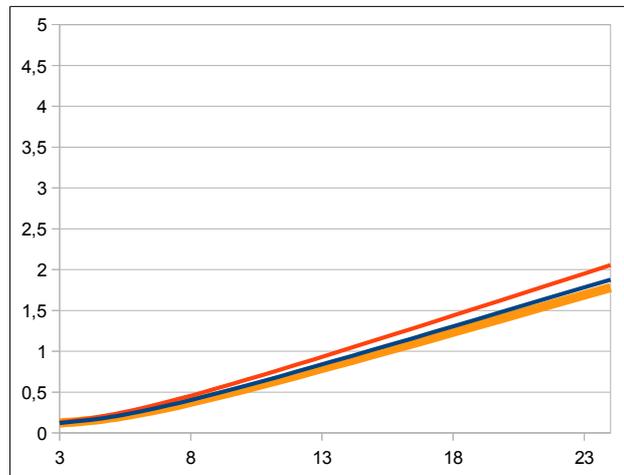


Illustration 134 : voyageurs par kilomètres (VPK).

Cette compétition entre les deux systèmes peut s'expliquer de la manière suivante. Le modèle *Modulobus* encourage les clients à se déplacer. Par conséquent, un véhicule coopératif peut marquer une station avec des clients en attente alors que certains d'entre eux vont par la suite changer d'emplacement. La station marquée peut donc être vide ou avec très peu de clients en attente lors du passage du véhicule. De la même manière, nous savons que, par défaut, les deux types de véhicules circulent de manière aléatoire sur le réseau. Il est donc possible que les véhicules coopératifs prennent régulièrement en charge des clients qui se déplaçaient vers des *Modulobus*, ce qui compromet le principe de regroupement du service.

Analyse spatiale

L'illustration 135 nous montre que la proportion de stations avec des clients en attente est sensiblement supérieure avec le modèle mixte qu'avec le *Modulobus*. Elle reste tout de même inférieure au modèle *Cooperation*. Contrairement à l'approche client, les véhicules coopératifs ont ici une influence. Ils font baisser la capacité d'exploration des modèles. Le taux de desserte (cf. illustration 136) est très bon pour l'ensemble des simulations. Grâce à la mixité, le modèle flexible semble bénéficier des atouts des deux modèles sans en subir les points faibles. Il est aussi bon que le modèle *Cooperation* en faible densité (modèle le plus performant dans ces conditions) et demeure équivalent au modèle *Modulobus* en moyenne et forte densité.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

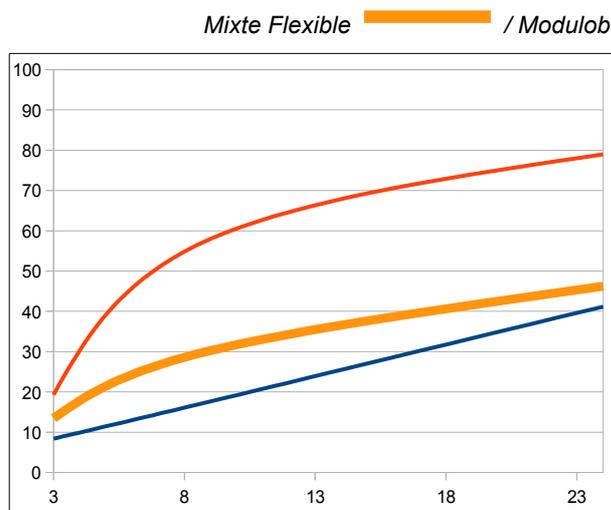


Illustration 135 : proportion de stations avec des clients en attente (%).

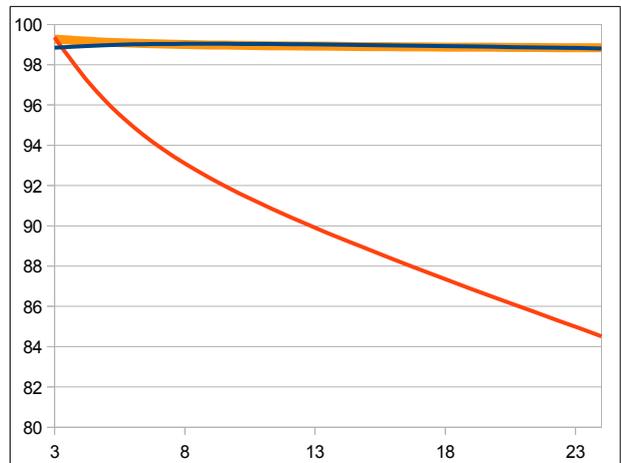


Illustration 136 : taux de desserte (%).

Concernant la hiérarchie des axes selon leur trafic routier (cf. illustration 138), nous remarquons assez peu de différence entre les trois modèles. D'après l'observation des animations, les modèles *Cooperation* et *Modulobus* offrent tous les deux les meilleures couvertures spatiales (homogénéité spatiale des flux). Il en va de même pour le modèle mixte. Le trafic routier est relativement homogène sur le réseau à l'exception de quelques axes qui se démarquent par leur forte fréquentation, notamment ceux en bordure de zones de vides (cf. illustration 137).



Illustration 137 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité.

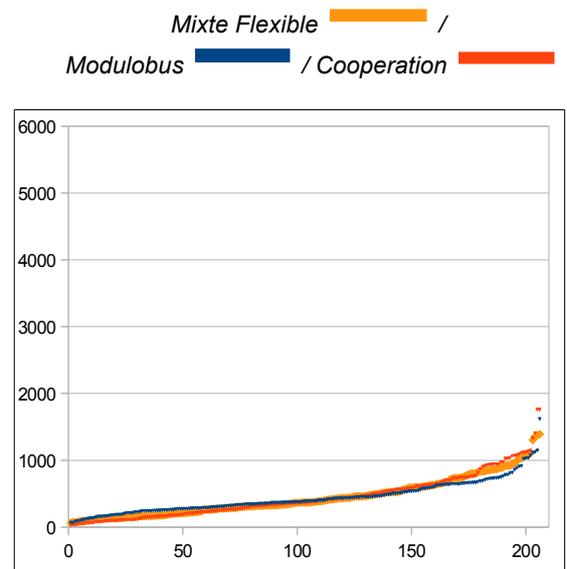


Illustration 138 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau d'Avignon).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Ces axes très fréquentés correspondent au boulevard Limbert, au boulevard Saint Roch, à la route de Lyon, à l'avenue Saint Ruff et à l'avenue Pierre Semard qui sont des tronçons également très fréquentés dans la réalité, notamment en heure de pointe (cf. illustration 139). Seule l'avenue de Colshester (en vert) apparaît comme très fréquentée dans nos simulations alors qu'elle ne constitue pas vraiment un axe majeur dans la réalité. C'est probablement sa position topologique sur le réseau qui induit cet état.



Illustration 139 : les principaux axes de desserte observés dans les simulations sur le réseau d'Avignon.

Synthèse

Le modèle mixte *Flexible* présente un cas intéressant où les deux services semblent être plus en compétition qu'en complémentarité. Nous avons vu grâce au VPK que les deux types de véhicule pouvaient se gêner pendant leur tournée. Le seul apport de la mixité concerne le taux de desserte, mais les différences sont minimes (les résultats pour le *Modulobus* et le *Cooperation* étant déjà individuellement très bons). Au vu de ces résultats, le modèle *Flexible* ne semble pas constituer un apport considérable. La mixité nuit à l'approche opérateur sans pour autant apporter de gain considérable dans les autres approches, notamment en comparaison avec le *Modulobus* seul.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

3.3.4 Modèle mixte *Régulier*

Le modèle *Régulier* est composé de 6 *Clandos* et de 4 bus répartis sur deux lignes. Nous rappelons ci-dessous les caractéristiques clés des modèles.

Modèle mixte <i>Régulier</i>			
<i>Clandos</i>		<i>Bus</i>	
Point fort : - efficacité de regroupement - très bonnes performances opérateur	Points faibles : très faible qualité de service	Point fort : bonnes performances opérateur en forte densité	Points faibles : - faible qualité de service - desserte spatiale limitée

Tableau 37 : composition du modèle mixte *Régulier*.

Le modèle mixte *Régulier* ne semble pas être particulièrement meilleur sur l'un des deux réseaux. Pour certains indicateurs, comme le VPK, il est légèrement plus performant sur le réseau de Dakar, alors que pour d'autres, comme le taux de desserte, il est un peu meilleur sur le réseau d'Avignon. Pour illustrer ce constat, nous utiliserons les résultats acquis avec le réseau de Dakar car le modèle *Clandos* est un peu meilleur sur ce réseau et il nous semble intéressant d'analyser maintenant le fonctionnement du modèle *Bus*, sur le réseau de Dakar (celui d'Avignon ayant été analysé précédemment avec le modèle mixte formel).

Réponse aux clients

Comme nous le savons, les modèles *Bus* et *Clandos* sont les modèles les moins performants concernant l'approche client. Le modèle mixte régulier affiche donc également de mauvais résultats, presque identiques à ceux du *Bus* comme nous pouvons le remarquer sur les illustrations 140 et 141.

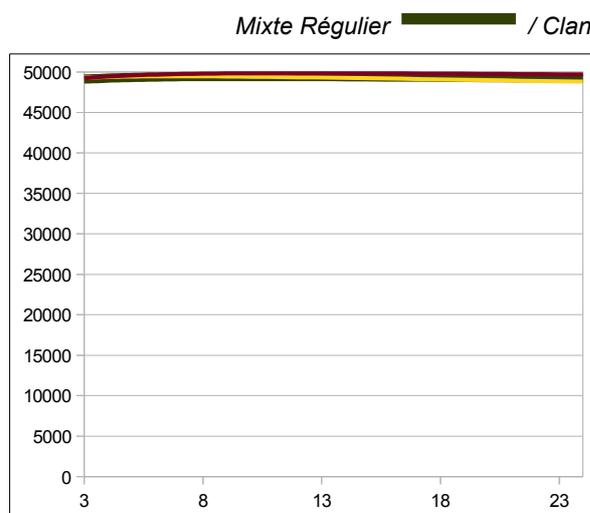


Illustration 140 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).

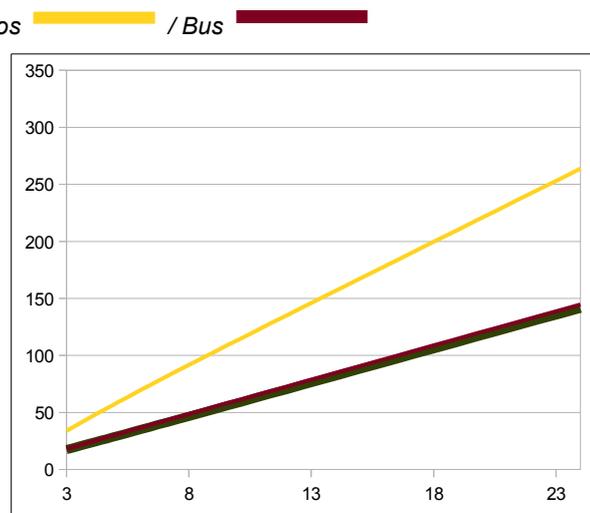


Illustration 141 : nombre moyen de clients en attente.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Compétition et complémentarité des opérateurs

Concernant l'approche opérateur (cf. illustration 142 et 143), nous constatons cette fois-ci que les résultats du modèle mixte sont intermédiaires à ceux des deux autres modèles. Ils demeurent toujours un peu plus proches du modèle *Bus*. Bien qu'opérant sur certains axes routiers, ces deux modèles ne semblent donc pas interférer lorsqu'ils sont simulés en simultanément.

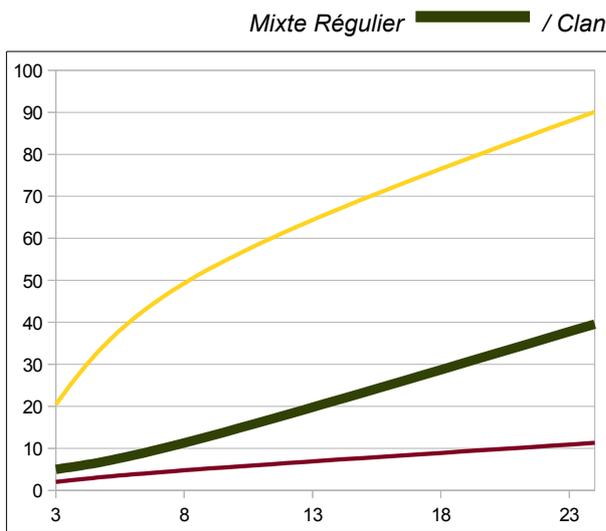


Illustration 142 : taux de chargement (%).

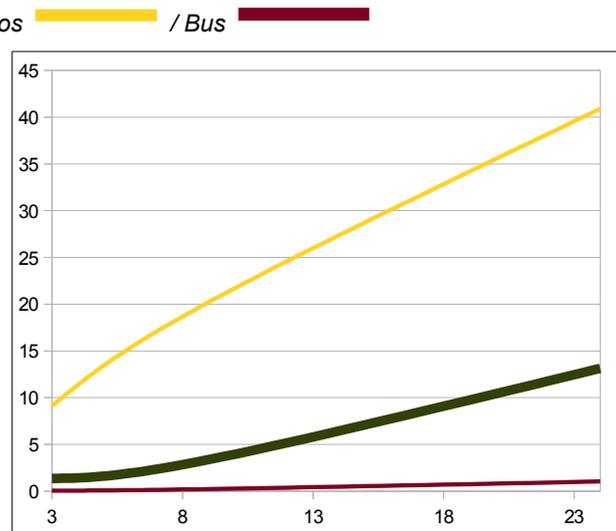


Illustration 143 : voyageurs par kilomètres (VPK).

Analyse spatiale

Concernant l'approche spatiale, nous constatons une fois de plus que les indicateurs du modèle mixte sont très proches de ceux du bus. Les *Clandos* ne semblent pas vraiment améliorer l'exploration de l'espace malgré leur légère flexibilité spatiale.

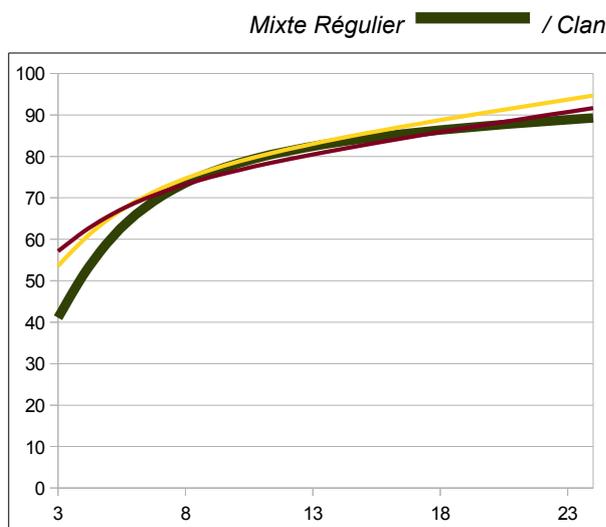


Illustration 144 : proportion de stations avec des clients en attente (%).

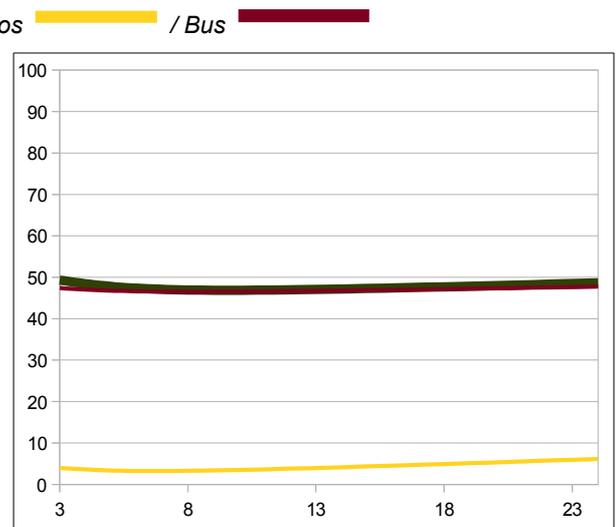


Illustration 145 : taux de desserte (%).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Concernant la hiérarchie des axes, nous pouvons voir sur l'illustration 146 que la combinaison des deux modèles ne semble pas non plus améliorer la couverture spatiale du service. La structure est identique au modèle *Bus* et seule la proportion des flux diminue (baisse de 1 000 passages environ). Cela s'explique simplement par le fait que dans le modèle mixte il y a trois fois moins de bus qui opèrent que dans le modèle *Bus* seul.

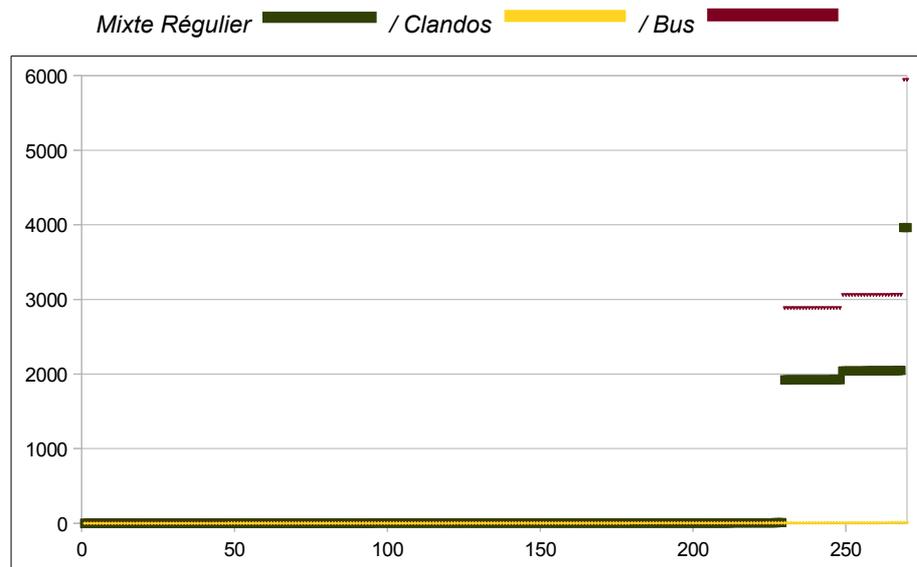


Illustration 146 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).

Synthèse

Nous avons choisi de tester ce modèle pour voir si des phénomènes de concurrence ou de complémentarité pouvaient apparaître entre deux systèmes de transport peu flexibles, voire réguliers. Au vu des résultats, nous pensons que ce modèle mixte ne présente pas d'intérêt particulier, du moins dans les conditions de simulation testées. Les deux types de véhicules fonctionnant en parallèle ne semblent pas interférer et le modèle ne présente pas de gain d'efficacité particulier, quelle que soit l'approche. Pour voir apparaître une complémentarité entre les deux systèmes, il aurait été nécessaire de placer les deux services en intermodalité comme c'est le cas dans la réalité. À Dakar par exemple, il existe une certaine intermodalité entre les taxis clandestins et les minibus TATA. Les garages de « clandos » se situent bien souvent à proximité des arrêts de bus ce qui permet aux clients de changer de modes rapidement. Cette intermodalité n'a pas été planifiée par les autorités, elle est typiquement auto-organisée.

3.3.5 Modèle mixte *France-Sénégal*

Le modèle mixte *France-Sénégal* est composé de 6 *Modulobus* et de 6 *Clandos*. Nous rappelons ci-dessous les caractéristiques clés des modèles.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Modèle mixte <i>France-Sénégal</i> (combinaison du système typique français et sénégalais)			
<i>Modulobus</i>		<i>Clandos</i>	
Points forts : - très bonne qualité de service - très bonne stabilité	Point faible : faibles performances opérateur	Point fort : - efficacité de regroupement - très bonnes performances opérateur	Points faibles : très faible qualité de service

Tableau 38 : composition du modèle mixte *France-Sénégal*.

De manière générale, ce modèle mixte est meilleur sur le réseau de Dakar. Bien que le modèle *Modulobus* présente des résultats très similaires d'un réseau à l'autre, le modèle *Clandos*, comme nous l'avons déjà constaté, présente de meilleurs résultats pour plusieurs indicateurs sur le réseau de Dakar. On constate donc que les relatives bonnes performances du *Clandos* sur ce réseau se retrouvent avec le modèle mixte. Nous utilisons donc les résultats obtenus sur le réseau de Dakar pour analyser le modèle.

Réponse aux clients

Concernant le temps moyen d'attente des clients (cf. illustration 147), nous observons des valeurs un peu plus élevées avec le modèle mixte qu'avec le *Modulobus*. Les résultats sont néanmoins significativement meilleurs qu'avec le modèle *Clandos* qui, comme nous le savons, entraîne un temps d'attente aux stations très important. On constate aussi que cet indicateur diminue avec l'augmentation de la densité des clients. Ce n'est pas la première fois que nous observons cette tendance avec un modèle mixte incluant le *Modulobus*. Cela s'explique par le fait qu'en faible densité, le *Modulobus* rencontre moins souvent des clients et donc transmet relativement rarement ses itinéraires via les *pushs*. Par conséquent, les clients vont rarement changer de station en cours de simulation, notamment ceux situés en bordure du territoire, ce qui fait mécaniquement augmenter le temps moyen d'attente.

A *contrario*, le nombre moyen de clients en attente (cf. illustration 148) du modèle mixte est identique à celui du *Modulobus*, qui est lui-même excellent en faible et en forte densité (< 5). En faible densité, le faible nombre de clients en attente et leur temps d'attente élevé montrent qu'au cours de ces simulations, seuls quelques clients restent bloqués à des stations tout au long de la simulation.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

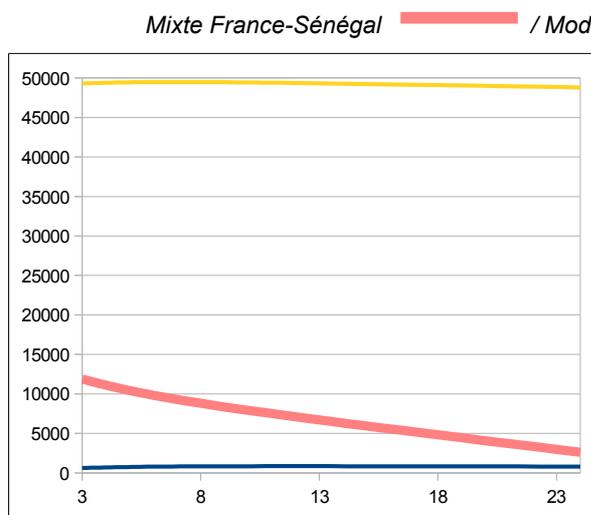


Illustration 147 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).

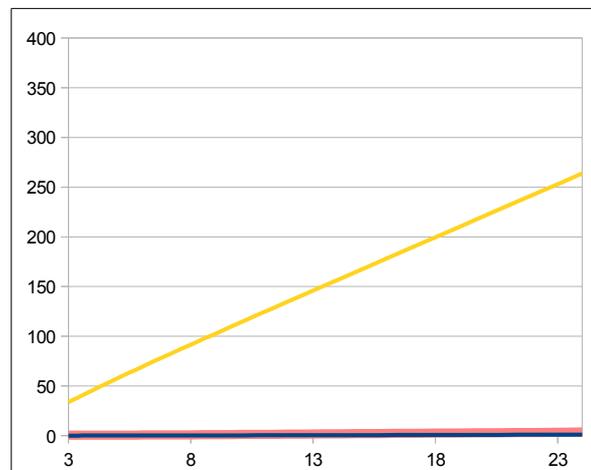


Illustration 148 : nombre moyen de clients en attente.

Compétition et complémentarité des opérateurs

Les résultats du modèle mixte obtenus dans cette approche sont intermédiaires à ceux des deux modèles de référence. Le modèle mixte semble légèrement plus proche du *Modulobus* que du *Clandos* comme le montre les illustrations 149 et 150. *A priori*, le fonctionnement du *Modulobus*, avec la circulation des clients au cours de la simulation, ne gêne pas le fonctionnement des *Clandos*. Toutefois, nous ne pouvons pas parler d'une réelle complémentarité entre les deux types de véhicules.

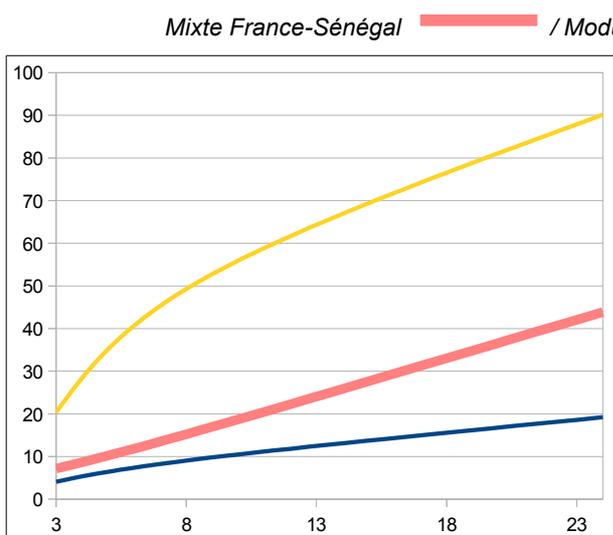


Illustration 149 : taux de chargement (%).

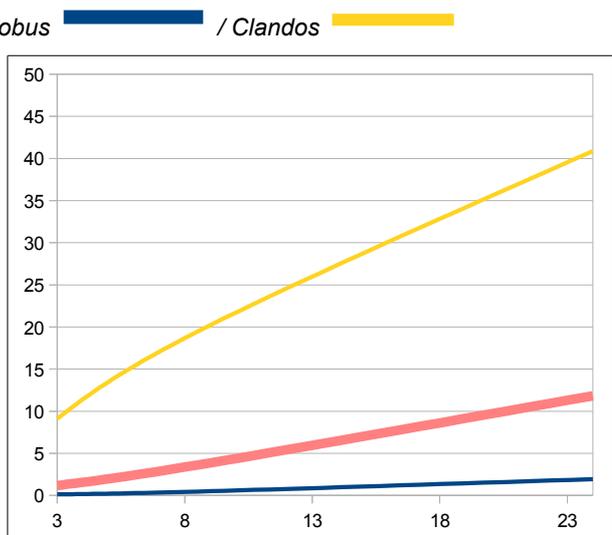


Illustration 150 : voyageurs par kilomètres (VPK).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Analyse spatiale

Concernant l'approche spatiale, les résultats sont mitigés. Nous remarquons que la proportion de stations avec des clients en attente (cf. illustration 151) du modèle mixte est intermédiaire aux deux autres modèles. Le taux de desserte (cf. illustration 152) est quant à lui très proche de celui du *Modulobus* (compris entre 97 % et 99%). Nous comprenons ainsi que la mixité permet de répondre à un nombre important de clients, mais qu'elle ne permet pas une desserte aussi homogène sur le territoire qu'avec le modèle *Modulobus* seul.

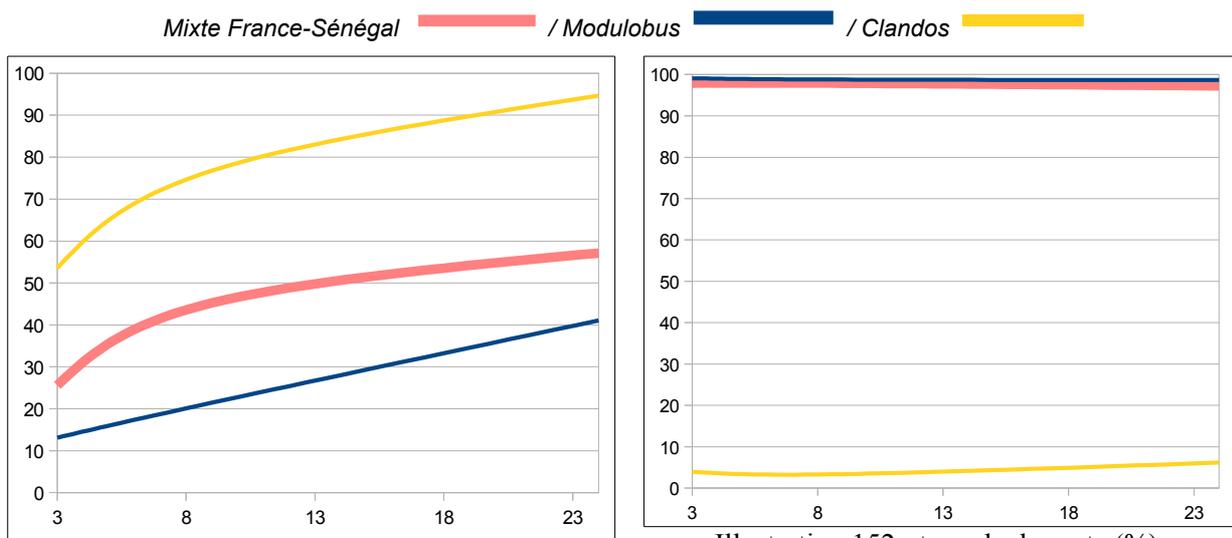


Illustration 151 : proportion de stations avec des clients en attente (%).

Illustration 152 : taux de desserte (%).

Du point de vue de la répartition des flux, nous constatons que la desserte est relativement homogène, notamment comparée aux précédents modèles (cf. illustration 154). Néanmoins, certains axes demeurent toujours très peu desservis et certaines stations sont systématiquement exclues de la desserte. On retrouve aussi les mêmes routes les plus fréquentées, à savoir les axes est-ouest situés au centre du réseau (cf. illustration 153).

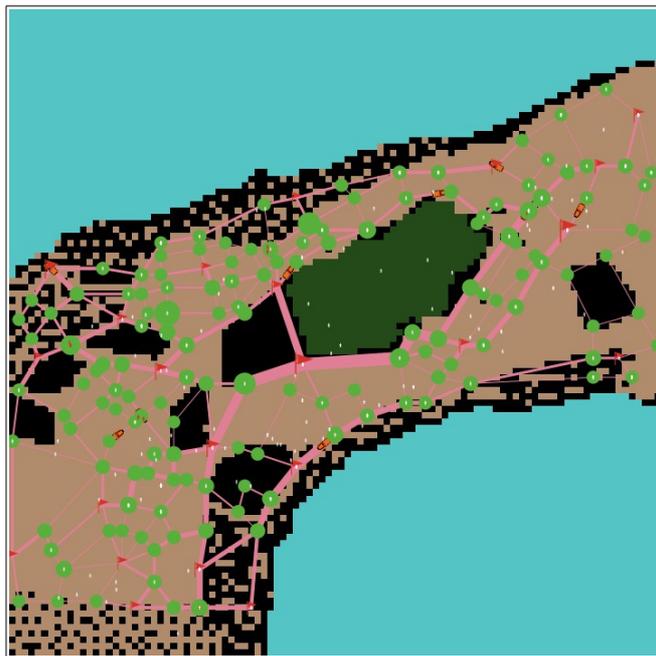


Illustration 153 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité.

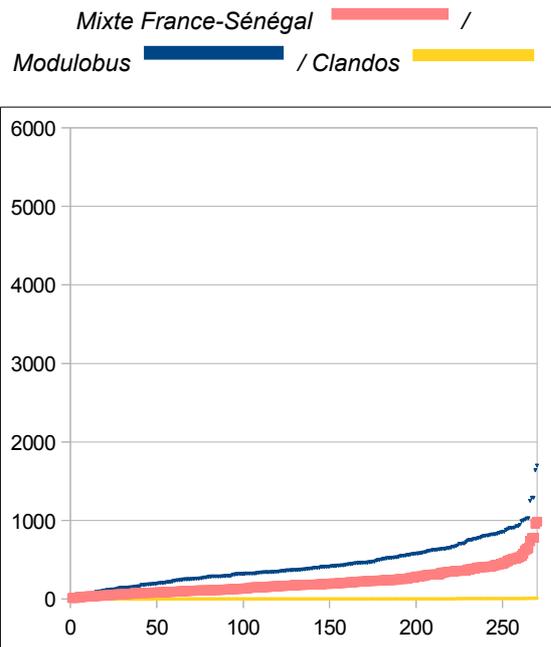


Illustration 154 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).

Synthèse

La simulation simultanée du *Modulobus* et du *Clandos* ne nous a pas permis d'obtenir de meilleures performances que les deux modèles pris séparément. Néanmoins, les deux modèles apparaissent complémentaires (l'un privilégiant l'approche opérateur et l'autre l'approche client). Leur combinaison nous donne *in fine* un modèle intéressant, car équilibré sur les trois approches. L'absence de phénomène de concurrence dans nos simulations s'explique par le fait que les deux modèles sont très différents du point de vue de leur fonctionnement. En effet, le *Modulobus* est basé sur le déplacement en continu des véhicules et sur l'interaction dynamique entre les clients et les véhicules. Le *Clandos* est lui basé sur la minimisation des déplacements et sur l'adaptation des clients au service. Le fait que des clients changent de station pour rejoindre un *Modulobus* peut être bénéfique pour les *Clandos*. Cela renouvelle en permanence les clients en attente aux stations et donc augmente les chances de trouver des clients avec une même destination.

3.3.6 Modèle Hybride

Le principe du modèle *Hybride* est de changer le comportement des agents « véhicules » dynamiquement au cours des simulations, en fonction d'un ou plusieurs critères. Nous l'avons conçu en associant le modèle *Clandos* (favorisant l'approche opérateur), le modèle *Cooperation* (le plus équilibré sur les trois approches) et le *Modulobus* (modèle le plus performant pour l'approche clients). Autrement dit, nous utilisons deux modèles diamétralement opposés et un modèle intermédiaire. L'enjeu est alors de trouver un point d'équilibre entre ces trois modèles types.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

À l'état initial, le modèle hybride est en état de *Clandos*. La densité de clients est faible, car nous sommes en début de simulation ce qui permet aux véhicules d'éviter de rouler à vide. Au-delà d'un certain seuil de clients en attente, les véhicules prennent l'état de *Coopération*. Cela permet de commencer à explorer le réseau et de ralentir l'accumulation des clients aux stations. Au-delà d'un second seuil, les véhicules prennent l'état de *Modulobus* ce qui permet un drainage important sur le territoire, mais qui entraîne également une baisse des indicateurs de l'approche opérateur. Selon la densité de clients générée, le modèle peut ensuite ré-basculer en état de *Coopération* voire même de *Clandos*, et ce autant de fois que nécessaire (cf. illustration 155).

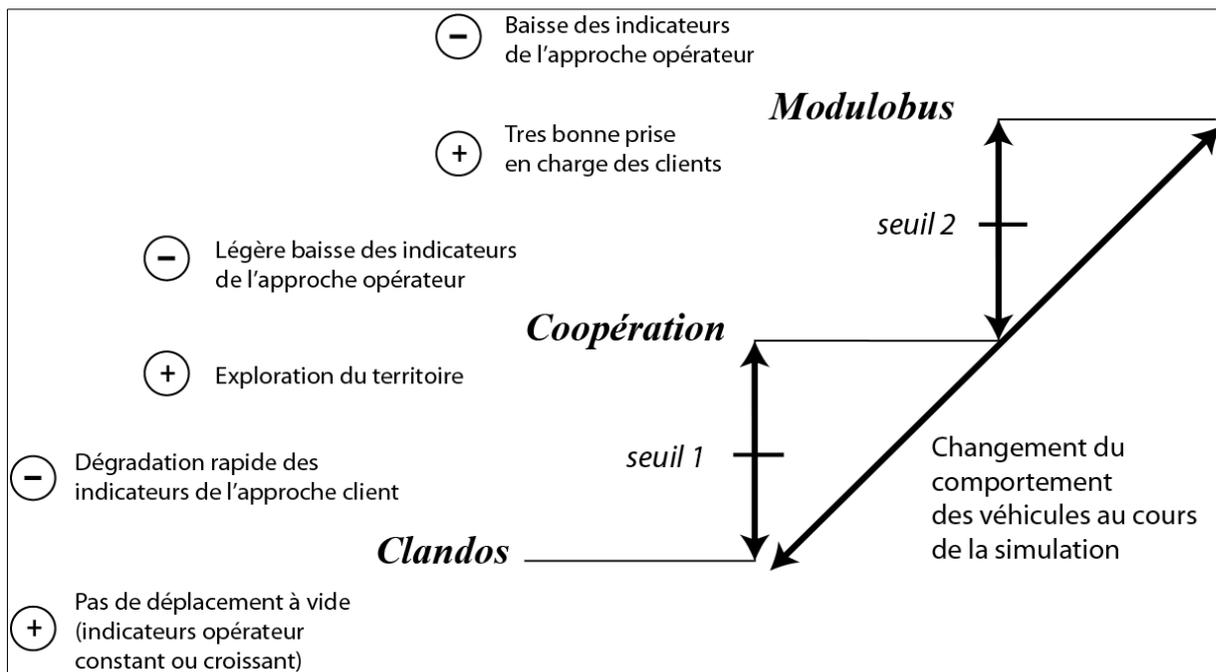


Illustration 155 : principe d'hybridation des trois modèles.

Recherche des critères d'hybridation et de calibration du modèle

Comme nous l'avons vu dans ce dernier chapitre, les approches clients et opérateur sont parfois contradictoires. Un modèle affichant de très bonnes performances opérateurs entraîne généralement une faible qualité de service et réciproquement. Par conséquent, il nous a paru intéressant de chercher un compromis entre ces deux approches. C'est l'objectif que nous nous sommes fixé avec le modèle hybride. Les critères d'hybridation sont très dépendants de l'objectif que l'on donne au modèle. Dans notre cas, nous avons calibré le service de manière à ce qu'il soit (i) résistants aux variations de densité de clients (bonne stabilité des indicateurs), (ii) tout en offrant une qualité de service satisfaisante, (iii) sans trop détériorer les performances de l'approche l'opérateur.

Le modèle a été calibré empiriquement selon 4 phases de simulation. Pour chacune d'entre elles, nous avons simulé le service dans les mêmes conditions que les systèmes mixtes. Nous avons pu ainsi comparer les performances et modifier les critères d'hybridation, afin de nous rapprocher toujours un peu plus de l'objectif visé. Nous résumons ici ces quatre phases de calibration.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Phase 1

Dans un premier temps, nous avons choisi comme critères le VPK qui nous semble être l'indicateur le plus révélateur de l'approche opérateur et le nombre de clients actifs dans la simulation pour l'approche clients. Le temps d'attente des clients nous a en effet paru trop sensible et trop variable, alors que le nombre moyen de clients en attente aux stations nous a paru trop lissé et trop imprécis (principe même de la moyenne). À ce stade, nous avons défini trois versions du modèle hybride, basées sur les mêmes critères, mais avec des valeurs différentes pour chacun des critères. Ces trois versions de modèle sont basées sur les critères suivants :

1. Critères privilégiant la qualité de service :
 - le modèle reste en état de *Clandos* tant que le nombre de clients actifs est inférieurs à 300 ou (exclusif) que le VPK est inférieur à 0,8 ;
 - au-delà, le modèle passe en état de *Cooperation* ;
 - si le nombre de clients actifs dans la simulation dépasse 500, les véhicules prennent alors l'état de *Modulobus*.
2. Critères intermédiaires :
 - le modèle reste en état de *Clandos* tant que le nombre de clients actifs est inférieurs à 1000 ou (exclusif) que le VPK est inférieur à 1,5 ;
 - au-delà, le modèle passe en état de *Cooperation* ;
 - si le nombre de clients actifs dans la simulation dépasse 1500, les véhicules prennent alors l'état de *Modulobus*.
3. Critères privilégiant l'approche opérateur :
 - le modèle reste en état de *Clandos* tant que le nombre de clients actifs est inférieurs à 1500 ou (exclusif) que le VPK est inférieur à 5 ;
 - au-delà, le modèle passe en état de *Cooperation* ;
 - si le nombre de clients actifs dans la simulation dépasse 2000, les véhicules prennent alors l'état de *Modulobus*.

Après étude des résultats, nous avons constaté que les performances chutaient considérablement en faible densité comme le montrent les illustrations 156 et 157, notamment pour les versions 2 (courbe verte) et 3 (courbe mauve). Or notre objectif est de fournir un service robuste et efficace aussi bien en forte qu'en faible densité. Par conséquent, nous avons conservé les critères de la première version la plus stable (courbe en bleu clair sur les graphiques), mais qui présente un VPK relativement faible.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Version 2 : — / Version 1 : — / Version 3 : —

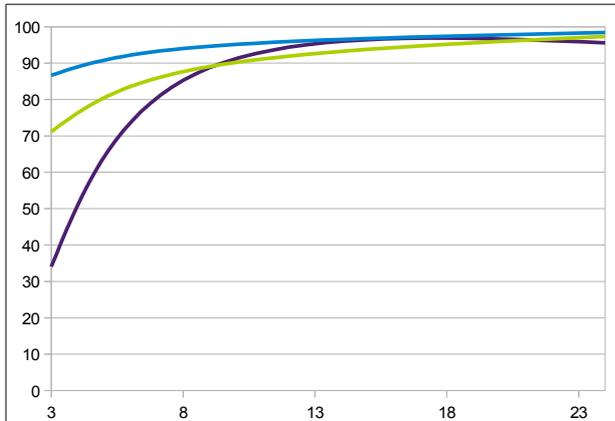


Illustration 156 : taux de desserte (%).

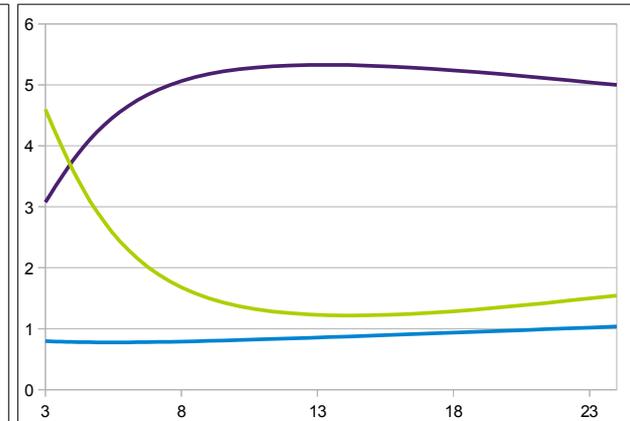


Illustration 157 : voyageurs par kilomètres (VPK).

Phase 2

Dans la seconde phase, nous avons essayé de conditionner le passage entre le *Clandos* et le *Cooperation* avec le VPK uniquement, en gardant à peu près les mêmes valeurs que pour le cas précédent. Nous nous sommes rendu compte que ce principe engendrait des fluctuations beaucoup trop importantes sur l'ensemble des indicateurs, comme nous pouvons le voir sur l'illustration 158. Il nous a paru difficile de caractériser de manière pertinente un modèle aussi instable, c'est pourquoi nous avons essayé de trouver de nouveaux critères.

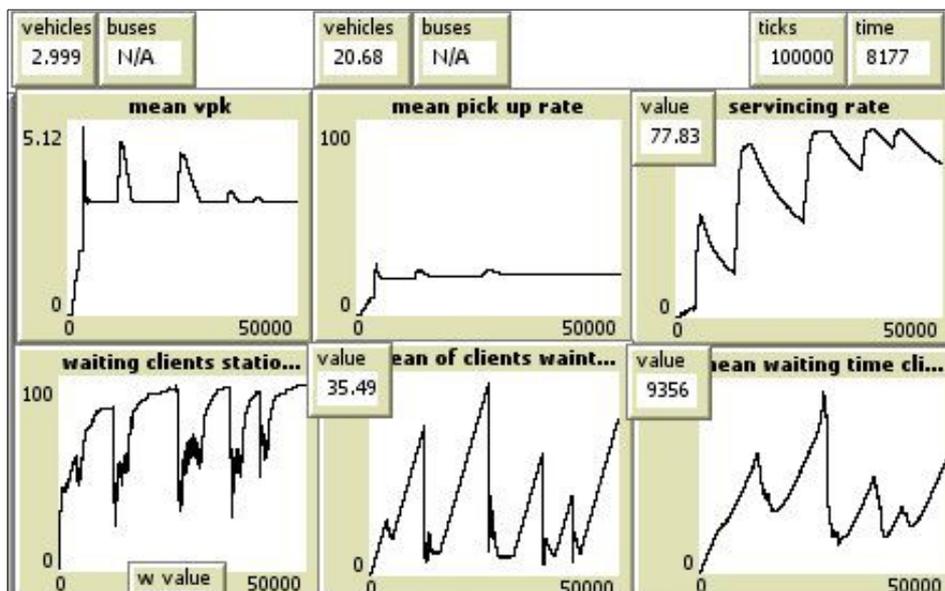


Illustration 158 : capture d'écran des graphiques mis à jour dynamiquement sur l'interface de simulation (modèle hybride phase2 en moyenne densité).

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

Phase 3

Pour la troisième phase, nous avons choisi de conditionner le passage entre les différents modèles avec un seul et même critère, à savoir le nombre de clients actifs au cours de la simulation. Avec cette méthode, le modèle est devenu beaucoup plus stable à l'exception du temps d'attente des clients aux stations que nous n'arrivons pas à stabiliser (cf. illustration 159).

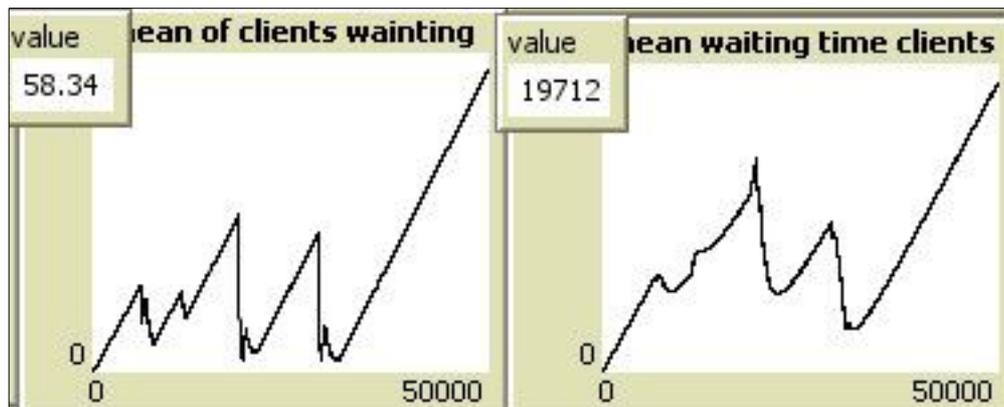


Illustration 159 : nombre moyen de clients en attente aux stations et temps d'attente des clients (modèle hybride phase 3 en moyenne densité).

Phase 4

Enfin, pour stabiliser le temps d'attente des clients aux stations, nous l'avons intégré aux conditions, ce qui nous donne finalement les critères suivants :

- le modèle reste en état de *Clandos* tant que le nombre de clients actifs est inférieurs à 800 ;
- au-delà, le modèle passe en état de *Cooperation* ;
- si le nombre de clients actifs dans la simulation dépasse 1400 ou si le temps d'attente moyen des clients dépasse les 6000 itérations, les véhicules prennent l'état de *Modulobus*.

Au vu des résultats acquis pour la trentaine de simulations réalisées, ces critères nous semblent les mieux adaptés à nos objectifs, à savoir proposer un modèle robuste et relativement équitable entre les clients et l'opérateur. C'est ce que nous allons vérifier avec les analyses suivantes.

Réponse aux clients

Un premier point positif pour le modèle hybride est qu'il présente des performances très proches d'un réseau à l'autre. Il semble donc peu sensible à la configuration spatiale. Les résultats présentés ici concernent le réseau de Dakar.

Malgré tous nos efforts, nous constatons sur l'illustration 160 que le temps d'attente des clients n'est pas parfaitement stable sur les trois niveaux de densité simulés. Nous observons un écart d'environ 10 000 itérations entre le cas de faible et de moyenne densité. Toutefois, les résultats sont à la fois bien plus stables et bien meilleurs que pour les modèles *Cooperation* et

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Clandos. L'indicateur se rapproche d'ailleurs sensiblement du modèle *Modulobus*, ce qui est un point positif.

Concernant le nombre moyen de clients en attente aux stations (cf. illustration 161), nous observons cette fois-ci une courbe parfaitement stable et très proche du minimum observé. En ce sens, nous pouvons dire que le modèle hybride offre une bonne qualité de service comparé aux trois modèles de référence.

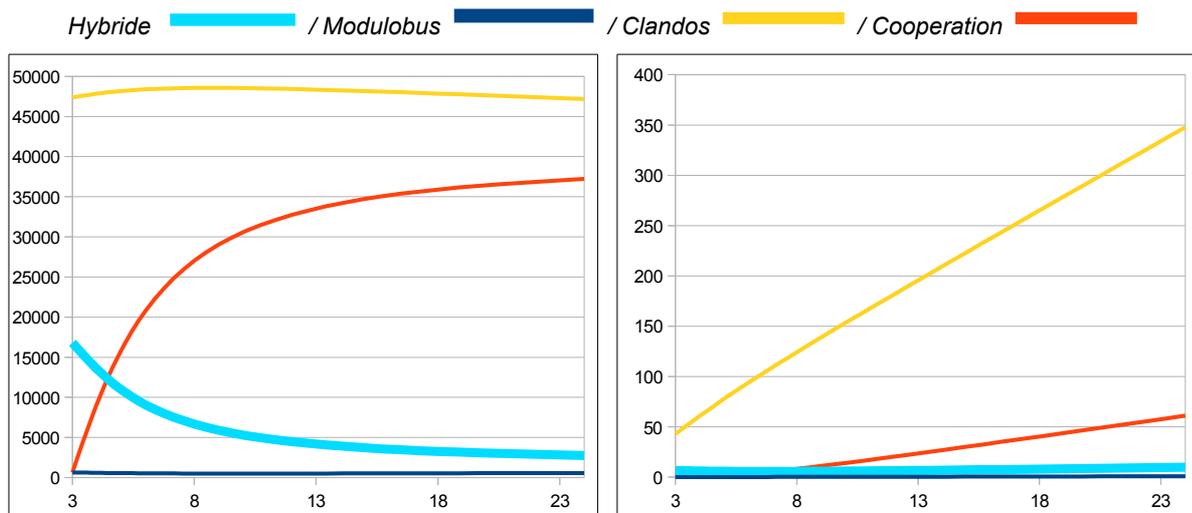


Illustration 160 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).

Illustration 161 : nombre moyen de clients en attente.

Approche opérateur

Concernant l'approche opérateur, nous observons des indicateurs plutôt stables sur l'ensemble des simulations. Le taux de chargement varie entre 17 % et 24 % et le VPK varie entre 3,5 et 2,1 (cf. illustration 162 et 163). Il est intéressant de noter que ces deux indicateurs sont meilleurs en faible densité plutôt qu'en forte densité, contrairement aux trois autres modèles. Cela s'explique par le fait qu'en faible densité, les véhicules fonctionnent bien plus souvent en état de *Clandos* qu'en forte densité. Nous insistons également sur le fait que les résultats obtenus pour ces deux indicateurs sont meilleurs que ceux du *Modulobus* et du modèle *Cooperation*. L'hybridation apporte donc un gain d'efficacité à ce niveau même si les performances sont bien en dessous de celles du *Clandos*.

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

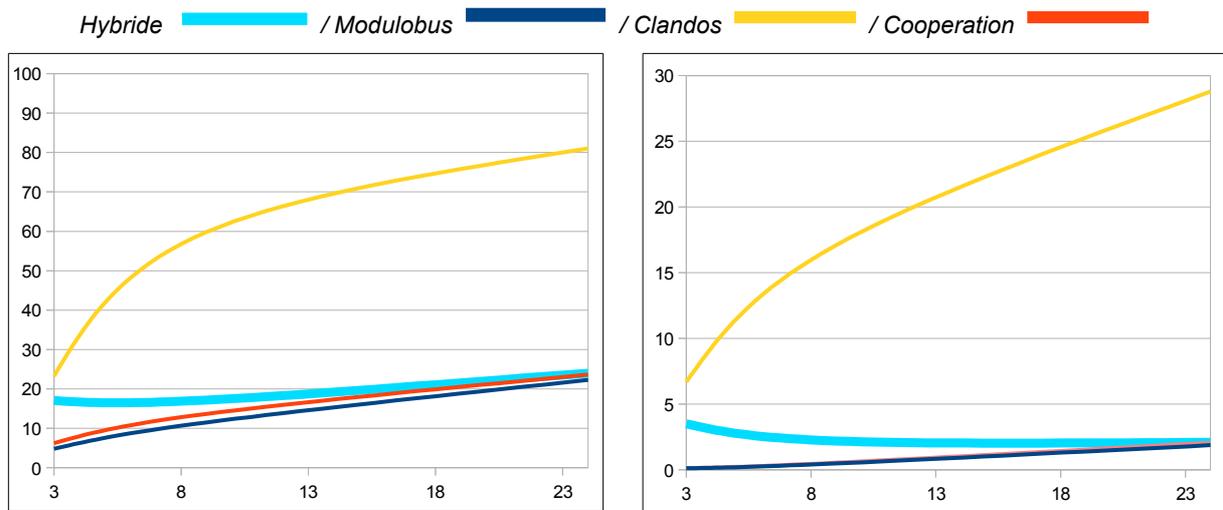


Illustration 162 : taux de chargement (%).

Illustration 163 : voyageurs par kilomètres (VPK).

Analyse spatiale

Le plus gros point faible du modèle *Hybride* est sans aucun doute sa faible capacité d'exploration du réseau. Comme nous pouvons le constater sur l'illustration 164, la proportion de stations avec des clients en attente est bien plus élevée que celle des trois autres modèles (près de 70 %) en faible densité et elle est à peine meilleure que celle du *Clandos* en forte densité. Concernant le taux de desserte (cf. illustration 165), les résultats sont peu stables et surtout assez médiocres en faible densité.

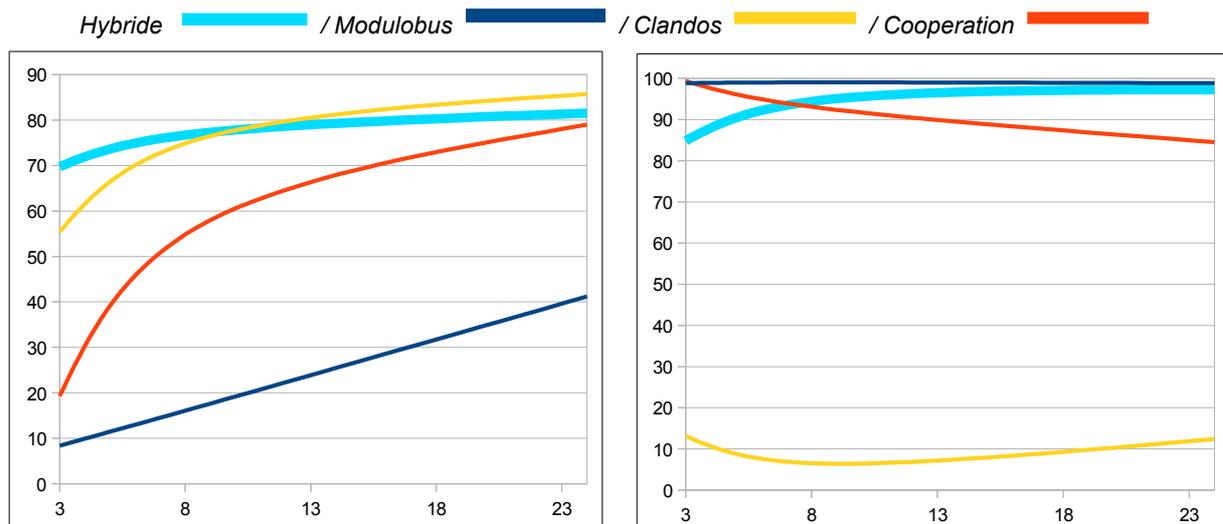


Illustration 164 : proportion de stations avec des clients en attente (%).

Illustration 165 : taux de desserte (%).

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

L'analyse des flux (cf. illustration 166), montre que le modèle hybride offre une desserte relativement homogène sur le réseau. Ce constat est quelque peu contradictoire avec les résultats précédents. Nous savons notamment que le taux de stations avec des clients en attente est resté élevé pour les trois niveaux de densité. Il se pourrait donc que les véhicules desservent assez bien l'ensemble, mais sans réussir à vider les stations situées en périphérie du réseau ou sur des espaces enclavés et contraignants pour le service.

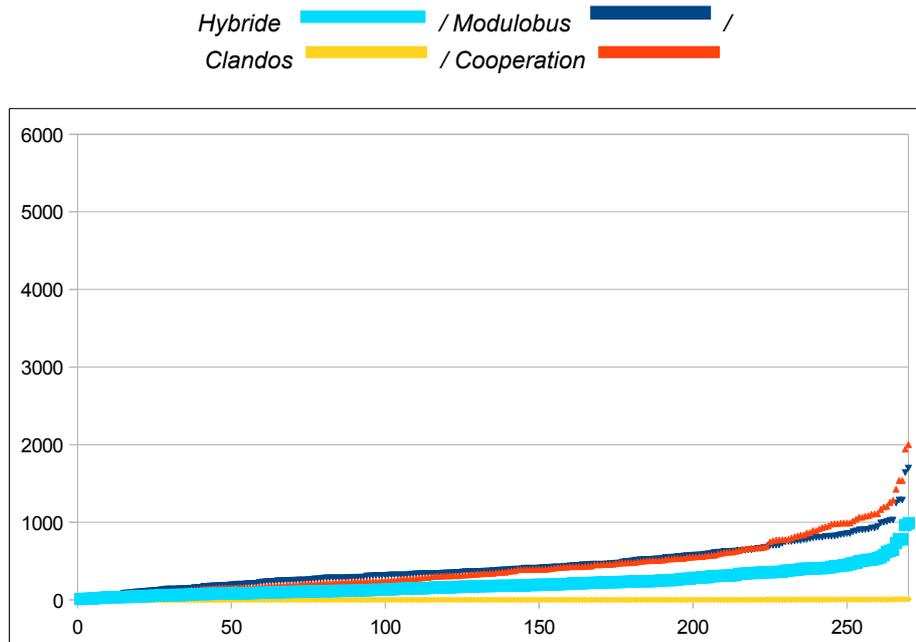


Illustration 166 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).

Synthèse

In fine, nous pensons que l'hybridation des modèles est un moyen intéressant d'obtenir des performances équilibrées et surtout peu sensibles aux conditions de simulation (forme du réseau, configuration spatiale, densité de clients, etc.). Cela constitue bien évidemment son point fort, même si pour certains indicateurs, il n'est pas aussi stable que le *Modulobus*. Nous avons vu qu'il était très difficile d'obtenir des bons résultats sur l'ensemble des 6 indicateurs. Le modèle tel qu'il a été calibré dans cette recherche présente, par exemple, des proportions de stations avec des clients en attente encore beaucoup trop élevées. Pour contrer ces points faibles, il nous semble nécessaire d'enrichir le modèle en faisant varier automatiquement les critères d'hybridation en fonction des conditions de simulation. Par exemple, nous avons vu que le modèle hybride avait cette particularité de présenter de meilleures performances opérateur en faible plutôt qu'en forte densité. Il serait alors possible de faire baisser les seuils de changement d'état des véhicules en fonction du nombre de clients créés périodiquement. Cela permettrait d'activer un peu plus souvent le *Cooperation* et le *Modulobus*, et de bénéficier d'indicateurs encore un peu plus stables. Cela nous permettrait également d'éviter les mauvais résultats tels que le temps d'attente des clients et le taux de desserte obtenus en faible densité.

3.4 Synthèse

Pour conclure cette troisième et dernière phase, nous revenons sur nos deux hypothèses de départ. Nous résumons d'abord les phénomènes de compétition et de complémentarité observés. Nous établissons ensuite une typologie des 6 modèles composés à l'aide de trois diagrammes en étoile. Le but est de mettre en exergue les spécificités de chacun d'entre eux, puis de révéler les systèmes les plus typés et les plus intéressants à l'issue de cette recherche.

Compétition et complémentarité des modèles

En réponse à l'hypothèse H.9, nous proposons de regrouper les principes d'interaction observés selon trois cas de figure.

Pour le premier cas, les véhicules ne semblent pas vraiment interagir au cours de la simulation. Pourtant, nous constatons une amélioration sur un ou plusieurs indicateurs. C'est le cas du modèle *Formel* qui est presque aussi bon que le *Modulobus* pour les approches clients et territoire, tout en étant supérieur aux deux modèles de référence pour l'approche opérateur. Il existe donc bien une complémentarité entre les deux modèles : la mixité constitue un apport d'efficacité pour le système.

Dans un deuxième cas, nous observons une interaction entre les deux types de véhicule, mais cette dernière nuit aux performances générales du système. Cela a été le cas pour le modèle *Flexible* qui a affiché des résultats similaires au *Modulobus* pour la majorité des indicateurs, mais avec des performances légèrement moins bonnes que les deux modèles de référence pour l'approche opérateur. Dans ce cas précis, le fonctionnement d'un type de véhicule nuit aux performances de l'autre : ils sont alors en compétition.

Enfin, pour les modèles *Régulier*, *Informel* et *France-Sénégal*, nous n'avons pas pu déceler de véritables phénomènes de compétition ou de complémentarité. Nous pensons que les véhicules interagissent au cours de la simulation, mais il ne nous a pas été possible d'évaluer l'incidence de cette interaction sur les performances du système. Toutefois, nous savons que pour ces trois modèles, la mixité crée un certain équilibre entre les trois types d'opérateur. Par exemple, le modèle *France-Sénégal* apparaît un peu moins bon que le *Modulobus* sur les deux approches clients et opérateurs, mais il est en revanche meilleur sur l'approche opérateur (sans pour autant atteindre les performances du *Clandos*). Pour ce cas de figure, l'apport de la mixité ne peut être évaluée qu'en comparaison avec l'objectif fixé. Par exemple, souhaitons-nous offrir un service équilibré, polyvalent et robuste, ou au contraire cherchons-nous un système spécialisé et très performant pour une des trois approches ou pour un type de territoire ?

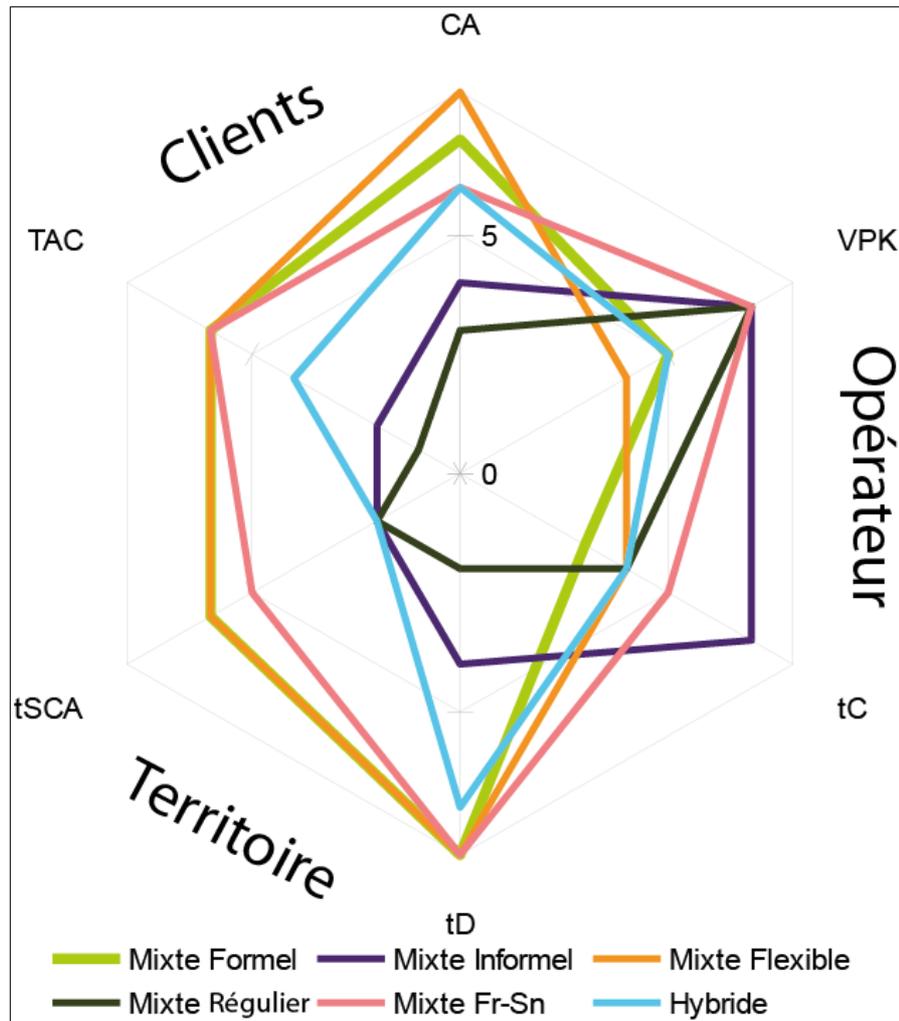
Typologie des modèles composés

En introduction du troisième chapitre, nous avons aussi fait l'hypothèse (H. 10) que le modèle composé le plus performant serait le modèle *Flexible*. C'est en effet le système qui regroupe les deux modèles les plus efficaces, qui, par sa souplesse, semble pouvoir s'adapter à tout type de réseau et de configuration spatiale. Or, nous venons d'expliquer, que selon les combinaisons testées, des phénomènes d'interaction pouvaient intervenir et influencer les performances

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

générales des systèmes. Pour finir, nous comparons les performances des différents modèles composés.

L'illustration 167 met en exergue les performances observées des 6 modèles, pour une densité moyenne simulée sur le réseau de Dakar. Pour construire les graphiques qui suivent, nous nous sommes basés sur la même méthode d'attribution des scores que précédemment (cf. Partie 3.2.4.1).



Les modèles *Mixte Formel* et *Mixte Flexible* sont très proches sur le graphique, l'un faisant pourtant intervenir un modèle régulier (*Bus*) et l'autre étant entièrement flexible. Ce sont les systèmes les plus efficaces concernant l'approche territoire et clients. Ils sont en réalité très proches du *Modulobus* pour les 4 indicateurs. Comme ce dernier, ils sont plus efficaces en forte densité et permettent un drainage important et relativement homogène sur le réseau. Ils se distinguent davantage sur l'approche opérateur : l'un ayant un meilleur VPK et l'autre un meilleur taux de chargement. Le modèle entièrement flexible est parmi les meilleurs, mais il n'est pas parfait, notamment à cause de la concurrence entre les véhicules qui crée une baisse d'efficacité

Partie 3.Exploration et confrontation des systèmes de transport

dans l'approche opérateur. De plus, la complémentarité entre un système très flexible et un transport de masse (type bus) fait émerger une complémentarité intéressante.

À l'opposé, les modèles *Mixte Informel* et *Mixte Régulier* présentent de mauvais résultats pour les approches territoire et clients, mais ils excellent dans l'approche opérateur. Propos à nuancer pour le modèle *Régulier* qui est finalement le modèle le moins bon de tous (ce qui rejoint notre hypothèse H.10). Le modèle *Informel* apparaît meilleur car plus équilibré. Il supporte néanmoins assez peu la montée en charge des clients. Ce modèle se distingue nettement des autres grâce à ses bonnes performances opérateur. Cette spécialité est très intéressante pour notre comparaison entre systèmes de transport français et africains, où le transport informel et artisanal prédomine.

Le modèle *Hybride* se distingue par sa forme allongée sur le graphique. Il est en effet bon sur certains indicateurs mais n'excelle dans aucune des trois approches. Nous ne pensons pas que le principe d'hybridation soit à remettre en question. Ce sont plutôt les modalités de son fonctionnement et de son application qui nécessitent un approfondissement. Nous proposons d'aborder ce point plus en détail dans les perspectives de la thèse.

In fine, le modèle le plus équilibré et même le plus performant s'avère être le système *Mixte France-Sénégal*. Les résultats sont bons, voire excellent, pour tous les indicateurs exceptés pour le taux de chargement et le nombre de clients moyen en attente aux stations qui demeurent toutefois très corrects. Cette conclusion est très intéressante car même si nous n'avons pas pu observer de véritables phénomènes de coopération, le fonctionnement en simultané des deux types de véhicules a permis d'équilibrer les performances générales du système, sans toutefois réduire considérablement leurs performances respectives.

Pour finir, nous avons identifié sur l'illustration 168 les modèles composés les plus typés, c'est-à-dire ceux que nous jugeons les plus intéressants à l'issue de cette recherche. Nous comparons leurs performances avec celles des quatre modèles de références (toujours dans les mêmes conditions de simulation).

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

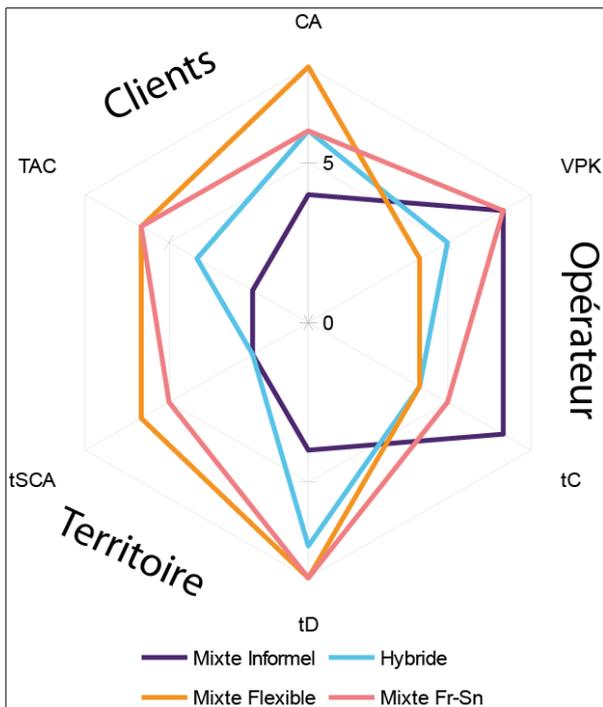


Illustration 168 : les quatre modèles composés les plus typés.

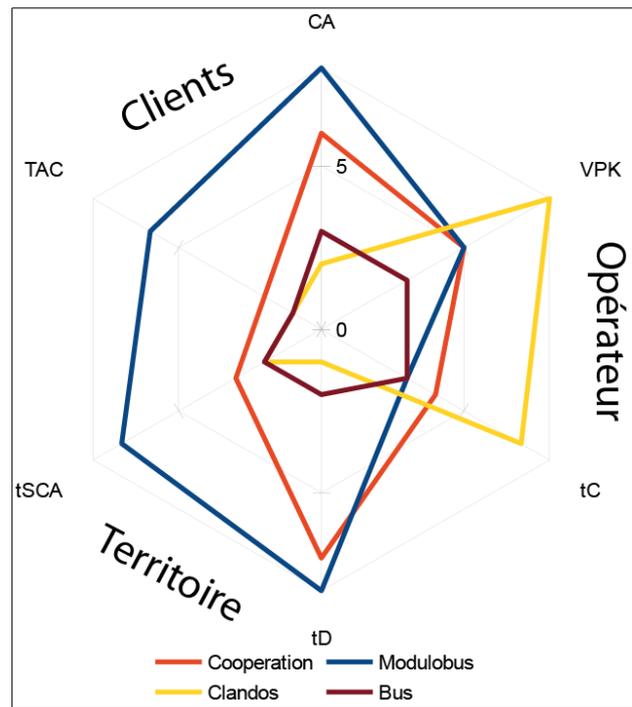


Illustration 169 : typologie des trois modèles de référence.

Le modèle *Mixte Flexible* nous semble intéressant, puisque c'est le seul système qui a conservé les excellentes performances du *ModuloBus* pour le taux de desserte et pour le nombre de clients en attente aux stations. Malgré la compétition observée entre les deux types de véhicules, c'est un modèle qui ne présente aucun véritable défaut. C'est en plus le modèle composé le plus robuste et doté des meilleures capacités d'auto-adaptation.

Les modèles *Informel* et *France-Sénégal* nous semblent porteurs, car ils constituent vraiment un compromis entre deux services opposés en termes de fonctionnement et d'efficacité. Selon l'objectif que l'on donne à un système de transport, ces deux modèles constituent des pistes intéressantes à l'avenir, que ce soit pour la France ou le Sénégal.

Enfin, le modèle *Hybride* nous semble prometteur car il constitue finalement le service le plus flexible et le plus en auto-adaptatif. C'est aussi le seul modèle qui peut être réellement calibré, et ce dynamiquement au cours de la simulation. La principale difficulté réside dans le fait que la maximisation d'un critère a parfois une répercussion négative sur un autre, ce qui peut rendre la tâche difficile selon les objectifs visés (e.g. recherche de performances équilibrées). Nous n'avons testé ici qu'une première méthode de calibration, or nous pensons que des résultats bien meilleurs peuvent être obtenus en affinant la méthode.

Conclusion partie 3 : comparaison de l'ensemble de modèles

Grâce à trois phases de simulation et à l'analyse statistique des données, la troisième partie nous a permis d'étudier en détails le fonctionnement de 13 modèles. Nous avons pu tester une grande variété de conditions de simulation en nous intéressant particulièrement à l'influence des configurations spatiales et des niveaux de densité sur le fonctionnement des modèles. Le tableau 39 est une synthèse des caractéristiques observées pour l'ensemble des modèles tout au long de nos analyses³⁶. Nous proposons une classification qualitative pour révéler les spécificités de chaque modèle type et mettre en exergue les services qui nous paraissent les plus intéressants.

Modèles	Flexibilité			Performances			Potentiel de complémentarité
	Adaptation dynamique à la demande	Capacité de montée en charge	Adaptation spatiale	Opérateur	Clients	Territoire	
<i>Random</i>							
<i>Distance</i>							
<i>Potential</i>							
<i>Bus</i>							
Clandos							
<i>Cooperation</i>							
Modulobus							
<i>Mixte Formel</i>							
<i>Mixte Informel</i>							
<i>Mixte Flexible</i>							
<i>Mixte Régulier</i>							
Mixte Fr-Sn							
Hybride							

Faible	Moyen	Bon
--------	-------	-----

Tableau 39 : comparaison des caractéristiques générales des modèles.

³⁶ Les 13 modèles n'ont pas tous été simulés autant de fois et dans les mêmes conditions. Certains ont été plus approfondis que d'autres, c'est pourquoi certains éléments apportés ici peuvent être estimés selon notre connaissance générale des systèmes.

Partie 3. Exploration et confrontation des systèmes de transport

Le premier modèle qui se démarque au vu de cette classification est le modèle *Mixte France-Sénégal*. Comme nous pouvons le voir sur le tableau 39, le modèle affiche de bons résultats pour la totalité des critères. Comme nous l'avons constaté dans les analyses, ce modèle mixte tire profit des spécificités des deux modèles qui le compose, à savoir la très bonne qualité de service du *Modulobus* et les bonnes performances opérateurs du *Clandos*. Les deux types de service ne semblent pas se gêner, au contraire ils sont complémentaires ce qui nous donne incontestablement le modèle le plus performant.

Le *Modulobus* arrive en seconde position. Nous avons constaté que pour chaque simulation ce modèle était à la fois robuste et très performant pour l'approche clients et territoire. Il présente néanmoins un défaut majeur qui concerne le faible potentiel de "rentabilité" qui ne peut être amélioré qu'en le combinant avec un autre modèle.

En le comparant avec l'ensemble des modèles, le modèle *Hybride* nous semble finalement intéressant car il présente globalement de bons résultats et surtout il est relativement équilibré au vu des différents critères. Nous avons observé qu'il présentait quelques défauts, notamment concernant l'exploration du réseau et le temps d'attente des clients. Cependant, nous pensons que ces faiblesses sont potentiellement améliorables avec une calibration plus approfondie du système.

En quatrième position nous proposons le modèle *Clandos* qui est certainement le modèle le plus typé de tous. Certes ses performances dans l'approche territoire et clients ont été assez médiocres pour l'ensemble des simulations, néanmoins il présente de très bonnes performances opérateurs qui ont été vérifiées sur l'ensemble des conditions de simulation testées. De plus, ce modèle présente vraiment un fort potentiel de complémentarité. D'après les analyses précédentes, il n'entre jamais en concurrence avec les autres services. Au contraire, il les complète relativement bien (cf. modèle *Mixte France-Sénégal*, *Mixte Informel*).

Pour finir, nous observons que les modèles mixtes *Informel* et *Formel* sont respectivement très proches du modèle *Clandos* et *Modulobus*. Ils ne se démarquent pas vraiment et leur intérêt nous semble relativement limité. Le modèle *Cooperation* apparaît comme le modèle "moyen". Comme nous l'avons vu il n'exceller dans aucun domaine mais ne présente pas de défaut particulier, si ce n'est sa faible capacité de montée en charge. Enfin nous pouvons regrouper les modèles *Random*, *Distance*, *Potential*, *Bus* et *Mixte Régulier* qui présentent des caractéristiques globalement médiocres. Ce sont en réalité les modèles les moins sophistiqués, puisque les agents n'ont pas (ou peu) de capacité d'interaction et de communication.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objet premier de cette thèse est la comparaison de systèmes de transport inspirés de services français et sénégalais. Au cours de l'étude, nous nous sommes intéressés au rôle que pouvait jouer la flexibilité dans le fonctionnement des services. En effet, en France, les nouveaux systèmes s'orientent de plus en plus vers la prise en compte de la spontanéité. Cette caractéristique semble indispensable pour se rapprocher des avantages de l'automobile et donc la concurrencer. Au Sénégal, la flexibilité est une propriété intrinsèque de la majeure partie des services, car elle offre des capacités d'adaptation au rythme de vie des populations et aux contraintes financières et spatiales. Notre étude comparative est donc focalisée sur les principes de fonctionnement observés dans les deux contextes sociétaux et notamment ceux intégrant une grande souplesse. Pour comprendre et comparer les systèmes, nous avons développé une méthodologie générale basée sur la modélisation multi-agents. Grâce à une transcription des modes de fonctionnement en comportement d'agent, nous avons pu simuler et confronter un ensemble de modèles, chacun d'entre eux faisant référence à un niveau de flexibilité observé.

Synthèse des résultats

Dans une première partie nous fournissons un état de l'art sur l'offre de transport en France et au Sénégal. Les différents services observés ont été regroupés et classifiés selon quatre niveaux de flexibilité.

- Nous montrons qu'en France la plupart des services sont réguliers et que le transport flexible n'est qu'au préambule de son développement. En effet, le Transport A la Demande, que nous considérons comme le seul véritable service de transport flexible collectif, est jusqu'à présent relativement peu souple, rarement optimisé (niveau 3 de flexibilité) et donc sous utilisé. Il apparaît alors indispensable de développer des systèmes beaucoup plus dynamiques (niveau 4 de flexibilité) pour positionner ce mode de transport comme un concurrent sérieux à l'automobile. En parallèle, les opérateurs de taxis qui proposent certainement le service le plus souple, se limitent à un service individuel et relativement onéreux.
- Au Sénégal, l'offre est beaucoup plus variée et nous avons pu observer des modes de fonctionnement plus ou moins flexibles dans la majorité des services (excepté le service de bus Dakar Dem Dikk). Nous pensons que les minibus, très populaires à Dakar, ne peuvent pas vraiment être considérés comme flexibles même s'ils bénéficient d'une certaine souplesse en matière d'organisation. En revanche, il existe à Dakar différentes formes de taxis très fréquentés, dont le fonctionnement est réellement flexible. Nous pensons aux taxis « clandos » qui constituent un service collectif avec des tournées et des horaires adaptés aux zones de desserte et aux besoins des clients. Nous pensons également aux taxis légaux jaunes et noirs, aux tarifs relativement abordables (en comparaison avec les taxis français) et aux taxis de la SOTRAM, qui s'adressent à une population plus aisée mais qui offrent en retour un vrai service de transport à la demande avec réservation. Ainsi, à l'issue de cet état de l'art nous exposons une classification des services. Nous sélectionnons aussi les services qui paraissent les plus flexibles et les plus pertinents pour nos analyses. Ces services sont les opérateurs formels de taxis français et sénégalais, les TAD et les services artisanaux et informels de type taxis « clandos » ou mini-bus.

Conclusion générale

Dans une seconde partie nous présentons tous les fondements méthodologiques de la thèse.

- Nous démontrons l'intérêt que présente le paradigme de la complexité pour l'analyse de systèmes de mobilité. Nous insistons également sur les avantages que procurent les SMA pour l'analyse de transports flexibles, artisanaux, informels, auto-organisés, autrement dit, tous les services centrés sur l'individu. Après avoir présenté différentes approches de modélisation, nous expliquons l'approche utilisée dans la thèse. Nous cherchons à synthétiser les différents comportements observés et à les implémenter dans des modèles dynamiques, sans souci particulier d'exhaustivité, mais plutôt dans une démarche exploratoire.
- Dans cette même partie nous expliquons en détails le fonctionnement du méta-modèle nommé le *Trans-Cultural Transport Simulator*. Implémenté dans le simulateur NetLogo, l'outil se situe au cœur de la thèse. Il offre un choix de 13 modèles dynamiques, dont 6 d'entre eux sont des combinaisons de services. Chaque modèle peut être simulé sur une variété de configurations spatiales, qu'elles soient purement théoriques ou plus réalistes. Enfin, les simulations sont analysées en temps réel sur l'interface de simulation et grâce à des exportations de données issues de la base. Au terme de cette seconde partie, nous disposons de toutes les briques méthodologiques permettant la compréhension des simulations.

La troisième partie est entièrement dédiée à l'analyse des services de transport modélisés.

- Tout d'abord, nous cherchons à comparer les performances de chaque modèle en agrégeant les indicateurs. Pour cela, nous utilisons une méthode d'attribution de scores. L'objectif de cette première phase de simulation est aussi de tester l'influence de chaque paramètre de simulation sur les performances générales des modèles. Nous constatons que certains paramètres tels que la densité de clients (en rapport avec le nombre de véhicules opérant) et la configuration des espaces virtuels (e.g. rapport entre le nombre de station et de destination, forme du réseau, zone de densité, etc) jouent un rôle important sur le fonctionnement des systèmes. Nous observons que la faible capacité d'interaction des agents entraîne des performances médiocres pour les trois modèles *Random*, *Distance* et *Potential*. Au contraire, nous notons que les modèles faisant intervenir des capacités d'interaction, voire même de communication, affichent des performances améliorées (e.g. *Cooperation*, *Modulobus*, et *Clandos*). A l'issue de cette première phase, nous sélectionnons les trois modèles les plus intéressants et nous fixons un certain nombre de paramètres pour nous focaliser ensuite sur la capacité de montée en charge et l'influence des réseaux sur le fonctionnement des modèles.
- Ensuite, nous analysons en profondeur les trois modèles sélectionnés. Nous les décrivons précisément avec le protocole ODD et nous proposons une typologie détaillée. A ce stade, nous pouvons constater que la communication en « temps réel » entre les clients et les véhicules entraîne des performances étendues pour le *Modulobus*. Celui-ci apparaît comme un modèle stable offrant une bonne qualité de service. Nous pouvons également constater que la coopération entre les véhicules permet de proposer un service relativement efficace pour chacune des approches. En revanche, ce modèle affiche une faible capacité de montée en charge. Enfin, le *Clandos* se démarque très largement par

Conclusion générale

ses très bonnes performances en ce qui concerne l'approche opérateur, tout en affichant une faible qualité de service. Nous nous sommes aperçu que le simple fait d'éviter de rouler à vide et de « sélectionner » les clients les plus intéressants permettait de multiplier jusqu'à 10 les performances concernant l'approche opérateur.

- Enfin, nous consacrons le dernier chapitre à la confrontation des systèmes et à l'analyse du potentiel de complémentarité des modèles. Nous observons des résultats très divergents pour les cinq modèles mixtes. Par exemple, le modèle faisant intervenir les deux services les plus flexibles (*Cooperation* et *Modulobus*) présente de bons résultats, mais il laisse apparaître une certaine concurrence entre les véhicules, ce qui a une conséquence néfaste sur les performances opérateur. A l'inverse, le modèle combinant le TAD dynamique (*Modulobus*) et un service types taxis collectifs informel (*Clandos*) offre un service relativement stable et performant sur l'ensemble des indicateurs. Au vu des différents résultats, nous concluons que ces deux modèles sont les plus complémentaires. Cela a d'ailleurs été vérifié en simulant un modèle hybride. Il permet de trouver un bon compromis entre les spécificités des trois modèles (*Modulobus*, *Cooperation*, *Clandos*), en les faisant intervenir graduellement selon les conditions, en fonction des clients en attente dans la simulation.

Discussion et perspectives

Le Trans-Cultural Transport Simulator

Au vu de tous ces résultats, nous pouvons affirmer que le TCTS est un outil pertinent pour analyser des systèmes de transport flexibles fonctionnant dans différents types de contexte socioculturel. Implémenté dans un logiciel relativement facile d'accès (NetLogo) il permet d'explorer et de comparer le fonctionnement de services basés sur l'auto-organisation et l'auto-adaptation. N'existant pas à notre connaissance d'outil similaire, cela constitue un apport important de notre recherche. Néanmoins, le TCTS présente certaines limites.

D'abord (i) il demeure dédié à la micro-simulation, ce qui signifie que nous sommes limités par la taille et la finesse des espaces virtuels simulés. Nous sommes également limités par la quantité de clients que le simulateur peut créer au cours d'une simulation. Nous avons en effet observé des ralentissements importants du logiciel avec des cas de forte densité. Aussi (ii), il serait intéressant d'approfondir un peu plus les comportements des clients et de complexifier la demande de mobilité. Pour cela, un travail de terrain avec des enquêtes auprès des usagers des services français et sénégalais serait nécessaire. Nous pourrions notamment essayer de comprendre quels sont les critères de choix de tel ou tel service par une personne. Il serait également intéressant de simuler les cycles journaliers et les besoins de déplacement intégrant les aller-retours (au lieu de faire disparaître les clients une fois arrivés à destination). Ainsi, un certain nombre d'éléments à prendre en compte dans les simulations nous permettraient d'étudier plus en détails le rôle que peuvent jouer les réseaux sociaux dans le fonctionnement d'un système de mobilité.

Pour pouvoir répondre à ces perspectives, nous pensons qu'il est indispensable de réfléchir à une implémentation du TCTS dans un autre simulateur plus performant et mieux optimisé. Des logiciels comme Cormas, ayant des capacités de calcul plus importantes, pourraient

Conclusion générale

potentiellement nous permettre de distinguer différentes granularités d'agents. Sans prétendre pouvoir fournir un modèle d'expert, cela nous permettrait de générer une demande de mobilité plus diversifiée et donc plus complexe, mais aussi d'analyser plus finement les sauts d'échelles et l'interaction entre les différents niveaux d'agents simulés.

Les modèles dynamiques

Concernant maintenant les modèles dynamiques, nous avons montré qu'il était possible de simuler des fonctionnements simplifiés observés dans la réalité via l'implémentation de comportements basés sur l'interaction et la communication inter-agent. Nous avons remarqué que les différentes formes d'interaction avaient un impact important sur le fonctionnement des modèles et que l'efficacité des services variait beaucoup d'un modèle à l'autre. Nous proposons ici de revenir sur les différents modèles en précisant leurs atouts et en réfléchissant à des perspectives d'amélioration.

Les opérateurs de taxi en concurrence

Nous proposons de regrouper les trois modèles *Distance*, *Potential* et *Random* qui sont apparus comme peu performants dès la première phase de simulation. Les agents implémentés dans ces modèles sont en réalité ceux ayant la plus faible capacité d'interaction. Ils ont aussi une connaissance très limitée de leur environnement. Les trois modèles ont été conçus en s'inspirant des comportements que peuvent avoir certains chauffeurs de taxis, notamment quand ils opèrent dans des zones de forte densité. Finalement, nous pensons que ces trois modèles devraient être fusionnés en un seul modèle, soit en mélangeant les types d'agent au cours de la simulation, soit en trouvant une méthode d'hybridation entre les trois services. Par exemple, en très forte densité, les véhicules pourraient se déplacer vers les stations les plus proches ou les plus attractives, alors qu'en plus faible densité ils se déplaceraient aléatoirement de station en station.

Le service de bus régulier

Le modèle *Bus* a surtout été utilisé à titre de comparaison, notamment à l'étape de confrontation des systèmes. Notre outil n'est pas particulièrement dédié à la simulation de services réguliers. D'autres simulateurs plus adaptés existent pour cela. Pour qu'un système de bus soit performant, il est nécessaire de définir un nombre important de lignes et de bénéficier d'une couverture spatiale suffisamment étendue. Dans notre cas, nous avons simulé seulement deux lignes, ce qui reste insuffisant pour desservir correctement des agglomérations comme Dakar et même Avignon. Néanmoins, cela nous a permis de réfléchir à la complémentarité entre un service régulier et des services flexibles. Nous avons par exemple observé des résultats encourageants avec le modèle mixte intégrant un TAD dynamique et des lignes de bus.

Le service de type informel et artisanal

Dès les premiers résultats, le modèle *Clandos* nous a semblé particulièrement intéressant. Pour l'ensemble des simulations, il s'est démarqué grâce à ses très bonnes performances concernant l'approche opérateur. En revanche, il a généralement présenté une très faible qualité de service. Tous ces éléments ont d'ailleurs été conservés avec les modèles mixtes incluant le *Clandos* (excepté le modèle France-Sénégal). Comme nous l'avons vu, ces caractéristiques ne

Conclusion générale

sont pas forcément représentatives de la réalité observée. Nous pensons que trois raisons expliquent cela.

Tout d'abord (i), nous n'avons 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 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, nous avons fixé le taux de remplissage minimum pour le départ des véhicules à 50 %. Dans la pratique, ce seuil n'est pas fixe et les chauffeurs peuvent l'adapter en fonction des conditions du moment (e.g. heure creuse ou pleine, situation financière, etc). Enfin (iii), il ne faut pas négliger le rôle que jouent les réseaux sociaux dans le fonctionnement des transports informels. Dans notre cas nous avons simulé des comportements de clients relativement simples, qui ne reflètent pas exactement 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, et de définir les règles d'interaction avec les clients et les véhicules.

L'opérateur de taxi coopératif

Le modèle *Cooperation* peut finalement être considéré comme le modèle de transport typiquement multi-agents. Il permet en effet 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 par exemple que celle des *taxi man* dans la réalité. Pourtant, nous avons pu observer des résultats très intéressants avec ce modèle. Nous avons notamment pu souligner 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 beaucoup plus fort 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.

Le Transport A la Demande dynamique

De manière générale, le modèle *Modulobus* est apparu tout au long de l'étude comme le modèle le plus performant. Son point fort est la qualité de service. Nous avons pu constater à la fois de très bon résultats et une très bonne stabilité pour les indicateurs concernant la satisfaction des clients et la desserte du territoire. Le principe de communication mis en œuvre et la

Conclusion générale

possibilité pour les clients de partir à la rencontre des véhicules constituent donc un gain important d'efficacité. Toutefois, nous pensons que certains points peuvent encore être améliorés.

D'abord, il serait intéressant de préciser un peu 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, nous avons pu observer des situations où 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. A noter d'ailleurs que le taux de remplissage et l'heure de passage des véhicules aux stations fait partie de l'information qu'il était prévu d'envoyer par le *push* dans le prototype. Il serait donc intéressant de réfléchir à enrichir l'information partagée entre les clients et les véhicules. Également, nous avons pu constater que le principal défaut du *Modulobus* était la faible « rentabilité » du service. Cela s'explique par le fait que les véhicules circulent continuellement 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 entre celui du *Modulobus* et du *Clandos* autorisant les véhicules à partir avec un seul client à bord et de transmettre ensuite l'itinéraire via le *push*.

Les apports des SMA pour le développement des transports flexibles

Le travail présenté 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 le fonctionnement de services artisanaux africains. C'est aussi un des rares outils offrant la possibilité d'évaluer les apports de l'interaction entre les individus (chauffeur, clients) pour l'optimisation de Transports À la Demande.

Comprendre et expliquer le fonctionnement des transports artisanaux/informels

Un des enjeux des SMA 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. Nous avons montré qu'en étudiant les pratiques des chauffeurs il était possible de modéliser le fonctionnement de ces services. Bien que nos modèles ne soient pas exhaustifs, dans un premier temps, ils permettent de réfléchir sur 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 de notre modèle, nous insistons sur le fait que le simulateur NetLogo est un logiciel entièrement gratuit et relativement simple à maîtriser. Il nous semble possible d'organiser des cours et des formations dans les universités des pays du sud et donc de développer potentiellement le nombre d'utilisateurs. L'association CODATU souhaite mettre en place une base de connaissance sur le transport en Afrique qui serait hébergée par un pays africain et partagée avec tous les autres pays. Nous pourrions donc enrichir cette base de données en y intégrant un ensemble de modèles qui serait réalisé par des étudiants et des chercheurs africains. Grâce à ces modèles, nous pourrions analyser et comparer des services artisanaux opérant dans différentes villes africaines. Aussi, comme nous l'avons fait avec le CETUD, ces modèles

Conclusion générale

pourraient permettre d'ouvrir le dialogue avec les autorités. Simplement en présentant des simulations et des résultats d'analyse, les modèles nous aident à réfléchir sur 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. 2011), permettant de faire réfléchir et interagir des décideurs, des chercheurs, des chauffeurs, des propriétaires, etc., réunis autour d'une même table.

Concevoir de nouveaux services innovants et optimisés

Les SMA nous semblent également 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 tout au long du processus de modélisation et de simulation, aux leviers permettant d'optimiser les systèmes. Par exemple, le principal levier que nous avons 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 et al. 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 nous semble être une méthode intéressante pour tester un service de transport et le calibrer en jouant sur différents critères d'optimisation. Chose qu'il est difficile à faire en situation réelle.

Références

Références

- 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.
- Amouroux, E. et al., 2009. GAMA: an environment for implementing and running spatially explicit multi-agent simulations. In *Agent computing and multi-agent systems*. Springer, p. 359–371. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-01639-4_32 [Consulté le avril 30, 2013].
- Amouroux, E., 2011. *KIMONO: une méthode de modélisation descriptive centrée agent pour l'explication des systèmes complexes, une application en épidémiologie*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00630779> [Consulté le avril 29, 2013].
- Ando, Y. et al., 2006. Performance of pheromone model for predicting traffic congestion. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. AAMAS '06. New York, NY, USA: ACM, p. 73–80. Available at: <http://doi.acm.org/10.1145/1160633.1160642> [Consulté le mai 9, 2013].
- ANSD, 2008. *Situation économique et sociale du Senegal en 2007*, Dakar: Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Dakar.
- ANSD, 2010. *Situation économique et sociale du Senegal en 2009*, Dakar: Agence nationale de la statistique et de la démographie.
- Antoni, J.-P., 2010. *Modéliser la ville - Formes urbaines et politiques de transport*, Economica.
- Antoni, J.-P., 2012. Modéliser les comportements pour étudier les mobilités urbaines. *Ville, Rail et Transport*, p.65-69.
- APIX, 2007. *Nouvel aéroport international Blaise Diagne*, Dakar. Available at: http://www.gouv.sn/IMG/pdf/Fiche_aeroport.pdf.
- Armendáriz, M. et al., 2010. Carpooling: A multi-agent simulation in netlogo. *Proc. ECMS*. Available at: http://www.researchgate.net/publication/228461148_Carpooling_A_Multi-Agent_Simulation_In_Netlogo/file/9fcfd50ade85947daa.pdf [Consulté le avril 2, 2013].
- Attali, J., 2008. Rapport de la Commission pour la libération de la croissance française. *XO Éditions, La Documentation française*, 16, p.47–52.
- Axelrod, R.M., 1997. *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*, Princeton University Press. Available at: <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=J0dgRGMdjmQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=The+Complexity+of+Cooperation&ots=OovqpuTCK2&sig=eoZ1KF1es2VTq7E6bFiks2QvEMw> [Consulté le avril 30, 2013].
- Balmer, M. et al., 2008. Agent-based simulation of travel demand: Structure and computational performance of MATSim-T. In *TRB Conference on Innovations in Travel Modeling*. Portland: ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IVT Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme.

Références

- Balmer, M. et al., 2009. MATSim-T: Architecture and simulation times. *Multi-agent systems for traffic and transportation engineering*, p.57–78.
- Banos, A. et al., 2011. Simuler la mobilité urbaine quotidienne : le projet MIRO. *Mobilités urbaines et risques des transports*. Available at: <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00698686> [Consulté le mars 28, 2013].
- Banos, A. et al., 2005. Une approche multi-agents de la ville en mouvement. In *Colloque SMAGET*. p. 1–17. Available at: <http://smaget.lyon.cemagref.fr/contenu/SMAGET%20proc/PAPERS/Marielleau.pdf> [Consulté le avril 1, 2013].
- 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.
- Barter, P., 1999. *An international comparative perspective on urban transport and urban form in Pacific Asia: the challenge of rapid motorisation in dense cities*. Murdoch University.
- Barreteau, O. et al., 2011. Companion modelling: A method of adaptive and participatory research. In *Companion modelling: A participatory approach supporting sustainable development*. Versailles: Ed. Quae, p. 21-44. Available at: http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=562559.
- Bavoux, J.-J. et al., 2005. *Géographie des transports*, A. Colin.
- Bekhor, S. et al., 2010. *Integration of activity-based with agent-based models: an example from the tel aviv model and MATSim*, ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen-und Eisenbahnbau (IVT). Available at: <ftp://ftp.hsnc.unc.edu/pub/TRB2011/data/papers/11-0997.pdf> [Consulté le mars 28, 2013].
- Bertalanffy, L. von & Paulré, B., 1993. *Théorie générale des systèmes*,
- Bertalanffy, L.V., 1968. *General System Theory: Foundations, Development, Applications* Revised edition., George Braziller Inc.
- Bertholet, F., 2004. *Le secteur des transports routiers au senegal*, Worldbank. Available at: <http://www.worldbank.org/transport/transportresults/regions/africa/senegal-output-esw.pdf>.
- Bonnefoy, J.L., 2005. *Etdue de géographie théorique et expérimentale*. HDR. Aix-En-Provence: Universitéde Provence. Available at: *Étude de géographie théorique et expérimentale*.
- Boubakour, F. & Merazga, A., 2006. Planification du transport urbain et développement durable--Quelques réflexions a propos de la ville de Batna (Algerie). *Euromedina*, p.175-181.
- Bousquet, F. et al., 1998. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. In *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*. Springer, p. 826–837. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-64574-8_469 [Consulté le avril 30, 2013].

Références

- 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, TMU-IFU, SCP d'avocats CHARREL*. Available at: <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/dri/PREDIT0036.pdf> [Consulté le mars 11, 2013].
- Brundtland, G.H., 1987. Notre Avenir à Tous, rapport de la commission mondiale sur l'Environnement et le Développement. *Les Editions du Fleuve, Paris (traduction française de Our Common Future)*.
- Burguillo-Rial, J.C. et al., 2012. History-based Self-Organizing Traffic Lights. *Computing and informatics*, 28(2), p.157–168.
- Bussière, Y. & Madre, J.L., 2002. *Démographie et transport: villes du Nord et villes du Sud*, Editions L'Harmattan.
- Casanova, P. et al., 2005. *Plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes:(MobiSim SMA)(Structure et algorithmes du modèle)*, Paris, France: PREDIT.
- Castex, É., 2007. *Le transport à la demande (TAD) en France: de l'état des lieux à l'anticipation*. Thèse de doctorat. Université d'Avignon.
- Castex, É. & Josselin, D., 2007. Temporalités éclatées : la réponse des transports à la demande aux nouvelles formes de mobilité J.-P. Bondue & D. Royoux, éd. *Espace populations sociétés. Space populations societies*, (2007/2-3), p.433-447.
- CERTU, 2005. Les enquêtes ménages déplacements: le témoin et le suivi de la mobilité urbaine, (307). Available at: http://www.odc-transports.fr/odc_images/divers/Transflash_N307_sept_2005.pdf [Consulté le septembre 20, 2011].
- CERTU, 2004. *Modes de transports collectifs urbains (les)*.
- CERTU, 2009. Optimiser le transport à la demande Expérimentation dans le Doubs central, Certu Les outils de la mobilité(Fiche N°3), p.2.
- CERTU, 2006. *Transport à la demande (le) État de l'art, éléments d'analyse et repères pour l'action*, CERTU. Available at: <http://www.certu-catalogue.fr/transport-a-la-demande-le.html> [Consulté le décembre 6, 2012].
- Cervero, R., 2000. *Informal transport in the developing world*, United Nations Pubns.
- Cervero, R. & Golub, A., 2007. Informal transport: A global perspective. *Transport Policy*, 14(6), p.445-457.
- Champion, A., Éspié, S. & Auberlet, J.M., 2001. Behavioral road traffic simulation with ARCHISIM. In *Summer Computer Simulation Conference*. Society for Computer Simulation International; 1998, p. 359-364.

Références

- Chemin, C., 2011. Taxis clandestins, *Nicenews*. Available at: <http://nicenews.fr/Les-taxis-clandestins-inquietent.html> [Consulté le janvier 26, 2012].
- Chevrier, R., 2008. *Optimisation de transport à la demande dans des territoires polarisés*. Thèse de doctorat. Université d'Avignon. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00347940> [Consulté le mars 11, 2013].
- Cisse, A. et al., 2012. RAFALE-SP : a methodology to design and simulate geographical mobility. *Studia Informatica Universalis*, 10(1), p.77-97.
- Collard, P., Verel, S. & Clergue, M., 2013. *Systèmes complexes: une introduction par la pratique*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Conway, J.H., 1970. Mathematical games. *Sci. Amer*, 223, p.120–123.
- Cubillos, C., Crawford, B. & Rodríguez, N., 2007. MADARP: A Distributed Agent-Based System for On-Line DARP. In I. Stojmenovic et al., éd. *Parallel and Distributed Processing and Applications*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, p. 160-169. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-74742-0_17 [Consulté le février 19, 2013].
- CUREM, 2012a. *Etude d'indicateurs de conformité et de suivi de concession*, Dakar, Sénégal: CETUD.
- CUREM, 2012b. *Etude sur les indicateurs de transport public de passagers*, Dakar, Sénégal: CETUD.
- D'hondt, S., 2009. Calling the stops in a Dar-es-Salaam minibus: Embodied understandings of place in a drop-off routine. *Journal of Pragmatics*, 41(10), p.1962-1976.
- Darbéra, R., 2010. Transports publics et taxis : concurrence ou complémentarité ? *Ville, Rail et Transport*, p.34-39.
- Daudé, E., 2006. Du complexe à la complexité : le retour de l'individu dans les modèles géographiques. In *Demain la géographie*. Géopoint 2006. Avignon, p. 261-267.
- Dauphiné, A., 2003. *Les théories de la complexité chez les géographes*, Paris: Anthropos.
- Dejeammes, M. et al., 1992. L'autobus urbain : evaluation des solutions d'accessibilité aux personnes a mobilité réduite. *Rapport INRETS*, (150). Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1011045> [Consulté le mars 19, 2013].
- Delage, M., Le Néchet, F. & Louail, T., 2008. «ACCESSIM: modélisation et simulation d'accessibilité et d'inégalités géographiques dans la ville». *Mappemonde*, 92(4).
- Desiderio, M., 2005. *Les transports à la demande aux Etats-Unis*, Washington: Mission Economique de Washington.

Références

- Diagne, S. & Stucki, M., 2012. The Dakar executive council for urban transport (CETUD): learnings and prospects after fifteen years of activities. In *CODATU XV. The role of urban mobility in (re)shaping cities*. Addis Ababa, Ethiopia: CODATU.
- Diakaté, M.M., 2007. Déséquilibre du tissu urbain et problématique de la mobilité dans l'agglomération dakaroise : analyse factorielle de la crise du transport terrestre et éléments de gestion des déplacements urbains. <http://www.recherches-africaines.net>. Available at: <http://www.recherches-africaines.net/document.php?id=1219> [Consulté le février 15, 2012].
- Diop, M.C., 2002. *La société sénégalaise entre le local et le global*, KARTHALA Editions.
- Domingos, P., 1999. The Role of Occam's Razor in Knowledge Discovery. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 3(4), p.409-425.
- Donnadieu, G. et al., 2003. L'Approche systémique: de quoi s'agit-il. *Union Européenne de Systemique*. Available in <http://www.afscet.asso.fr/SystemicApproach.pdf>. [05/10/2005].
- Dorigo, M., Birattari, M. & Stutzle, T., 2006. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), p.28-39.
- Dorigo, M., Caro, G.D. & Gambardella, L.M., 1999. Ant Algorithms for Discrete Optimization. *Artificial Life*, 5(2), p.137-172.
- DTT, 2007. *Mémento des transports terrestres*, Dakar: Ministère des infrastructures, transports terrestres, des télécommunications et des tics.
- Dupuy, G., 1991. *L'urbanisme des réseaux: théories et méthodes*, Armand Colin Editeur. Available at: <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/29654> [Consulté le avril 25, 2013].
- Dupuy, J.P., 1994. Aux origines des sciences cognitives.
- Edmonds, B. & Moss, S., 2005. *From KISS to KIDS—an 'anti-simplistic' modelling approach*, Springer. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-32243-6_11 [Consulté le avril 30, 2013].
- Elissalde, B., 2005. Territoire. *Hypergeo*. Available at: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article285#> [Consulté le novembre 19, 2012].
- Enrique Fernández L., J., de Cea Ch., J. & Malbran, R.H., 2008. Demand responsive urban public transport system design: Methodology and application. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(7), p.951-972.
- Espié, S. & Auberlet, J.M., 2007. ARCHISIM: A behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including ITS aspects. *International Journal of ITS Research*, (n1). Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00542272/> [Consulté le avril 3, 2013].

Références

- Fauvet, R., 2012. Vaucluse : pourquoi les véhicules d'Easy Take roulent encore. *LaProvence.com*. Available at: <http://www.laprovence.com/article/a-la-une/vaucluse-pourquoi-les-vehicules-deasy-take-roulent-encore> [Consulté le décembre 14, 2012].
- Ferber, J. & Perrot, J.F., 1995. *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, InterEditions Paris.
- FIDECO, 2008. *Etude d'inventaire du parc de cars de transport en commun de personnes à Dakar*, CETUD. Available at: <https://www.google.fr/> [Consulté le mars 4, 2013].
- Flament, C., 1965. *Théorie des graphes et structures sociales*, Mouton-Gauthier-Villars. Available at: <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/426002> [Consulté le mai 3, 2013].
- Fougères, A.J., 2000. Un système tutoriel intelligent pour la formation des régulateurs de trafic d'une compagnie de transport en commun. In *Colloque sur la multimodalité, IMAG, Grenoble*.
- Fourie, P.J., 2010. Agent-Based transport simulation versus equilibrium assignment for private vehicle traffic in Gauteng. Available at: <http://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/4432> [Consulté le avril 1, 2013].
- Fournier, J.-C., 2006. *Théorie des graphes et applications : Avec exercices et problèmes*, Hermes Science Publications.
- Gao, W., Balmer, M. & Miller, E.J., 2010. Comparison of MATSim and EMME/2 on greater Toronto and Hamilton area network, Canada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2197(1), p.118–128.
- Garaix, T., 2007. *Etude et résolution du problème de transport à la demande avec qualité de service*. Thèse de doctorat. Université d'Avignon. Available at: http://asso.tc.free.fr/tunisie_2012/198-article-15.pdf [Consulté le avril 25, 2013].
- 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*. Available at: <http://cybergeo.revues.org/11373> [Consulté le mars 6, 2013].
- Gardner, M., 1970. Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game « life ». *Scientific American*, 223(4), p.120–123.
- Gechter, F. & Simonin, O., 2005. Conception de SMA Réactifs pour la Résolution de Problèmes: une approche basée sur l'Environnement. *Soumission JFSMA*, 5, p.1.
- Genre-Grandpierre, C., 2007. Des «réseaux lents» contre la dépendance automobile? Concept et implications en milieu urbain. *L'Espace géographique*, (1), p.27–39.
- Gershenson, C., 2005. Self-Organizing Traffic Lights. *Complex Systems*, Vol16. (1), p.29-53.
- GMAT, 2007. *Étude d'élaboration d'un plan de déplacements urbains pour l'agglomération de Dakar (PDUD) horizon 2025*, Dakar, Sénégal: CETUD, Ministère des transports.

Références

- Godard, X., 2002. *Les transports et la ville en Afrique au sud du Sahara: le temps de la débrouille et du désordre inventif*, KARTHALA Editions.
- Godard, X., 2008a. Transport artisanal, esquisse de bilan pour la mobilité durable. In Codatu XIII. Hô Chi Minh Ville (Vietnam). Available at: <http://www.codatu.org/english/conferences/codatu13/CodatuXIII-CDrom/codCD-Godard1.pdf> [Consulté le janvier 10, 2011].
- Godard, X., 2008b. Variété des systèmes de mobilité urbaine face aux enjeux de développement et d'environnement. *Ghardaïa, Algeria 16-18 February 2009*, p.131.
- Grimm, V. et al., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1-2), p.115-126.
- Grimm, V. et al., 2010. The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23), p.2760-2768.
- Guéguen, E., 2010. Reportage avec la brigade anti-taxis clandestins. *France Info*. Available at: <http://www.franceinfo.fr/france-justice-police-2010-08-12-reportage-avec-la-brigade-anti-taxis-clandestins-475199-9-11.html> [Consulté le janvier 26, 2012].
- Guidère, M., 2012. Histoire immédiate du « printemps arabe ». *Le Débat*, n° 168(1), p.129-145.
- Guillas, A. & Josselin, D., 2012. *Prototypage d'un Transport à la Demande dynamique : le concept de Modulobus*,
- Hiebeler, D., 1994. The swarm simulation system and individual-based modeling. Available at: <http://www.santafe.edu/media/workingpapers/94-11-065.pdf> [Consulté le avril 30, 2013].
- Hubert, J., 2009. Dans les grandes agglomérations, la mobilité quotidienne des habitants diminue, et elle augmente ailleurs. *Insee Première*, 1252.
- IBIS, 2008. *Étude du Financement des Autobus à Dakar*, CETUD.
- Josselin, D. & Genre-Grandpierre, C., 2005. Des transports à la demande pour répondre aux nouvelles formes de mobilité. Le concept de Modulobus. In *Mobilités et temporalités*. Publications des Fac. St Louis, p. 151-164.
- Josselin, D., Lang, C. & Marilleau, N., 2009. Modelling dynamic demand responsive transport using an agent based spatial representation. In ECCS'09 European Conference on Complex Systems. University of Warwick, United Kingdom.
- Josselin, D. & Nicot, B., 2003. Un modèle gravitaire géoéconomique des échanges commerciaux entre les pays de l'U.E., les PECO et les PTM. *Cybergeo: European Journal of Geography*. Available at: <http://cybergeo.revues.org/4219> [Consulté le septembre 24, 2012].
- Joumard, R., 2005. *Développement durable et transports*, Alger, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Conservatoire National de Formation à

Références

- l'Environnement. Available at: <http://inrets.fr/ur/lte/publications/publications-pdf/Joumard/comDDAlger05.pdf> [Consulté le juillet 13, 2013].
- Kaddoum, E. et al., Analyse des critères d'évaluation de systèmes multi-agents adaptatifs.
- Kassi-Djodjo, I., 2010. Rôle des transports populaires dans le processus d'urbanisation à Abidjan. *Les Cahiers d'Outre Mer*, 251(3), p.391-402.
- Kumar, A. & Diou, C., 2010. *Renouvellement du parc d'autobus à Dakar. Avant et après.*, SSATP.
- Kumarage, A.S., Bandara, M. & Munasinghe, D., 2010. Analysis of the economic and social parameters of the Three-Wheeler Taxi service in Sri Lanka. *Research in Transportation Economics*, 29(1), p.395-400.
- Kurihara, S. et al., 2009. Traffic congestion forecasting based on pheromone communication model for intelligent transport systems. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2009. CEC '09*. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2009. CEC '09. p. 2879-2884.
- Lammoglia, A., 2011. Évolution spatio-temporelle d'une desserte de transport flexible simulée en sma. *Cybergeo: European Journal of Geography*. Available at: <http://cybergeo.revues.org/24720> [Consulté le septembre 26, 2012].
- Lammoglia, A. et al., 2010. MAS Simulation of a « Bush Taxi » Transportation Service. In *Teaching of/with Agent-Based Models in the Social Sciences*. MAPS2 Conference. Paris. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00567130/en/>.
- Lammoglia, A. et al., 2009. Simulation d'un transport spontané non régulé, par un système multi-agents. In *Les informations spatiales et temporelles : du capteur à la décision*. SAGEO 2009. p. 40. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00567127/en/>.
- Lammoglia, A., Faye, R.M. & Josselin, D., 2012. A dynamic cooperation modelling for improving taxi fleet efficiency. In *AGILE 2012*. Avignon, France.
- Lammoglia, A. & Josselin, D., 2013. Simulation multi-agents d'un transport la demande dynamique, l'exemple du Modulobus. In *Simulation pour des mobilités durables*. Théo Quant. Besançon.
- Lammoglia, A., Marilleau, N. & Josselin, D., 2011. How to assess the robustness of a flexible transport using an Agent Based Model simulation. In *V2CS2011*. Paris, France.
- Langlois, P., 2010. *Simulation des systèmes complexes en géographie : Fondements théoriques et applications*, Hermes Science Publications.
- Legifrance, 2013. Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs. [legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr). Available at: http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=4FA03C2C43E30FA17B9F63D9EBB3F9A1.tpdjo09v_3?

Références

cidTexte=LEGITEXT000006068730&dateTexte=20121211#LEGIARTI000023053375
[Consulté le décembre 11, 2012].

- Levinson, H.S. et al., 2003. *Bus rapid transit*, Transportation Research Board. Available at: http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-002079.pdf [Consulté le mars 19, 2013].
- Louryan, S., 2011. Le principe de parcimonie ou « rasoir d’Ockham ». *Revue médicale de Bruxelles*, 32(5), p.488–489.
- Lucas, A., 2012. Une nouvelle concurrence pour les taxis arlésiens. *LaProvence.com*. Available at: <http://www.laprovence.com/article/a-la-une/une-nouvelle-concurrence-pour-les-taxis-arlesiens> [Consulté le décembre 14, 2012].
- Maciejewski, M. & Nagel, K., 2012. Towards Multi-Agent Simulation of the Dynamic Vehicle Routing Problem in MATSim. In R. Wyrzykowski et al., éd. *Parallel Processing and Applied Mathematics*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, p. 551-560. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-31500-8_57 [Consulté le mars 28, 2013].
- Marcadon, J. et al., 1997. *Les transports: géographie de la circulation dans le monde d’aujourd’hui*, Armand Colin.
- Marilleau, N., 2006. Méthodologie, formalismes et outils de modélisation-simulation pour l’étude des systèmes complexes: application à la mobilité géographique. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- Mekni, M. et al., 2009. Génération automatisée d’environnements géographiques virtuels informés Modélisation topologique et abstraction géométrique d’environnements géographiques. *Revue internationale de géomatique*, 19(4), p.385-412.
- Ménard, A. & Filotas, E.M.D., 2004. Automates cellulaires et complexité: perspectives géographiques. *Documents de l’IAG*.
- Ministère du Développement durable, 2012. Les transports publics et transports privés. *developpement-durable.gouv.fr*. Available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-transports-publics-et.html> [Consulté le décembre 11, 2012].
- Le Moigne, J.L., 1999. *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod Paris.
- Moyer, M., 2009. Bus Rapid Transit. *Scientific American*, 301(6), p.53-53.
- Muller, P.A. & Gaertner, N., 2000. *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles.
- N. Maxemchuk, 1987. Routing in the Manhattan Street Network. *Communications, IEEE Transactions on*, 35(5), p.503 - 512.
- Nabaa, M., Zeddini, B. & Tranouez, P., 2007. Approche décentralisée pour résoudre le problème du transport à la demande. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00422630/> [Consulté le mai 9, 2011].

Références

- Ndiaye, M. & Bampoky, F.J., 2010. Nouveaux bus TATA : Des véhicules sans itinéraires fixes, ni arrêts. Sénégal *Le populaire online*. Available at: http://www.popxibaar.com/NOUVEAUX-BUS-TATA-Des-vehicules-sans-itineraires-fixes-ni-arrets_a2231.html [Consulté le décembre 10, 2012].
- Von Neumann, J. & Burks, A.W., 1966. Theory of self-reproducing automata. Available at: ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia707_01/revisao/tema14.doc [Consulté le novembre 19, 2012].
- North, M.J., Collier, N.T. & Vos, J.R., 2006. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 16(1), p.1–25.
- OFTA, 2004. *Systèmes multi-agents (ARAGO 29)* OFTA, TEC&DOC.
- Ortiz, F., 1987. *Contrapunteo cubano del tabaco y el azúcar*, Fundacion Biblioteca Ayacuch..
- Paul-Dubois-Taine, O., 2010. Les nouvelles mobilités. Available at: http://innovations-transport.fr/IMG/pdf/Annexes_nouvellesmobilités_novembre.pdf [Consulté le juillet 13, 2013].
- Philibert, J.-M., 2008. Des milliers de taxis clandestins à Paris. *Le figaro*. Available at: <http://www.lefigaro.fr/actualites/2008/04/26/01001-20080426ARTFIG00029-des-milliers-de-taxis-clandestins-a-paris.php> [Consulté le janvier 26, 2012].
- Piveteau, J.-L., 1995. Le territoire est-il un lieu de mémoire ? *Espace géographique*, 24(2), p.113-123.
- Prud'homme, J., Genre-Grandpierre, C. & Prud'homme, R., 2012. Impact of road network structure on pollutant emissions: Illustration for a Demand Responsive Transport system. In AGILE2012. Avignon, France. Available at: http://agile.gis.geo.tu-dresden.de/web/Conference_Paper/CDs/AGILE%202012/proceedings/papers/Paper_Prudhomme_Impact_of_road_network_structure_on_pollutant_emissions_Illustration_for_a_Demand_Responsive_Transport_system_2012.pdf [Consulté le mars 12, 2013].
- Prud'homme, J., Josselin, D. & Aryal, J., 2011. Quantitative analysis of pollutant emissions in the context of demand responsive transport. *Computational Science and Its Applications- ICCSA 2011*, p.439–453.
- Pumain, D., 1998. Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain. *Cahiers de Géographie de Québec*, 117, p.349–366.
- Pumain, D., 2003. Une approche de la complexité en géographie. *Géocarrefour: Revue de géographie de Lyon*, 78(1), p.25–31.
- Rabuel, S., 2000. Tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en France: domaines de pertinence en zone urbaine. *T.E.C.*, 203, p.63-71.

Références

- Richmond, B.M., 1985. STELLA: Software for Bringing System Dynamics to the Other 98% In: Proceedings of the 1985 International Conference of the Systems Dynamics Society. *Keystone, Colorado*.
- Rilett, L. & Kim, K.-O., 2001. Comparison of TRANSIMS and CORSIM Traffic Signal Simulation Modules. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1748(-1), p.18-25.
- Robert, P. & Rey, A., 2001. *Le Grand Robert de la langue française*, Dictionnaires Le Robert.
- De Rosnay, J., 1997. Le microscope. *Psychol Bull*, 23, p.751.
- Sadeh, N.M. & Kott, A., 1996. *Models and Techniques of Dynamic Demand-Responsive Transportation Planning*, SESAME final report, CERTU.
- Schelling, T.C., 1971. Dynamic models of segregation†. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1, p.143-186.
- Schmitt, C., 2013. Le modèle SimpopNet pour la simulation de la coévolution entre réseaux de transport et système de villes. In *Modélisation et simulation spatiale*. Théo Quant. Besançon.
- Seck, C., 2012. Dakar dem dikk veut porter son parc à 250 bus à partir de janvier. *Dakaractu.com*. Available at: http://www.dakaractu.com/Dakar-dem-dikk-veut-porter-son-parc-a-250-bus-a-partir-de-janvier_a36554.html [Consulté le janvier 15, 2013].
- Tao, C.-C., 2007. Dynamic taxi-sharing service using intelligent transportation system technologies. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on*. p. 3209–3212. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4340570 [Consulté le mars 18, 2013].
- Le Tellier, J., 2007. Les services des taxis collectifs dans les grandes villes marocaines: une alternative aux déficiences des transports institutionnels. In *Le taxi, solution d'avenir pour les mobilités urbaines*. Colloque international IVM. Lisbonne.
- Tisue, S. & Wilensky, U., 2004. NetLogo: A simple environment for modeling complexity. In *International Conference on Complex Systems*. p. 16–21. Available at: <http://ccl.sesp.northwestern.edu/papers/netlogo-iccs2004.pdf> [Consulté le septembre 6, 2012].
- Trans-Africa, 2009. *Aperçu du transport public en Afrique Subsaharienne*, Belgique: Union Internationale des Transports Publics.
- Tremblay, R. & Ndiaye, E.H.M., 2008. Les caractéristiques du secteur du transport urbain à Dakar. *Perspective Afrique*, 3(1-3), p.1–19.
- Treuil, J.-P., Drogoul, A. & Zucker, J.-D., 2008. *Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*, Dunod.

Références

- Troitzsch, K.G., 1997. Social science simulation-origins, prospects, purposes. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, p.41–54.
- Vidal, J.M., 2006. Fundamentals of multiagent systems: using netLogo models. *system*. Available at: <http://jmvidal.cse.sc.edu/lib/vidalfmas.html> [Consulté le novembre 19, 2012].
- Wallis, J. et al., 1985. STELLA® Research software. *High Performance Systems, Inc., Hanover*, 1987(1988), p.1990–98.
- Walliser, B., 1977. *Systèmes et modèles: introduction critique à l'analyse des systèmes*, Éditions du Seuil.
- Wilensky, U., 1999. GasLab: An extensible modeling toolkit for connecting micro-and macro-properties of gases. *Modeling and simulation in science and mathematics education*, 1, p.151.
- Wilensky, U. & Stroup, W., 1999. NetLogo HubNet Gridlock model. Available at: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/HubNetGridlock>.
- Winter, S., 2008. Intelligent Self-Organizing Transport. *Künstliche Intelligenz (Special Issue on« Artificial Intelligence and Spatial Mobility »)*, 3, p.25-28.
- Wong, K.I., Han, A.F. & Yuen, C.W., 2012. On dynamic demand responsive transport services with degree of dynamism. *Transportmetrica*, 0(0), p.1-19.
- Wu, Y., Guan, L. & Winter, S., 2008. Peer-to-peer shared ride systems. *GeoSensor Networks*, p.252-270.
- Zargayouna, M. & Zeddini, B., 2012. Fleet Organization Models for Online Vehicle Routing Problems. In N. T. Nguyen, éd. *Transactions on Computational Collective Intelligence VII*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, p. 82-102. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-32066-8_4 [Consulté le février 19, 2013].
- Zhao, X., 2011. *Algorithmes pour les problèmes de tournées à la demande*. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00671350> [Consulté le mars 28, 2013].

Indexes

Index des illustrations

Illustration 1 : Plan de la région de Dakar.....	21
Illustration 2 : critères et niveaux de flexibilité des services de transport (Castex 2007).....	22
Illustration 3 : Les trois contraintes d'un système de transport flexible.....	23
Illustration 4 : grille de lecture générale du mémoire.....	27
Illustration 5 : Tally Boumack à Pikine : un carrefour majeur en banlieue dakaroise (Cliché : Adrien Lammoglia, 12/2011).....	38
Illustration 6 : mosaïque inter-pénétrante des services de transport (France et Sénégal).....	41
Illustration 7 : autobus Dakar Dem Dikk de marque Volvo.....	46
Illustration 8 : le tracé des lignes Dakar Dem Dikk (axes colorés) (Source : Google Earth, CUREM 2011).....	47
Illustration 9 : un car rapide et son apprenti.....	51
Illustration 10 : un Ndiaga Ndiaye et son apprenti.....	52
Illustration 11 : un échangeur de la VDN (au dessus) au croisement avec « l'ancienne piste ».....	57
Illustration 12 : un minibus de marque Tata Motors.....	58
Illustration 13 : les récents minibus de marque King Long.....	59
Illustration 14 : exemple de l'évolution du nombre de passagers pour un itinéraire au centre de Dakar (CUREM 2012b).....	60
Illustration 15 : exemple de l'évolution du nombre de passagers pour un itinéraire en banlieue (CUREM 2012b).....	60
Illustration 16 : fonctionnement du prototype Modulobus (Guillas & Josselin 2012).....	67
Illustration 17 : fonctionnement d'une centrale de réservation pour les TAD.....	69
Illustration 18 : le fonctionnement des garages de « clandos ».....	74
Illustration 19 : le principe de « maraude » à Dakar.....	75
Illustration 20 : un taxi jaune et noir de Dakar.....	84
Illustration 21 : un taxi suster de Dakar (Source : http://yveslebelge.skynetblogs.be/).....	87
Illustration 22 : centrale de réservation de la CCBM.....	89
Illustration 23 : les services de transport sélectionnés.....	93
Illustration 24 : fondements méthodologiques.....	96
Illustration 25 : interactions et niveaux d'organisation d'un système de mobilité.....	101
Illustration 26 : des niveaux de complexité qui diffèrent selon les services de transport.....	103
Illustration 27 : modélisation d'un système de transport et de son environnement (Marcadon et al. 1997).....	107
Illustration 28 : chronologie et évolution des méthodes de modélisation (adapté de (Troitzsch 1997)).....	110
Illustration 29 : schéma d'un modèle basé sur l'agent (adapté de (Treuil et al. 2008)).....	112
Illustration 30 : simulation de trafic (congestion en rouge) sur le réseau de Johannesburg (Fourie 2010).....	114
Illustration 31 : exemple de simulation des mobilités sur Besançon avec MobiSim (Antoni 2012).....	115
Illustration 32 : architecture du modèle MIRO (Banos et al. 2005).....	116
Illustration 33 : capture d'écran d'une simulation avec le Dynamic Carpooling Service Simulator.....	119
Illustration 34 : exemple de simulation avec le modèle AccesSim (Delage et al. 2008).....	120
Illustration 35 : résultat d'une simulation sur 200 ans (200 itérations logicielles) avec le modèle SimpopNet (Schmitt 2013).....	121

Indexes

Illustration 36 : la méthodologie générale.....	131
Illustration 37 : diagramme de classes UML du méta-modèle.....	135
Illustration 38 : modèle graphique de la structure commune des modèles.....	136
Illustration 39 : diagramme d'activité des agents.....	138
Illustration 40 : interface dédiée à la création des territoire virtuels.....	139
Illustration 41 : exemples de réseau aléatoire créé automatiquement.....	140
Illustration 42 : réseau de Manhattan.....	140
Illustration 43 : import d'un fichier image (Source : Google Maps).....	141
Illustration 44 : import d'une couche SIG (Source : GEOROUTE 2013 de l'IGN).....	141
Illustration 45 : le réseau routier d'Avignon, dessiné à partir d'un plan Google Maps.....	142
Illustration 46 : Avignon avec ses zones de fortes et faibles densité de mobilité (source : Google Maps).....	143
Illustration 47 : modélisation du réseau routier simplifié d'Avignon, avec ses zones de fortes et faibles densité de mobilité.....	143
Illustration 48 : modèle simplifié des lignes 1 et 2 du réseau de bus d'Avignon.....	144
Illustration 49 : diagramme d'état transition des bus.....	145
Illustration 50 : choix de déplacement basé sur le potentiel d'attractivité des stations.....	147
Illustration 51 : diagramme d'état transition des véhicules réagissant au potentiel d'attractivité.....	148
Illustration 52 : choix de déplacement basé sur l'attente des clients aux stations.....	150
Illustration 53 : diagramme d'état-transition des véhicules pour le modèle Clandos.....	151
Illustration 54 : choix de déplacement basé sur la coopération inter-véhicule.....	153
Illustration 55 : diagramme d'état transition des véhicules coopératifs.....	154
Illustration 56 : choix de déplacement basé sur la communication véhicules-clients.....	156
Illustration 57 : diagramme d'état-transition des véhicules utilisant le push.....	157
Illustration 58 : diagramme d'activité des agents pour le modèle Modulobus.....	158
Illustration 59 : l'interface de simulation du TCTS.....	159
Illustration 60 : exemple de résultat de simulation observable sur l'interface.....	162
Illustration 61 : les composantes du Trans-Cultural Transport Simulator.....	164
Illustration 62 : organisation des différents étapes de simulation et d'analyse.....	169
Illustration 63 : capture d'écran du réseau en convergence (R1).....	172
Illustration 64 : capture d'écran du réseau en point à point (R2).....	172
Illustration 65: Arbre de simulation pour l'exploration des modèles.....	173
Illustration 66: Distribution des valeurs pour chaque indicateur, tous modèles confondus (dot plot).....	177
Illustration 67: Intervalles de confiance et performances générales pour le réseau en convergence (R1).....	180
Illustration 68 : intervalles de confiance et performances générales pour le réseau en convergence (R2).....	181
Illustration 69 : comparaison des performances selon les trois approches pour le réseau R1.....	183
Illustration 70 : comparaison des performances selon trois approches pour le réseau R2.....	184
Illustration 71 : comparaison des scores selon la vitesse de déplacement des véhicules (e.g. V15 signifie que les véhicules se déplacent 15 fois plus rapidement que les piétons).....	185
Illustration 72 : version 4 de simulation avec le modèle Modulobus.....	186
Illustration 73 : version 4 de simulation avec le modèle Clandos.....	186
Illustration 74 : version 4 de simulation avec le modèle Potential.....	187

Indexes

Illustration 75 : version 4 de simulation avec le modèle Distance.....	187
Illustration 76 : version 4 de simulation avec le modèle Cooperation.....	188
Illustration 77 : version 4 de simulation avec le modèle Random.....	188
Illustration 78 : comparaison des scores selon la capacité d'occupation des véhicules (4, 7 et 20 places).....	188
Illustration 79 : évolution du taux d'occupation (%) au cours de la simulation pour 2 véhicules (modèle Cooperation ; Version 25).....	189
Illustration 80 : évolution du taux d'occupation (%) au cours de la simulation pour 2 véhicules (modèle Random ; Version 25).....	189
Illustration 81 : comparaison des scores selon la proportion de clients et de véhicules.....	190
Illustration 82 : arbre de simulations (phase 2).....	193
Illustration 83 : légende des indicateurs.....	195
Illustration 84 : coefficients de variation des résultats obtenus au cours des 20 simulations.....	196
Illustration 85 : réseau L2.....	199
Illustration 86 : réseau aléatoire.....	199
Illustration 87 : réseau de Manhattan.....	200
Illustration 88 : réseau en étoile.....	200
Illustration 89 : réseau d'Avignon.....	201
Illustration 90 : plan d'Avignon de référence.....	201
Illustration 91 : réseau de la banlieue de Dakar.....	201
Illustration 92 : plan de référence de la banlieue Dakar.....	201
Illustration 93 : légende des indicateurs.....	202
Illustration 94 : coefficient de variation des résultats de simulation.....	202
Illustration 95 : coefficient de variation des résultats de simulation (sans le réseau L2).....	203
Illustration 96 : comparaison de l'efficacité des réseaux pour Modulobus et Cooperation.....	204
Illustration 97 : comparaison de l'efficacité des réseaux pour le modèle Clandos.....	204
Illustration 98 : structure des flux obtenue sur le réseau de Dakar avec le modèle Cooperation.....	205
Illustration 99 : structure des flux obtenue sur le réseau de Dakar avec le modèle Modulobus.....	205
Illustration 100 : structure des flux obtenue sur le réseau aléatoire avec le modèle Clandos.....	205
Illustration 101 : nombre de clients moyen en attente aux stations.....	209
Illustration 102 : temps d'attente moyen des clients aux stations.....	209
Illustration 103 : part des stations avec des clients en attente.....	210
Illustration 104 : taux de desserte.....	210
Illustration 105 : taux de chargement des véhicules.....	210
Illustration 106 : voyageurs par kilomètres.....	210
Illustration 107 : typologie détaillée des modèles.....	213
Illustration 108 : composition des 5 modèles mixtes.....	219
Illustration 109 : le réseau d'Avignon polarisé et ses deux lignes de bus.....	221
Illustration 110 : le réseau de Dakar polarisé et ses deux lignes de bus.....	221
Illustration 111 : arbre de simulation pour la confrontation des modèles.....	223
Illustration 112 : structure des graphiques permettant de comparer les performances des modèles mixtes avec leurs modèles de référence.....	224
Illustration 113 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).....	225
Illustration 114 : nombre moyen de clients en attente.....	225
Illustration 115 : taux de chargement (%)......	226
Illustration 116 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	226
Illustration 117 : proportion de stations avec des clients en attente (%)......	227

Indexes

Illustration 118 : taux de desserte (%).....	227
Illustration 119 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité.....	228
Illustration 120 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau d'Avignon).....	228
Illustration 121 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).....	229
Illustration 122 : nombre moyen de clients en attente.....	229
Illustration 123 : taux de chargement (%).....	230
Illustration 124 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	230
Illustration 125 : proportion de stations avec des clients en attente (%).....	231
Illustration 126 : taux de desserte (%).....	231
Illustration 127 : structure spatiale obtenue pour le cas de faible densité (3 clients/50 itérations).	231
Illustration 128 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité (9 clients/50 itérations).....	231
Illustration 129 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).....	232
Illustration 130 : les principaux axes de desserte observés dans les simulations sur le réseau de Dakar.....	232
Illustration 131 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).....	234
Illustration 132 : nombre moyen de clients en attente.....	234
Illustration 133 : taux de chargement (%).....	235
Illustration 134 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	235
Illustration 135 : proportion de stations avec des clients en attente (%).....	236
Illustration 136 : taux de desserte (%).....	236
Illustration 137 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité.....	236
Illustration 138 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau d'Avignon).....	236
Illustration 139 : les principaux axes de desserte observés dans les simulations sur le réseau d'Avignon.....	237
Illustration 140 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).....	238
Illustration 141 : nombre moyen de clients en attente.....	238
Illustration 142 : taux de chargement (%).....	239
Illustration 143 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	239
Illustration 144 : proportion de stations avec des clients en attente (%).....	239
Illustration 145 : taux de desserte (%).....	239
Illustration 146 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).....	240
Illustration 147 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).....	242
Illustration 148 : nombre moyen de clients en attente.....	242
Illustration 149 : taux de chargement (%).....	242
Illustration 150 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	242
Illustration 151 : proportion de stations avec des clients en attente (%).....	243
Illustration 152 : taux de desserte (%).....	243
Illustration 153 : structure spatiale obtenue pour le cas de moyenne densité.....	244
Illustration 154 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).....	244
Illustration 155 : principe d'hybridation des trois modèles.....	245
Illustration 156 : taux de desserte (%).....	247

Indexes

Illustration 157 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	247
Illustration 158 : capture d'écran des graphiques mis à jour dynamiquement sur l'interface de simulation (modèle hybride phase2 en moyenne densité).....	247
Illustration 159 : nombre moyen de clients en attente aux stations et temps d'attente des clients (modèle hybride phase 3 en moyenne densité).....	248
Illustration 160 : temps d'attente moyen des clients (nombre d'itérations).....	249
Illustration 161 : nombre moyen de clients en attente.....	249
Illustration 162 : taux de chargement (%).....	250
Illustration 163 : voyageurs par kilomètres (VPK).....	250
Illustration 164 : proportion de stations avec des clients en attente (%).....	250
Illustration 165 : taux de desserte (%).....	250
Illustration 166 : nombre de passages de véhicules (Y) selon le rang de l'axe routier (X) (moyenne densité ; réseau de Dakar).....	251
Illustration 167 : synthèse des performances des six modèles composés.....	253
Illustration 168 : les quatre modèles composés les plus typés.....	255
Illustration 169 : typologie des trois modèles de référence.....	255

Index des tableaux

Tableau 1 : Fiche signalétique des services français de grande capacité.....	45
Tableau 2 : fiche signalétique du service d'autobus Dakar Dem Dikk.....	49
Tableau 3 : fiche signalétique des « cars rapides ».....	55
Tableau 4 : fiche signalétique du service de minibus de l'AFTU.....	61
Tableau 5 : fiche signalétique des Transports A la Demande français.....	71
Tableau 6 : fiche signalétique des taxis collectifs à Dakar.....	79
Tableau 7 : fiche de signalétique du taxi français.....	82
Tableau 8 : fiche signalétique des taxis formels de Dakar.....	86
Tableau 9 : fiche signalétique des taxis de la CCBM.....	91
Tableau 10 : l'offre de transport française et sénégalaise regroupée en quatre niveaux de flexibilité.....	94
Tableau 11 : objectifs de modélisation et portée des modèles (adapté de Amblard & Phan 2006; OFTA 2004).....	124
Tableau 12 : les composantes du protocole ODD complétées par une partie dédiée à la synthèse des résultats (en gris) (inspiré de Grimm et al. 2010).....	128
Tableau 13: Fiche signalétique du modèle Bus.....	147
Tableau 14 : fiche signalétique du modèle Random.....	149
Tableau 15 : fiche de synthèse du modèle Distance.....	150
Tableau 16 : fiche de synthèse du modèle Potential.....	150
Tableau 17 : fiche de synthèse du modèle Clandos.....	152
Tableau 18 : fiche signalétique du modèle Cooperation.....	155
Tableau 19 : objectifs fixés pour le prototype Modulobus : en noir ceux atteints dans le modèle SMA, en gris ceux partiellement atteints, en blanc ceux qui n'ont pas été pris en compte.....	156
Tableau 20 : fiche signalétique du modèle Modulobus.....	159
Tableau 21 : liste complète des paramètres de simulation (paramètres variables).....	173
Tableau 22 : ensemble des versions simulées.....	175
Tableau 23 : présentations des classes et caractérisation des résultats.....	179
Tableau 24 : exemple d'attribution des scores pour le modèle Random (réseau R1).....	179
Tableau 25 : synthèse des scores obtenus pour le modèle Random (réseau R1).....	180
Tableau 26 : conditions de simulation pour analyser la variabilité des modèles.....	196
Tableau 27 : intervalles de confiance obtenus pour 20 simulations identiques.....	198
Tableau 28 : conditions de simulation pour analyser l'influence des réseaux.....	200
Tableau 29 : conditions de simulation pour analyser la capacité de montée en charge des modèles (paramètre variable).....	209
Tableau 30 : conditions de simulation retenues pour établir la typologie des modèles.....	213
Tableau 31 : méthode de discrétisation pour l'attribution des scores.....	213
Tableau 32 : caractéristiques clés des modèles.....	219
Tableau 33 : liste complète des paramètres de simulation (paramètres variables).....	223
Tableau 34 : composition du modèle mixte Formel.....	226
Tableau 35 : composition du modèle mixte Informel.....	230
Tableau 36 : composition du modèle mixte Flexible.....	234
Tableau 37 : composition du modèle mixte Régulier.....	239
Tableau 38 : composition du modèle mixte France-Sénégal.....	242
Tableau 39 : comparaison des caractéristiques générales des modèles.....	257

Annexes

Annexes

Annexe 1: Entretien avec le chauffeur de taxi-clandos Elhadji Mor Niang (Cas-bah)

1 Le métier de taximan :

- En résumé quel est votre parcours professionnel ? Comment êtes vous arrivé au métier de taximan ?

« J'ai commencé à travailler dans le transport en tant qu'apprenti dans mon village. Je travaillais dans les mini-bus inter-villes. Après ça j'ai essayé plusieurs métiers, j'ai fais de la débrouille. J'ai fais un peu de couture puis j'ai travaillé dans une alimentation. A ce moment là je me suis un peu intéressé au métier de taximan, puis j'ai décidé de venir ici à Cas-bah pour travailler en tant que chauffeur. Au début j'étais surtout coxeur, en attendant de trouver un véhicule. Ça fait maintenant 5 ans que je travaille ici en tant qu'employé. »

- Pouvez-vous me dire ce qu'est pour vous une journée de travail classique ? Quel est votre rythme de travail ? Combien de jours par semaine ? Combien d'heures par jour ?

« En général je travaille tous les jours de 6h à 17h en faisant une pause en milieu de journée. Tout dépend de ma fatigue et de la recette mais en général vers 17h je peux arrêter. »

- Est ce que vous pensez que beaucoup de chauffeurs fonctionnent comme vous ?

« Oui je pense. »

2 La manière de travailler :

Organisation spatiale des tournées :

- Durant vos journées de travail est ce que vous avez des parcours types ?

« Oui tous les jours je viens ici au garage de Cas-bah et je fais le trajet en direction de Corniche (Guediawaye) »

- Si oui combien faites vous d'aller et retour par trajets ?

« Ça dépend si je décide d'attendre au garage ou si je pars chercher des clients sur la route. Le garage fonctionne par ordre d'arrivée. On fait la queue et chacun notre tour nous prenons les clients. Si je respecte l'ordre d'arrivée je vais faire environ une 20aines d'aller-retours. Si je décide de ne pas attendre et de partir en maraude je peux faire 30 à 40 aller-retours. »

- Est ce qu'ils vous arrivent de changer de parcours ? Si oui en fonction de quoi vous allez changer votre parcours ?

« Oui souvent. Tout dépend de la demande. Il m'arrive parfois de changer de trajet et d'aller vers Pikine. En général je ne change jamais d'itinéraire sauf si des clients me proposent une course intéressante. »

- Si 4 clients vous demande une destination complètement différente de vos parcours habituel est ce que vous allez accepter ? En fonction de quoi vous allez faire votre choix ? N'avez vous pas peur de ne pas trouver de clients une fois sorti du circuit ?

« Oui bien sur. Ça dépend de la destination et du prix mais en général je trouve toujours des clients sur la route. »

- Lorsque vous n'avez pas de client quelle stratégie adoptez vous ?

- Est ce que vous allez rouler à petit feu en appelant les clients ?

« Si c'est en heure pleine je fais de la maraude car je suis quasiment sur de trouver des clients. »

- Est ce que vous préférez vous arrêter à un endroit stratégique ?

« Oui je m'arrête souvent au garage. Pour rester au garage on doit payer une carte, une cotisation. En général à partir de 10h-11h je viens au garage attendre mon tour. Par contre la maraude est interdite devant le garage. Quand tu viens ici tu dois forcément attendre ton tour. »

Annexes

- Pour chercher des clients vous préférez les grands axes ou les petites rues de quartier ?

« Je reste sur les grands axes uniquement. »

- Est ce que pour organiser vos trajets vous prenez en compte l'actualité et le rythme de vie des gens
 - Est-ce que par exemple vous êtes attentifs aux événements qui se passent dans la ville ce qui va vous encourager à choisir vos lieux de desserte (par exemple un match de foot, un grand concert, une grande conférence, etc) ?

« En banlieue il n'y a pas vraiment d'événement mais des fois je regarde s'il y a des soirées dans les boites. Si oui je vais me diriger vers la bas car il y aura forcément de la demande. »

- Vous n'avez pas peur des embouteillages, ou de vous faire abîmer le véhicule ?

« Non en général ce sont de petits embouteillages, il n'y a pas vraiment de problèmes. »

- Est ce que vous êtes attentifs au rythme de vie des gens : difficulté financière, fêtes religieuses, fêtes nationales, vacances, etc. ?

« Pour les clandos le prix est fixe donc nous ne sommes pas sensible à ce genre de choses. »

Coopération :

- Est ce que vous communiquez/collaborez souvent avec d'autres taximan ?

« Oui vraiment. Avec les chauffeurs on a créé une coopérative. On a ouvert un compte en banque et chacun cotise. L'argent est utilisé pour aider un chauffeur en difficulté (problème familiale, problème de voiture). »

- D'accord mais est ce que vous vous donnez des conseils pour faire fonctionner votre service ?

« Oui on discute beaucoup entre nous. On parle des clients mais ce sont plutôt des tendances, on parle en général. »

- Est-ce que vous indiquez des lieux à desservir (par téléphone ou autre) ?

« Non on ne communique jamais pour se dire où sont les clients. Par contre on s'appelle quand on voit un policier et pour dire aux autres d'éviter de se faire prendre. »

- Est-ce que vous vous organisez pour vous répartir les clients ?

« Oui mais on utilise seulement l'ordre d'arrivée du garage. »

- Est ce que vous faites souvent appel à un coxeur pour vous aider à remplir votre taxi ?

« Oui. Au garage il y a toujours des chauffeurs sans véhicules qui font coxeur. En général il y en a trois ou 4. »

- Comment fonctionne la coopération avec les coxeurs ?

« Les coxeurs rassemble les clients dans les voitures par ordre d'arrivée. Quand la voiture part elle donne 50 Fcfa aux coxeurs. »

- Est ce que vous pensez que les coxeurs sont indispensables ?

« Ce n'est pas indispensable mais c'est vraiment utile pour nous. Le travail est plus simple. C'est aussi de la solidarité envers les chauffeurs sans véhicules. »

Rentabilité :

- Vous avez plutôt tendance à vous satisfaire d'une journée correcte ou vous cherchez à maximiser toujours plus le profit ?

Annexes

« Le propriétaire ne me demande pas un versement trop élevé donc en général à 20h j'ai de quoi payer mon versement et mon gazole. »

- Est ce que le véhicule sert à d'autres personnes que vous ? (pour du taxi ou une utilisation personnelle du propriétaire par exemple)

« La voiture roule tous les jours en continue du matin jusqu'au soir, voir même la nuit. Je suis le chauffeur titulaire du véhicule mais j'utilise de temps en temps un suppléant. Si ce n'est pas moi c'est le suppléant qui conduit. Je cherche mon versement et mon gazole et le plus de la journée je le partage avec mon suppléant. »

3 Le contexte du taximan

- Est ce que vous avez l'impression de vraiment vous adapter à la demande de mobilité des gens ?

« Oui car ici il y a vraiment un problème de transport. Je travaille pour satisfaire les gens, pour qu'il puisse se déplacer. »

- Quelle est selon vous la place des taxis-clandos face au reste de l'offre de transport à Dakar ? (indispensable, complémentaire, trop importante, pas assez importante, etc)

« Au niveau de la banlieue, les clandos jouent un rôle très très très important. Si il n'y avait pas de clandos, les gens payeraient trop cher leur déplacement. »

- Est ce que vous pensez que c'est un mode de transport efficace ?

« Oui en banlieue vraiment. »

- Est ce que vous pensez que les gens sont satisfait de votre service ?

« Oui tout à fait. »

- Selon vous comment va évoluer votre métier au cours des prochaines années ?

« Aujourd'hui le travail est difficile car le prix des versements à augmenté. Il y a de plus en plus de chauffeurs mais il y a de moins en moins de clients à cause par exemple des TATA qui nous prennent beaucoup de clients. Le problème est que les TATA fonctionnent sur les mêmes lignes que nous mais eux ils prennent beaucoup de clients. Ils ne respectent même pas la limite de clients autorisées. »

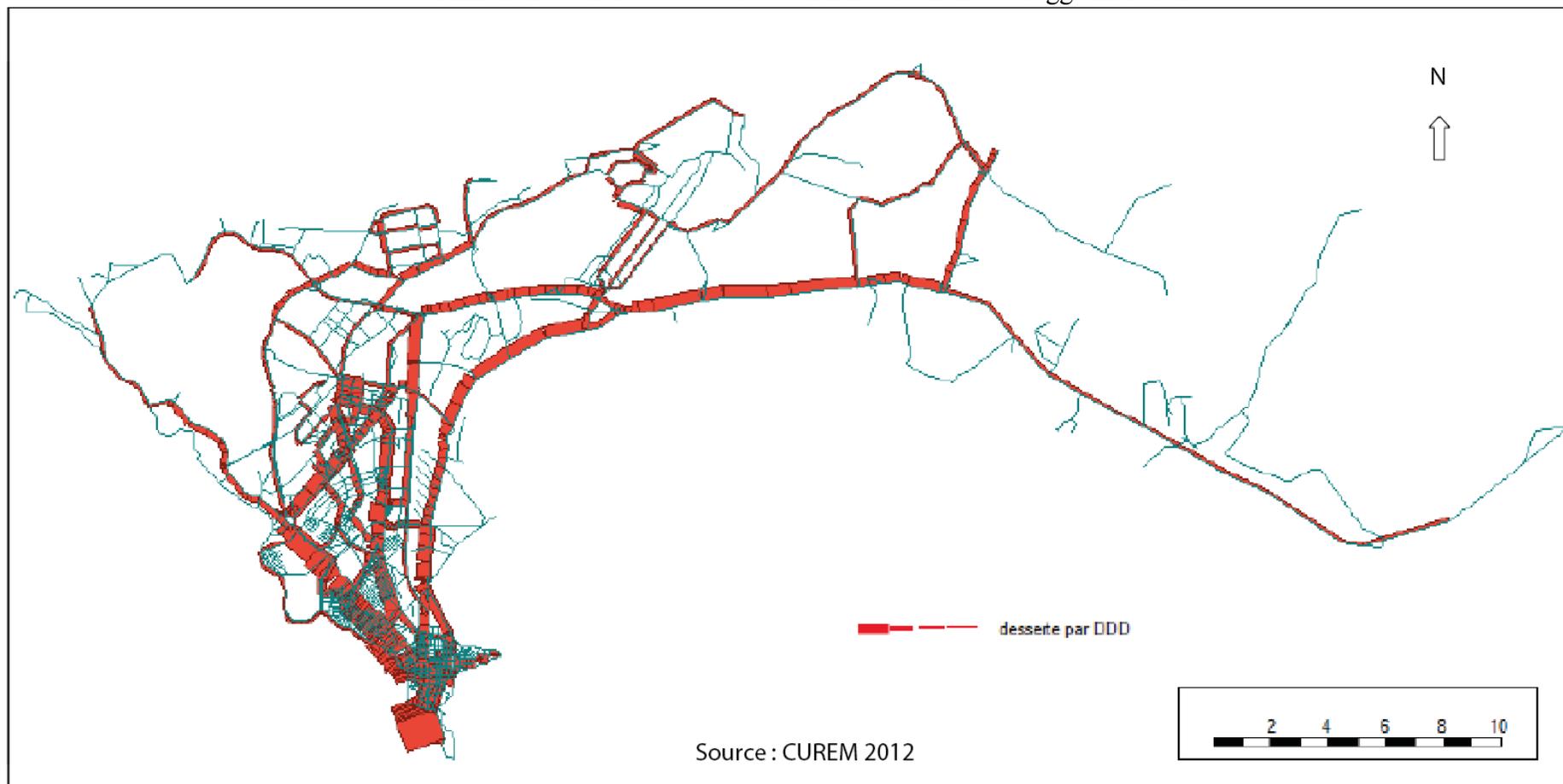
- Comment vous aimeriez qu'il évolue ?

« Il faudrait mieux s'organiser entre les chauffeurs et les propriétaires pour améliorer nos conditions de travail. Il faudrait qu'on se réunisse autour d'une table pour discuter. »

- A termes vous ne voudriez pas investir dans un véhicule ?

« Oui bien sur mais on ne me paye pas assez pour que je puisse économiser. »

Annexe 2 : densité de desserte de DDD à l'échelle de l'agglomération.



Annexe 3 : plan de Dakar et localisation de quelques garages de taxis « *clandos* » (Source : Google Maps).



Annexe 4 : exemple de code extrait du simulateur.

```

plotting
draw.traffic
update.draw.traffic
tick
end

to choose.clients.station.modulobus
ask clients with [vehicle? = 0]
[
  if [targeted] of final_destination = 1
  [
    set list_vehicles_serving_destination [serving_taxi] of final_destination
    set list_vehicles_serving_destination sort-by [[distance myself] of ?1 < [distance myself] of ?2] list_vehicles_serving_destination
    let vehicle_to_take first list_vehicles_serving_destination
    set push_of_vehicle [push] of vehicle_to_take
    set push_of_vehicle sort-by [[distance myself] of ?1 < [distance myself] of ?2] push_of_vehicle
    let best_station_push first push_of_vehicle
    if [distance myself] of best_station_push < max_walking_distance
    [
      set station_to_wait best_station_push
    ]
  ]
]
end

to go.vehicles.modulobus ; Sequence des procedures des vehicules
ask vehicles with [model = 5]
[
  ifelse state = 0
  [choose.station.modulobus]
  [ifelse state = 1
  [pick.up.clients.modulobus]
  [ifelse state = 2
  [drop.clients.modulobus]
  [circulate]
  ]
]
]
end

to choose.station.modulobus ; To choose the next stops of vehicles
ifelse final_destination_vehicle = 0
[
  let na current_node
  set current_node next_node
  set next_node one-of [link-neighbors] of current_node
  let ns next_node
  ask current_node
  [
    ask link-with ns [ set gross_traffic (gross_traffic + 1)]
    set frequentation frequentation + 1
  ]
]
]

```

Annexe 5 : extrait de code pour la création du *push* du *Modulobus*

```

TCTS v51 - NetLogo (D:\geographie\Thèse\Modélisation\TCTS)
File Edit Tools Zoom Tabs Help
Interface Info Code
Find... Check Procedures Indent automatically

set state 3
end

to make.push.modulobus
  set s1 current_node
  set final_destination_push final_destination_vehicle
  set push fput final_destination_push push
  set s2 next_node
  set next_link_neighbors_push [link-neighbors] of s2
  set next_link_neighbors_push sort-by [[distance final_destination_push] of ?1 < [distance final_destination_push] of ?2] next_link_neighbors_push
  set s3 min-one-of [link-neighbors] of s2 [distance final_destination_push]
  while [s3 = s1 and length next_link_neighbors_push > 1]
  [
    set s3 one-of [link-neighbors] of s2
  ]
  while [s3 != final_destination_push]
  [
    set push fput s3 push
    set s1 s2
    set s2 s3
    set next_link_neighbors_push [link-neighbors] of s2
    set next_link_neighbors_push sort-by [[distance final_destination_push] of ?1 < [distance final_destination_push] of ?2] next_link_neighbors_push
    set s3 min-one-of [link-neighbors] of s2 [distance final_destination_push]
    while [s3 = s1 and length next_link_neighbors_push > 1]
    [
      set s3 one-of [link-neighbors] of s2
    ]
  ]
end

to pick.up.clients.modulobus ;
  if any? clients-here with [vehicle? = 0]
  [
    let nb-clients-ici [nb_clients_waiting] of next_node
    if length my_clients = 0
    [
      set final_destination_vehicle [final_destination] of one-of clients-here with [vehicle? = 0]
      make.push.modulobus
      ask final_destination_vehicle
      [
        set serving_taxi fput myself serving_taxi
        set targeted 1
      ]
    ]
  ]

```

Annexe 6 : organisation des procédures pour le modèle mixte France-Sénégal.

The screenshot shows the NetLogo software interface. The title bar reads 'TCTS v49 - NetLogo (D:\simulations\part3\simu2)'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Tools', 'Zoom', 'Tabs', and 'Help'. Below the menu bar are tabs for 'Interface', 'Info', and 'Code', with 'Code' being the active tab. A toolbar contains a magnifying glass icon for 'Find...', a checkmark icon for 'Check', a dropdown menu currently set to 'Procedures', and a checked checkbox for 'Indent automatically'. The main area is a code editor displaying the following NetLogo code:

```

; mixte frsn model
;::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
;::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

to go.mixte.frsn
  if ticks = (patterns * nb_ticks_patterns - 1)
  [
    ifelse zone? = true
    [
      create.clients.zone
      update.stations.potential
      choose.clients.final.destination
      set patterns (patterns + 1)
    ]
    [
      create.clients
      create.clients
      update.stations.potential
      choose.clients.final.destination
      set patterns (patterns + 1)
    ]
  ]
  go.vehicles.clandos
  choose.clients.station.modulobus
  move.clients
  count.clients.waiting
  go.vehicles.modulobus
  plotting
  draw.traffic
  update.draw.traffic
  tick
end

```

Annexe 7 : intervalles de confiance pour la première phase de simulation.

Modèles	Rapport nb clients / véhicules	IC	Facteur vitesse	IC	Capacité des véhicules	IC
Modulobus	F1	75,85	V15	74,46	C4	76,07
		78,31		78,31		78,93
	F2	77,77	V30	76,53	C7	75,24
		80,56		79,58		77,68
	F4	72,25			C20	76,37
		74,97				79,04
cooperation	F1	64,25	V15	66,76	C4	71,29
		73,94		75,74		77,88
	F2	75,36	V30	76,73	C7	71,56
		81,23		80,77		77,61
	F4	74,96			C20	73,64
		78,51				78,03
clandos	F1	49,39	V15	50,74	C4	52,31
		53,39		55,37		54,36
	F2	51,63	V30	49,75	C7	51,87
		55,66		54,14		55,21
	F4	48,89			C20	48,96
		57,36				52,29
potentiel	F1	54,79	V15	54,69	C4	56,63
		61,88		59,75		62,12
	F2	60,06	V30	61,36	C7	57,67
		68,41		68,64		62,33
	F4	56,47			C20	61,57
		65,75				66,34
distance	F1	56,82	V15	58,18	C4	59,78
		64,01		65,15		64,38
	F2	61,89	V30	64,2	C7	61,9
		67,97		68,85		66,02
	F4	68,04			C20	64,01
		71,54				68,49
random	F1	56,75	V15	59,32	C4	61,95
		66,86		68,18		69,3
	F2	64,92	V30	68,95	C7	64,35
		73,62		75,22		70,24
	F4	73,95			C20	68,37
		76,05				73,29

Résumé / Abstract

Résumé

Organiser le secteur du transport pour offrir des solutions de déplacement efficaces est aujourd'hui un enjeu capital pour nos sociétés. La flexibilité, tendant à augmenter la qualité de service, constitue un des leviers pour améliorer les transports. Diverses formes de flexibilité apparaissent en effet dans l'offre actuelle. Dans cette thèse, nous appréhendons plus particulièrement des services opérant dans deux contextes sociétaux distincts :

- d'une part, dans un pays industrialisé (la France) où le recours aux transports publics reste minoritaire car la dépendance à l'automobile est toujours très forte ;
- d'autre part, dans un pays en voie de développement (le Sénégal) possédant des moyens financiers limités, mais où l'usage des transports collectifs est généralisé, impliquant une grande diversité des modes et une atomisation de l'offre.

Nous proposons ainsi d'analyser et de comparer le fonctionnement des transports informels et artisanaux sénégalais (tels que les taxis collectifs) avec celui des systèmes considérés comme plus modernes en France, 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 publiques générant des contraintes réglementaires et spatiales. À l'opposé, les services spontanés et dérégulés qui sont proposés au Sénégal bénéficient d'une plus grande souplesse, au détriment de la sécurité des passagers.

L'objectif de la thèse est d'analyser ces services, les modéliser et les simuler afin d'évaluer les apports de la flexibilité. D'un point de vue méthodologique, notre recherche est basée sur un ensemble de modèles inspirés des transports observés en France et au Sénégal, puis implémentés en Systèmes Multi-Agents (SMA) dans l'environnement Netlogo. Certains modèles sont issus d'une analyse fonctionnelle de terrain et d'autres sont plus théoriques.

Par l'analyse du comportement d'agents réalisant ces services en concurrence et/ou en coopération, nous identifions d'abord des seuils et des conditions de mise en œuvre en termes d'efficacité et de couverture spatiale. En simulant les modèles sur plusieurs configurations spatiales, nous explorons ensuite leur fonctionnement et nous analysons les atouts et les faiblesses de chacun. Nous les simulons ensuite simultanément pour évaluer leur capacité de complémentarité. Cela nous permet *in fine* de confronter des systèmes de transports analogues à ceux observés dans les deux contextes sociétaux et d'établir une grille de comparaison en fonction des niveaux de flexibilité identifiés.

Abstract

Organizing and developing efficient urban transportation services is a key issues for actual society. The flexibility appear as an important criteria to improve the services quality and to offer attractive transportation solutions. Different forms and levels of flexibility exist in the actual supply-side. For this research we focus on flexible transports operating in two society contexts:

- in an industrial country (France) where the using rate of public transportation services is low because the automobile dependency is still high;
- in a developing country (Senegal), where the financial resources are limited and the utilisation of public transports is generalized, leading to a diversity of services and an atomic supply-side.

More precisely, we compare the functioning of senegalese para-transit services (as collective taxis) with french technological systems (as Demand Responsive Transport (DRT)). In France, auto-organization skills and collective behaviours have been replaced by the utilisation of high level information, communication and logistic systems. These innovations bring more immediacy and spontaneity in public transports, but it needs a strong supervision from authorities, causes regulatory ans spatial constraints of servicing. In contrast, in Senegal deregulated services benefit to more spontaneity and suppleness to the detriment of the passengers security.

The objective of the thesis is to analyse, model and simulate these services to evaluate the contributions of the flexibility. Regarding the methodology, our study is based on a group of models inspired by transportation systems observed in France and Senegal and implemented in Multi-Agent Systems (MAS), in the NetLogo environnement. Some models are derived from a functional analysis and others are more theoretical.

By analysing behaviours of agents performing these services in concurrency or in cooperation, we highlight some thresholds and optimal conditions of coverage. Simulations in various spatial configurations allow to explore model functioning and to analyse their strengths and limitations. Then, we simulate models in parallel (two models by simulation) to evaluate their complementarity. We compare these combined models, all of them representing transportation services observed in two different contexts. Finally, we build a comparison matrix of clues according to the model performance and flexibility levels. To conclude, this research leads to a valuable reflection on how could be designed flexible transport services in the future.