Méthodes et modèles pour l'étude de la mobilité des personnes par l'exploitation de données de radiotéléphonie

Chloé Milion

▶ **To cite this version:**

Chloé Milion. Méthodes et modèles pour l'étude de la mobilité des personnes par l'exploitation de données de radiotéléphonie. Calcul [stat.CO]. Université Paris-Est, 2015. Français. NNT : 2015PESC1199 . tel-01375655

HAL Id: tel-01375655
https://pastel.hal.science/tel-01375655

Submitted on 3 Oct 2016

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.

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est
Ecole Doctorale Ville Transport et Territoires

Spécialité transport

Chloé MILION

METHODES ET MODELES POUR L'ETUDE DE LA MOBILITE DES PERSONNES PAR L'EXPLOITATION DE DONNEES DE RADIOTELEPHONIE

Thèse soutenue le 16/12/2015.

Thèse dirigée par Vincent AGUILERA

Jury :

- Fabien LEURENT, Professeur à l'Ecole des Ponts ParisTech, Directeur Adjoint du Laboratoire Ville Mobilité Transports. Président du jury.
- Alexandre CAMINADA, Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Laboratoire Systèmes et Transports. Rapporteur.
- Patrick BONNEL, chercheur au Laboratoire d'Économie des Transports (Unité mixte CNRS N°5593), Chef du département Transports à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. Rapporteur.
- Dominique SERVIER-CROUZAT, Senior Business Developer, Orange/Smart Cities. Examinateur.
- Olivier RICHARD, Directeur de projets Technologies numériques et enquêtes de mobilité, Cerema, Direction technique Territoires et Ville. Examinateur.
- Sylvain ALLIO, Orange R&D. Encadrant.
- Vincent AGUILERA, chercheur associé au Laboratoire Ville Mobilité Transports, Chef de la Division Optimisation de l'Usage des Réseaux, Cerema, Direction Technique Infrastructures de Transports et Matériaux. Directeur de thèse.

Résumé

Ce travail de thèse repose sur les intrications entre deux domaines : celui des transports et celui des télécommunications. L'usage intensif et quotidien des réseaux entraîne de la part des acteurs de chacun des domaines des besoins d'analyse pour assurer et garantir la qualité des services fournis aux usagers. Nous nous proposons alors de fournir aux acteurs du transport des mesures des déplacements réalisées à partir de données de signalisation qu'ils pourront traiter avec leur connaissance métier et prendre des décisions sur des sujets étendus allant de l'aménagement du territoire à l'opération des réseaux de transports. Les méthodologies de mesure de déplacements présentées sont basées sur l'exploitation de traces numériques dans les réseaux mobiles. Ces traces sont le reflet de l'usage d'un réseau de télécommunications et existent à des fins d'opération.

Les méthodes proposées ici trouvent leur fondement dans notre connaissance du fonctionnement de la téléphonie mobile et sur le traitement des énormes volumes de données que génèrent les terminaux mobiles quotidiennement en tout endroit opéré par Orange. Nous verrons que l'activité de ces terminaux embarqués au niveau de l'individu permettent d'estimer des attributs des déplacements, des volumes par paire origine-destination, des indicateurs de qualité de service ou encore de quantifier des facteurs explicatifs de choix de déplacements. Les relations d'usage explorées au travers de cette signalisation mobile offrent également la possibilité de caractériser l'usage du sol.

Abstract

This work stands on the close relationship that exists between two areas one use every day, namely transportation and telecommunications. Due to a daily and intensive usage of both networks, actors of each area raise up some needs to ensure delivered services and their quality to their end-users. Then, we propose to the actor of transportation measurement of performed trips that can be treated with the knowledge of the transportation actors trade in order to ease the decision making process on matters that go from land uses up to network operation. The methodologies presented here from trip measurement are based on the exploitation of the digital footprints that are fund within a telecommunication network. Those footprints are reflecting how the network is used and already exist for operating purposes.

The methods proposed in this work result from our knowledge of the telecommunication mechanisms and the huge amount of data that are generated at every time and every place where Orange is operating. We introduce that mobile equipment embedded onto individuals of whom we capture their activity can lead to estimate trips attributes, origin-destination trip tables, quality of service indicators and quantification of explain factor of trip choices. We also show how the mining of usage relationship through signaling data can lead to the characterization of land use.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord l'entreprise Orange pour m'avoir offert autant d'opportunités depuis mon stage de fin d'étude jusqu'à mon embauche au sein de l'entité où j'ai effectué la thèse après un passage dans l'équipe FluxVision. A ce titre, je remercie les personnes qui m'ont fait confiance pour ces collaborations : Naveena Genay, Jean-François Floc'h, Pascal Chambreuil et Stéphane Devaux. Des remerciements chaleureux vont également à Pierrick Nolet qui a su créer une atmosphère propice au sérieux et à l'effusion d'idées dans notre bureau. Et je n'oublie pas tous les encouragements de mes collègues de DMT, d'OPS et de WEP. Cette thèse n'aurait pas eu lieu sans mon encadrant côté Orange, Sylvain Allio, qui s'est investi pour que ce partenariat entre Orange et le LVMT porte ses fruits. Cet à travers cette collaboration que j'ai pu profiter du soutien et des conseils précieux, de Vincent Aguilera et Fabien Leurent. Vincent a su rendre mes déplacements mensuels sur à la Cité Descartes aussi instructifs que sympathiques. Encore un grand merci à mes deux encadrants, Vincent et Sylvain, sans qui rien n'aurait été possible. Je voudrais remercier également les membres du jury que je n'ai pas encore cité, messieurs Patrick Bonnel, Alexandre Caminada, Dominique Servier-Crouzat, Olivier Richard, pour leur temps consacré à la longue lecture de ce manuscrit ainsi que leurs remarques pertinentes sur ce travail de thèse. J'ai particulièrement apprécié nos échanges lors de la partie discussion de la soutenance. Un remerciement particulier à Alexandre, qui m'a offert l'opportunité d'intervenir dans un de ses modules sur les systèmes de localisation à l'UTBM, et à Dominique qui est intervenu en tant que Business Developper lors de notre collaboration avec le STIF et RATP sous l'étiquette FluxVision.

Je n'aurais pas pu accomplir ce projet qui me tenait à cœur sans l'appui constant et inébranlable de mon entourage proche. Je veux parler de mes amis des classes préparatoires et de l'ENSEA qui se reconnaitront sans mal. Mais par-dessus tout, des remerciements sont de rigueur pour mes parents, mon frère et mes grands-parents qui se sont dévoués pour me voir m'accomplir dans mes passions depuis mon entrée en maternel, et pour mes beaux-parents pour leur compréhension mais essentiellement pour avoir élevé mon soutien numéro 1 : mon mari. Ces quelques années qui ont bien occupé mon esprit et mon temps n'auraient pu produire un tel résultat sans ses petits plats, sa patience et son dévouement.

Merci à vous tous qui de plus près ou de plus loin ont contribué à rendre ces années aussi agréables qu'intéressantes et productives.

TABLE DES MATIERES

RESUME **1**

ABSTRACT **1**

TABLE DES MATIERES **5**

INTRODUCTION **15**

INTRODUCTION **18**

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION AU DOMAINE DES TRANSPORTS PAR ANALOGIE HISTORIQUE AVEC LE DOMAINE DES TELECOMMUNICATIONS **19**

1 TRANSPORT ET TELECOMMUNICATIONS : CONSTAT DES INTERRELATIONS **20**

1.1 LES INTERRELATIONS SOCIALES 21
1.2 LES INTERRELATIONS GEOGRAPHIQUES 21

2 ANGLE DE LA HIERARCHIE MODALE **22**

2.1 LES PHASES D'EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES 23
2.1.1 Les premières phases d'évolutions technologiques *23*
2.1.2 Etat actuel : Un panel varié de technologies disponibles *23*
2.1.2.1 Bilan des modes disponibles sur un réseau de transport *24*
2.1.2.2 Bilan des modes disponibles sur un réseau de télécommunications *24*
2.2 UNE EVOLUTION DES SEGMENTS D'USAGERS 25
2.2.1 Les premières phases d'évolution des segments d'usagers *25*
2.2.2 D'une technologie pour chaque usage vers une technologie pour plusieurs usages *25*

3 LA GOUVERNANCE DES RESEAUX **27**

3.1 DES PREMIERS INVESTISSEURS PRIVES 27
3.2 UNE CENTRALISATION PAR L'ETAT 28
3.3 UN PAYSAGE MIXTE ENTRE PUBLIC ET PRIVE 30
3.3.1 L'évolution contemporaine de la gouvernance des réseaux *30*
3.3.2 La gouvernance en résumé *35*
3.3.3 Quelles sont les conséquences de ce paysage mixte pour les différents acteurs ? *37*

4 L'EXPLOITATION DES RESEAUX **38**

4.1 UNE EVOLUTION DES ENJEUX DE L'EXPLOITATION 38
4.1.1 Un réseau à construire *38*
4.1.2 Les débuts de l'outillage d'aide à l'exploitation *38*
4.1.3 La fin des investissements massifs en infrastructure : quelles options pour l'exploitant face à une demande croissante ? *39*
4.2 PRESENTATION DU CONTEXTE ACTUEL D'EXPLOITATION 44
4.2.1 Le rôle des exploitants *45*
4.2.2 L'exploitation : un monde contraint *45*

5 CONCLUSION **46**

5.1 VERS QUELLES INTERACTIONS ENTRE RESEAUX DE TRANSPORT ET RESEAUX DE COMMUNICATIONS ? ... 46
5.1.1 Des outils de planification transport pour l'aide au déploiement des réseaux de télécommunication *46*
5.1.2 Faciliter l'opération des transports via les réseaux de télécommunications ? *47*
5.2 UN BILAN SUR LES RESEAUX DE TRANSPORT 48

CHAPITRE 2 : ETAT DES LIEUX DE LA PRATIQUE DE LA MOBILITE SUR LES RESEAUX DE TRANSPORT **49**

1 CONCEPT DE MOBILITE **50**

1.1 CONCEPT DE MOBILITE INDIVIDUELLE 51
1.2 EVALUER LA MOBILITE AU TRAVERS D'INDICATEURS 52

1.2.1 La notion d'accessibilité *53*
1.2.1.1 Une accessibilité « en distance » *54*
1.2.1.2 L'accessibilité potentielle des lieux : une mesure de l'offre de transport *54*
1.2.1.3 Les mesures d'accessibilité représentent-elles la réalité du trafic ? *57*
1.2.2 Observer la demande : un besoin évident *57*
1.3 CONCLUSION 61

2 QU'EST-CE QU'UN DEPLACEMENT ? 61

2.1 LES DIFFERENTES FACETTES D'UN DEPLACEMENT 61
2.2 DEFINITION ADOPTEE POUR UN DEPLACEMENT 63
2.3 FIXER LES ATTRIBUTS D'UN DEPLACEMENT 64
2.3.1 Influence des conditions externes au déplacement sur les attributs d'un déplacement *64*
2.3.2 Impact des caractéristiques individuelles sur les attributs d'un déplacement *65*

3 EVOLUTION DES PRATIQUES DE MOBILITE 69

3.1 INCIDENCES DES MUTATIONS DE LA SOCIETE SUR LES PRATIQUES DE DEPLACEMENTS 69
3.1.1 Incidences des mutations sociétales *70*
3.1.2 Incidence des mutations de l'assise spatiale de la société *72*
3.1.3 Quels effets sur la mobilité ? *73*
3.1.4 Quels effets sur la l'analyse de la mobilité ? *75*
3.2 COMPLEXIFICATION DES SCHEMAS DE DEPLACEMENT : LE CHAINAGE 76
3.2.1 Concepts d'une chaîne de déplacement *78*
3.2.2 Paramètres influençant la structure d'une chaîne *79*
3.2.3 Incidence de la structure d'une chaîne de déplacements sur la structure des déplacements *79*
3.3 L'ACCES A L'INFORMATION TRANSPORT POUR L'USAGER 80
3.4 CONCLUSION 83

4 LES DEPLACEMENTS : UN OBJET COMPLEXE A MESURER 83

CHAPITRE 3 : ETAT DES LIEUX DES OUTILS POUR TRAITER DES PROBLEMATIQUES RENCONTREES EN TRANSPORT 87

1 LES BESOINS D'ANALYSE SOCIO-ECONOMIQUE 88

1.1 UN CONSTAT FAIT PAR LES ACTEURS 89
1.1.1 Importance de la modélisation des déplacements *89*
1.1.2 Evolution de la modélisation avec les objectifs de planification des déplacements *91*
1.1.3 Recommandations actuelles pour l'aide à la décision d'investissement *95*
1.1.3.1 Assurer la solidité des modèles pour l'aide à la décision d'investissements *96*
1.1.3.1.1 Améliorer les modèles de trafic *96*
1.1.3.1.2 Traitement des valeurs unitaires *97*
1.1.3.1.3 Réflexions complémentaires *102*
1.1.3.2 Les recommandations d'enrichissement du calcul traditionnel *103*
1.1 EXEMPLES DE PROBLEMATIQUES ACTUELLES 104
1.1.1 Exemples de problématiques de planification *105*
1.1.1.1 Les ZAPA *105*
1.1.1.2 Les péages urbains *106*
1.1.1.3 La désynchronisation des déplacements *106*
1.1.2 Exemples de problématiques d'exploitation *108*
1.1.2.1 Régulation du trafic par modulation de la vitesse *108*
1.1.2.2 Régulation du trafic par modulation de la capacité *109*
1.1.2.3 Régulation du trafic par de l'information dynamique aux usagers *110*
1.2 CONCLUSION 111

2 REVUE DES PRINCIPALES FAMILLES D'OUTILS UTILISES DANS LES ETUDES TRANSPORTS 112

2.1 MULTIPLICITE DES MODELES 113
2.1.1 Une décomposition en sous-systèmes *115*
2.1.1.1 Sous-système des transports *115*

2.1.1.2 Sous-système de localisation des activités ... *115*
2.1.1.3 Sous-système des relations sociales ... *115*
2.1.2 Nature des interactions ... *116*
2.1.2.1 Sous-famille A : Interactions négligeables entre les sous-systèmes ... *116*
2.1.2.2 Sous-famille B : Prise en compte partielle des interactions entre les sous-systèmes ... *117*
2.1.2.3 Sous-famille C : Fortes interactions ... *117*
2.2 MODELES DE DEMANDE DE DEPLACEMENTS ... 118
2.2.1 Notion de coût généralisé et fonction d'utilité ... *119*
2.2.2 La modélisation à « 4 étapes » ... *123*
2.2.2.1 Etape de génération ... *124*
2.2.2.2 L'étape de distribution ... *126*
2.2.2.3 L'étape de répartition modale ... *130*
2.2.2.4 L'étape d'affectation ... *132*
2.3 PRENDRE EN COMPTE L'USAGE DU SOL ... 134
2.4 LA GESTION DU TRAFIC ... 135
2.4.1 Le diagramme fondamental ... *135*
2.4.2 Modéliser le trafic ... *139*

3 CONCLUSION ... 140

CONCLUSION DE PARTIE ... 142

CHAPITRE 4 : COMMENT « SIGNALER » UN DEPLACEMENT ? ... 147

1 L'AVENEMENT DES METHODES DE COLLECTES NUMERIQUES ... 148

1.1 LES METHODES ACTIVES DE RECUEIL DE DONNEES ... 148
1.1.1 Présentation des méthodes de recueil ... *149*
1.1.1.1 L'Enquête National Transport et Déplacements (ENTD) ... *149*
1.1.1.2 Les Enquêtes Ménages-Déplacements (EMD) ... *149*
1.1.1.3 Les enquêtes Origine-Destination ... *152*
1.1.1.4 Les enquêtes cordons ... *152*
1.1.2 Des méthodes adaptées aux nouveaux besoins ? ... *153*
1.2 LES CAPTEURS NUMERIQUES DE DEPLACEMENTS ... 155
1.2.1 Vers des méthodes de recueil passives ? ... *155*
1.2.2 Les systèmes de capture « fixes » ... *156*
1.2.2.1 Approche « Eulérienne » ... *157*
1.2.2.2 Approche « Lagrangienne » ... *158*
1.2.3 Les systèmes de capture « mobiles » ... *159*
1.2.3.1 Les points de collecte d'un réseau de téléphonie mobile ... *160*
1.2.3.2 Traitement des données collectées en P ... *162*
1.2.3.3 Traitement des données collectées en S ... *163*
1.3 CONCLUSION ... 168

2 PRESENTATION DES DONNEES DE SIGNALISATION ... 170

2.1 LES DONNEES DE SIGNALISATION ... 170
2.1.1 Présentation d'un réseau de télécommunication ... *171*
2.1.1.1 Découpage du « territoire mobile » ... *171*
2.1.1.2 Architecture d'un réseau de télécommunications ... *172*
2.1.1.3 Les différentes « couches technologiques » du « territoire mobile » ... *174*
2.1.1.4 Importance de la signalisation ... *177*
2.1.2 Présentation des évènements de signalisation ... *178*
2.1.2.1 Description des événements de signalisation ... *178*
2.1.2.1.1 Les évènements dédiés à la gestion des communications ... *178*
2.1.2.1.2 Les évènements de gestion de la mobilité ... *180*
2.1.2.2 Classification des événements et notations retenues ... *180*
2.1.2.2.1 Les évènements dédiés à la gestion des communications ... *180*
2.1.2.2.2 Les évènements de gestion de la mobilité ... *181*
2.2 METHODOLOGIE DE COLLECTE DANS LE CADRE LEGAL FRANÇAIS ... 181
2.2.1 Présentation du contexte légal ... *181*

2.2.2 Précision sur l'identification directe et indirecte 182
2.2.3 Méthodologie de production des données 184
2.2.3.1 Conséquences des contraintes légales 184
2.2.3.2 Collection de la signalisation via des sondes 185
2.2.3.2.1 Intérêt des sondes 185
2.2.3.2.2 Lien entre événement et trame mesurée par la sonde 186

3 CONCLUSION 187

CHAPITRE 5 : LA SIGNALISATION DES TELEPHONES MOBILES: UNE SOURCE ADAPTEE A LA MESURE DES DEPLACEMENTS ? 189

1 PROTOCOLE EXPLORATOIRE 190

1.1 DEMARCHE EXPERIMENTALE 190
1.2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE 192
1.2.1 Aspect transport de la zone d'étude 192
1.2.2 Aspect télécom de la zone d'étude 196
1.2.2.1 Un découpage particulier du « territoire mobile » 196
1.2.2.2 Nature des événements de signalisation 197
1.2.2.3 Conditions radioélectriques d'un train parcourant la ligne A 198
1.3 DESCRIPTION DES SOURCES DE DONNEES EXPLOITEES 203
1.3.1 Jeux de données complémentaires 203
1.3.1.1 Observation à quai 203
1.3.1.2 Données billettiques 203
1.3.1.2.1 Présentation du jeu de données 203
1.3.1.2.2 Sources d'erreurs du système de capture 204
1.3.2 Exploration des événements de signalisation 205
1.3.2.1 Activité des mobiles 205
1.3.2.2 Activité aux stations 210
1.3.2.3 Etude des trajectoires 215
1.3.2.4 Conclusion 222

2 ESTIMER DES INDICATEURS DE QUALITE DE SERVICE 224

2.1 DES DIFFICULTES D'EXPLOITATION SUR LA LIGNE A 224
2.1.1 Les problèmes de congestion 224
2.1.2 Des besoins pour l'exploitation de la ligne A 226
2.2 INDICATEURS DE QUALITE DE SERVICE 227
2.2.1 Indicateur de densité de passagers par train 227
2.2.2 Indicateur de fiabilité 229
2.3 INDICATEUR DE VOLUME DE TRAFIC PAR PAIRE DE STATIONS ET CONFRONTATION AVEC UNE SOURCE BILLETTIQUE 230
2.3.1 Comparaison des débits horaires 230
2.3.2 Analyse des temps de parcours 232
2.3.3 Estimation du flux de voyageurs sur le tronçon central 235
2.3.3.1 Définir les cellules associées à $S_{outRERA}$ 236
2.3.3.2 Méthode naïve d'affectation des flux de mobiles sur la ligne A 237
2.3.3.3 Estimation des flux de voyageurs à destination de La Défense 238

3 CONCLUSION 240

CONCLUSION DE PARTIE 243

INTRODUCTION 246

CHAPITRE 6 : QUANTIFIER ET QUALIFIER LES FACTEURS EXPLICATIFS DE CHOIX DES DEPLACEMENTS 249

1 DEMARCHE EXPERIMENTALE 250

2 ESTIMATION DU CONFORT RESSENTI PAR L'USAGER DANS UN SYSTEME DE TRANSPORT EN COMMUN 254

2.1 DES BESOINS D'ESTIMATION DES VALEURS UNITAIRES : CAS DU CONFORT EN TRANSPORTS EN COMMUN 254
2.2 METHODE ET RESULTATS 255
2.2.1 Présentation du périmètre et des hypothèses de l'étude 255
2.2.2 Associer les trajectoires des mobiles à une ligne du réseau de transport 258
2.2.3 Evolution temporelle de la distribution des voyageurs sur les lignes 262
2.2.4 Estimation du confort ressenti par un usager 265
2.3 CONCLUSION 266

3 COMPORTEMENT DE DEPLACEMENT POUR MOTIF LOISIR/ACHAT 267

3.1 APPREHENDER L'ACCROISSEMENT DES DEPLACEMENTS POUR MOTIFS ACHATS/LOISIRS 268
3.2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE 268
3.2.1 Aspect géographique de la zone d'étude 269
3.2.2 Aspect télécom de la zone d'étude 271
3.3 PRESENTATION DES RESULTATS SUR LES DEUX POINTS D'INTERET 274
3.3.1 Description du jeu de données 274
3.3.2 Résultats sur le centre commercial de Val d'Europe 274
3.3.3 Résultats sur le parc Disneyland 280
3.3.3.1 Identification des résidents du périmètre « Disney cœur » 282
3.3.3.2 Identification des transit LGV 282
3.3.3.3 Identification des visiteurs du parc 284
3.4 LIMITES DE L'INTERPRETATION DES MESSAGES DE SIGNALISATION 285
3.4.1 Biais spatiaux et temporels pour l'estimation des attributs des déplacements 285
3.4.2 Les difficultés d'interprétation des mobilités entre couches technologiques 287
3.5 CONCLUSION 290

4 CONCLUSION 291

CHAPITRE 7 : D'UNE APPROCHE D'EXPLORATION DES DONNEES VERS LES PERSPECTIVES D'ENRICHISSEMENT DES METHODES 293

VERS L'EXPLORATION DES DONNEES 293

1 ANALYSE D'UN ENSEMBLE STATISTIQUE D'EVENEMENTS DE SIGNALISATION 294

1.1 PRESENTATION DU JEU DE DONNEES 295
1.2 APPROCHE EULERIENNE 297
1.2.1 Distribution par type d'évènements 297
1.2.2 Analyse en composantes principales 298
1.3 APPROCHE LAGRANGIENNE 300
1.3.1 Distribution du volume d'évènements générés par les mobiles 300
1.3.2 Distance temporelle entre des évènements consécutifs des mobiles 301
1.3.3 Comportement d'appel et de mobilité 302
1.3.4 Application à l'étude de l'immobilité en Seine-et-Marne 304
1.4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE TRAVAUX SUR L'ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES DE SIGNALISATION 306

2 TRAVAUX FUTURS 307

2.1 PROPOSITION DE TRAVAUX A MENER AUTOUR DU REDRESSEMENT 308
2.1.1 Première étape : redresser le nombre de mobiles observés 309
2.1.1.1 Probabilité d'avoir un point de mesure 310
2.1.1.2 Compenser la périodicité aléatoire des évènements 312
2.1.2 Deuxième étape : redresser le nombre de personnes associées aux mobiles redressés 313
2.1.2.1 Estimer le nombre de personnes présentes 313
2.1.2.2 Estimer le nombre de personnes réalisant une activité 315
2.2 MUTATIONS DES INTRICATIONS D'USAGE DES RESEAUX 316
2.3 MUTATIONS TECHNOLOGIQUES DES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS 317
2.3.1 Evolutions des éléments d'infrastructure des réseaux de téléphonie mobile 318
2.3.2 Evolutions des infrastructures des réseaux de téléphonie mobile 319

CONCLUSION DE PARTIE **321**
CONCLUSION GENERALE **323**
BIBLIOGRAPHIE **326**
ANNEXES **341**
1 LES PHASES D'EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DES RESEAUX **341**
2.4 PHASE 1 : FRANCHIR DE LONGUE DISTANCE 341
2.4.1 De l'invention… *341*
2.4.2 …. à l'engouement collectif *341*
2.5 PHASE 2 : UNE NOUVELLE LIBERTE DE MOUVEMENTS 344
2.6 PHASE 3 : AMELIORATION DES PERFORMANCES DE PORTEE ET DE VITESSE 345
3 UNE EVOLUTION DES SEGMENTS D'USAGERS **348**
3.1 D'UN SEGMENT DE NICHE… 348
3.2 … VERS UNE DISTRIBUTION MASSIVE 349
TABLE DES ILLUSTRATIONS **15**

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1: CORRELATION ENTRE LA DENSITE D'ANTENNES D'ORANGE ET LA DENSITE D'HABITATION A L'ECHELLE DE LA COMMUNE SUR LE DEPARTEMENT DE SEINE-ET-MARNE 22
FIGURE 2: EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DES SERVICES VOIX VIA LA TELEPHONIE MOBILE ET VIA LA TELEPHONIE FIXE ET DES SERVICES SMS DE PAR TRIMESTRES DE 2008 A 2014 (SYNTHESE DES « OBSERVATOIRE DES MARCHES DES COMMUNICATIONS ELECTRONIQUES EN FRANCE » PROPOSES PAR L'ARCEP) 26
FIGURE 3 : LE RESEAU AUTOROUTIER FRANÇAIS EN 2015. © THOMAS G 31
FIGURE 4 : LES ETAPES IMPORTANTES DE L'AUTOMATISATION DU METRO PARISIEN 43
FIGURE 5: SCHEMA DES COMPOSANTES D'UN EXEMPLE D'UNE CHAINE DOMICILE-TRAVAIL 55
FIGURE 6 : CARTE DU POTENTIEL D'ACCESSIBILITE DE LA VILLE DE BESANÇON (BANOS, ET AL., 2010) 56
FIGURE 7: EVOLUTION DE LA REPARTITION DES DEPLACEMENTS LOCAUX SELON LES MODES DE TRANSPORT. SYNTHESE DES ENQUETES NATIONALES TRANSPORT DE 1982, 1994 ET 2008 PAR (LE JEANNIC, 2010) 59
FIGURE 8: EQUIPEMENT AUTOMOBILE DES MENAGES DE 1982 A 2008. SYNTHESE DES ENQUETES NATIONALES TRANSPORT DE 1982, 1994 ET 2008 PAR (LE JEANNIC, 2010) 60
FIGURE 9: PART DES VELOS DANS LES MODES DE DEPLACEMENT DANS PLUSIEURS PAYS D'EUROPE (MINISTERIE VAN VERKEER, 2006) 63
FIGURE 10: TROIS APPROCHES POUR JUGER DE L'IMPORTANCE RELATIVE DES ACTIVITES (COUREL, ET AL., AVRIL 2005) 66
FIGURE 11: DISTRIBUTION DU TEMPS DE TRAJET DOMICILE-TRAVAIL DES ACTIFS DE PLUS DE 15 ANS SELON LES LIEUX DE RESIDENCE (COUREL, ET AL., AVRIL 2005) 68
FIGURE 12: CONFRONTATION DE LA DISTANCE DOMICILE-TRAVAIL ET LE TEMPS DE TRAJET DOMICILE-TRAVAIL (HUBERT, 2009) 71
FIGURE 13 **:** L'IMPACT DE LA CONSOLIDATION DES ACTIVITES POUR L'OPTIMISATION DES DEPLACEMENTS 77
FIGURE 14 : VALEURS DU TEMPS PAR MODE SELON LA DISTANCE POUR TOUS MOTIFS (EN EUROS/H) (QUINET, 2013) 99
FIGURE 15 : NOTION D'EQUILIBRE DANS UN SYSTEME DE TRANSPORT (LEURENT, 2006) 114
FIGURE 16 : REPRESENTATION DES INTERACTIONS ENTRE LES DIFFERENTS SOUS-SYSTEMES SELON LES FAMILLES DE MODELES (BONNEL, 2004). 118
FIGURE 17: FONCTIONS D'OFFRE (A) ET DE DEMANDE (B) EN TRANSPORT SELON MANHEIM (MANHEIM, 1984). 120
FIGURE 18 : ILLUSTRATION DE LA NOTION D'EQUILIBRE (A) ET DE LA NOTION DE DEPLACEMENT DE L'EQUILIBRE EN CAS DE MODIFICATIONS DU SYSTEME DE TRANSPORT (B) 121
FIGURE 19 : ETAPES DE GENERATION ET DISTRIBUTION DES DEPLACEMENTS DANS LA MODELISATION A 4 ETAPES (BONNEL, 2004) 127
FIGURE 20 : LES TROIS REPRESENTATIONS DU DIAGRAMME FONDAMENTAL (BUISSON, ET AL., 2010) 138
FIGURE 21 : SYNTHESE DE LA CHRONOLOGIE DES ETAPES DE MISE EN PLACE DES RESEAUX DE TRANSPORTS SOUS L'ANGLE DE LA SEGMENTATION DE LA DEMANDE, LE LA GOUVERNANCE, DE L'EXPLOITATION ET DE LA MODELISATION 142
FIGURE 22 : SYNTHESE DE LA CHRONOLOGIE DES ETAPES DE MISE EN PLACE DES RESEAUX DE TRANSPORTS SOUS L'ANGLE DES AVANCEES TECHNIQUES 143
FIGURE 23 : SCHEMA DES INFORMATIONS FOURNIES PAR LES EMD 151
FIGURE 24 : REPRESENTATION DES ELEMENTS OBSERVES LORS D'UNE ENQUETE CORDON 153
FIGURE 25 : POINTS DE COLLECTE DE DONNEES DISPONIBLES DANS UN RESEAU DE TELECOMMUNICATIONS MOBILES AU TRAVERS D'UNE REPRESENTATION FONCTIONNELLE SIMPLIFIEE 161
FIGURE 26 : PRINCIPE DU FMD 168
FIGURE 27 : ARCHITECTURE SIMPLIFIEE D'UN PLMN EQUIPE DES TECHNOLOGIES 2G ET 3G 173
FIGURE 28 : REPRESENTATION SIMPLIFIEE DES SUPERPOSITIONS EN COUCHE MOBILES EN SUPPOSANT DES ANTENNES ISOTROPES 176
FIGURE 29 : DISPONIBILITE DES SONDES SUR LES INTERFACES A ET GB DU RESEAU MOBILE OPERE PAR ORANGE A L'ECHELLE DE LA FRANCE EN 2011 - SOURCE INTERNE ORANGE 186
FIGURE 30: TRACE DES LIGNES A (A) ET B (B) DU RER (AUTEUR BENOIR MORTAGT) 194
FIGURE 31: EVOLUTIONS DU NOMBRE DE VOYAGES EFFECTUES UN JOUR OUVRABLE EN BLEU ET EN FIN DE SEMAINE EN ROUGE (LES VOLUMES DE TRAFIC DU SAMEDI ET DU DIMANCHE SONT CUMULES) DE 1999 A 2008 D'APRES UN RECENSEMENT RATP. 196

FIGURE 32 : CHAMP REÇU PAR UN MOBILE PRESENT A BORD D'UNE RAME DE RER PARCOURANT LA LIGNE A DE VINCENNES VERS AUBER EN HEURE CREUSE 199
FIGURE 33 : CORRELATION ENTRE LE CHAMP REÇU PAR UN MOBILE ET LE DECLENCHEMENT D'EVENEMENTS LAUN PAR L'ENSEMBLE DES MOBILES CONNECTES AU NIVEAU DE LA CELLULE QUI COUVRE LA STATION VINCENNES (DBM +100) 200
FIGURE 34 : CORRELATION ENTRE LE CHAMP REÇU PAR UN MOBILE ET LE DECLENCHEMENT D'EVENEMENTS LAUN PAR L'ENSEMBLE DES MOBILES CONNECTES AU NIVEAU DES CELLULES QUI COUVRENT LA STATION CHATELET (DBM +100) 201
FIGURE 35 : SCHEMA SIMPLIFIE DE LA CONFIGURATION DES TRAJETS REALISABLES PAR LES USAGERS DE LA LIGNE A 206
FIGURE 36 : DISTRIBUTION PAR TRANCHE DE 30 MINUTES DES VALIDATIONS SUR L'ENSEMBLE DES STATIONS DU TRONÇON CENTRAL OBTENUES A PARTIR DES DONNEES BILLETTIQUE 208
FIGURE 37 : DISTRIBUTION DES **LAUN** PAR TRANCHE DE 30 MINUTES SUR LE TRONÇON CENTRAL A PARTIR DES DONNEES DU 7 AVRIL 2011 209
FIGURE 38 : DISTRIBUTION DES LAUN COLLECTES SELON LES STATIONS DU TRONÇON CENTRAL 211
FIGURE 39 : EVOLUTION DE LA DISTRIBUTION DES LAUN PARMI LES STATIONS DU TRONÇON CENTRAL AU COURS DE LA JOURNEE DU 7 AVRIL 2011 212
FIGURE 40 : DISTRIBUTION DE LA REPETITION DES EVENEMENTS AU NIVEAU D'UNE STATION 213
FIGURE 41: DISTRIBUTION DES DISTANCES TEMPORELLES INTER-EVENEMENTS POUR DIFFERENTES STATIONS ... 214
FIGURE 42 : TRAJECTOIRES DE TAILLE 2 ENTRE VINCENNES ET NATION A L'ECHELLE DE LA JOURNEE 217
FIGURE 43 : TRAJECTOIRES DE TAILLE 2 ENTRE VINCENNES ET NATION ENTRE 8H ET 9H LE 7 AVRIL 2011 218
FIGURE 44 : TRAJECTOIRES DE TAILLE 6 (A) ET TRAJECTOIRES DE TAILLE 3 (B) 219
FIGURE 45: DENSITE D'EVENEMENTS POUR DES TRAJECTOIRES DE TAILLE 2 ENTRE VINCENNES ET NATION ENTRE 8H ET 9H LE 7 AVRIL 2011 220
FIGURE 46 : VARIATION DE $P_{95}(S)$ POUR DIFFERENTES STATIONS LE MATIN POUR UN PARCOURS DE LA LIGNE D'EST EN OUEST (A) ET LE SOIR POUR UN PARCOURS D'OUEST EN EST 222
FIGURE 47 : SIMULATION DE LA COUVERTURE RADIO (2G 900MHZ) A 50M AUTOUR DE LA PARTIE AERIENNE DE LA STATION NATION 223
FIGURE 48 : DISTRIBUTION DU TEMPS DE TRAJET DE NATION VERS AUBER PENDANT L'HEURE DE POINTE DU MATIN (A) ET DISTRIBUTION DU TEMPS D'ARRET DU TRAIN A QUAI SUR UNE JOURNEE POUR 5 STATIONS SUR TRONÇON CENTRAL DU RERA 225
FIGURE 49 : ESTIMATION DU TAUX DE CHARGE DES TRAINS CIRCULANT DE VINCENNES VERS CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE PENDANT L'HEURE DE POINTE DU MATIN LE 7 AVRIL 2011 228
FIGURE 50 : DENSITE DE RETARD CUMULE SUR LE TRAJET ENTRE VINCENNES ET CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE SUR LA JOURNEE DU 7 AVRIL 2011 229
FIGURE 51: DEBIT DE COLLECTE DES DONNEES DE SIGNALISATION ET DES DONNEES DE BILLETTIQUES PAR STATION 231
FIGURE 52 : DISTRIBUTION DES TEMPS DE PARCOURS PAR TRANCHE DE 30 MINUTES 233
FIGURE 53 : RESULTAT D'UNE SIMULATION DE TEMPS DE PARCOURS POUR UN TRAJET DE NATION VERS AUBER UN JEUDI MATIN (06/03/14) REALISEE SUR LE SITE DE L'OPERATEUR RATP 234
FIGURE 54 : RESULTAT D'UNE SIMULATION DE TEMPS DE PARCOURS POUR UN TRAJET DE VINCENNES VERS CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE UN JEUDI MATIN (06/03/14) REALISEE SUR LE SITE DE L'OPERATEUR RATP 235
FIGURE 55 : SIMULATION DE LA COUVERTURE RADIO (2G 900MHZ) A 50M AUTOUR DE LA PARTIE AERIENNE DE LA STATION LA DEFENSE (AU CENTRE) 236
FIGURE 56 : ESTIMATION DU FLUX DE VOYAGEURS A DESTINATION DE LA DEFENSE POUR DIFFERENTES ORIGINES DE LA LIGNE A PENDANT LA MATINEE DU 13/10/2011 A PARTIR DES DONNEES BILLETTIQUE ET DES DONNEES DE SIGNALISATION 239
FIGURE 57 : ESTIMATION DU TAUX DE CHARGE DES TRAINS CIRCULANT ENTRE LES STATIONS VINCENNES ET CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE PENDANT LA MONTEE EN CHARGE MATINALE LE 7 AVRIL 2011. 257
FIGURE 58 : DISTRIBUTION DES TEMPS DE PARCOURS POUR LES MOBILES DU SOUS-ENSEMBLE M1_S ET DU SOUS-ENSEMBLE RER_S EN PROPORTION DE L'ENSEMBLE DES MOBILES 260
FIGURE 59 : DISTRIBUTION DES TEMPS DE PARCOURS POUR LES MOBILES ASSOCIES A CHACUNE DES LIGNES (M1 ET RER A). 261
FIGURE 60 : PROPORTION DES MOBILES ASSIGNES A LA LIGNE 1 PARMI TOUS LES MOBILES DE TN,D SELON L'HEURE D'ARRIVEE A LA DEFENSE DE 7H30 A 10H00 LE 13 OCTOBRE 2011. 262
FIGURE 61 : EVOLUTION DU TEMPS DE TRAJET MOYEN POUR VOYAGER DE NATION VERS LA DEFENSE EN RERA SELON L'HEURE D'ARRIVEE A DESTINATION. 263

FIGURE 62 : EVOLUTION DE LA MONTEE EN CHARGE DU NOMBRE DE TRAJECTOIRES NATION-LA DEFENSE CAPTUREE SELON L'HEURE D'ARRIVEE A LA DEFENSE. 264
FIGURE 63 : VARIATION DE BN PENDANT LA PERIODE DE POINTE DU MATIN LE 13 OCTOBRE 2011 SELON L'HEURE D'ARRIVEE A LA DEFENSE 266
FIGURE 64 : VARIETES DES PAYSAGES EN SEINE-ET-MARNE. A) VUE AERIENNE D'UNE PARTIE DU COMPLEXE DE LOISIRS DISNEYLAND PARIS. B) CHAMP DE BLE EN SEINE-ET-MARNE, PRES DE SAINT-FARGEAU-PONTHIERRY. 269
FIGURE 65 : GEOGRAPHIE DE LA SEINE-ET-MARNE. A) POSITION DU DEPARTEMENT DANS LA REGION ILE-DE-FRANCE. B) RESEAU DE TRANSPORT PRINCIPAL EN ILE-DE-FRANCE ET POSITION DU CENTRE COMMERCIAL DE VAL D'EUROPE ET DE DISNEYLAND PARIS. 271
FIGURE 66: POSITION DES SITES CONSTITUANT LES PERIMETRES D'ETUDE AUTOUR DU CENTRE COMMERCIAL DE VAL D'EUROPE ET DU PARC DISNEY 272
FIGURE 67 : CORRELATIONS ENTRE LE « TERRITOIRE GEOGRAPHIQUE » DE SEINE-ET-MARNE ET L'ACTIVITE DES MOBILES SUR LE « TERRITOIRE MOBILE » DE SEINE-ET-MARNE LE 22 DECEMBRE 2012. A) CARTE DE DENSITE DE POPULATION DU DEPARTEMENT. B) CARTE DE DENSITE D'EVENEMENTS SUR UN DIAGRAMME DE VORONOÏ DES CELLULES. 273
FIGURE 68 : DISTRIBUTION DE LA DUREE DE PRESENCE ESTIMEE SUR LE CENTRE COMMERCIAL DE VAL D'EUROPE A PARTIR DES DONNEES DE SIGNALISATION COLLECTEES LE 22 DECEMBRE 2012 275
FIGURE 69 : DISTRIBUTION A LA JOURNEE DU NOMBRE DE MOBILES CAPTES AU NIVEAU DU CENTRE COMMERCIAL A PARTIR DES DONNEES DE SIGNALISATION COLLECTEES LE 22 DECEMBRE 2012 276
FIGURE 70 : DEBITS ESTIMES D'ENTREE ET DE SORTIE DU CENTRE COMMERCIAL A PARTIR DES DONNEES DE SIGNALISATION COLLECTEES LE 22 DECEMBRE 2012. 276
FIGURE 71 : CARTE DE DENSITE DES TRAJECTOIRES DES MOBILES QUI ONT ETE DETECTES SUR LE CENTRE AU MOINS UNE FOIS. 277
FIGURE 72 : CARTE DES TEMPS D'ACCES MINIMAL VERS LE CENTRE COMMERCIAL. 278
FIGURE 73 : PERIMETRE « DISNEY CŒUR » REPRESENTE PAR UNE CARTE DE COUVERTURE DES SERVEUSES PRINCIPALE 2G-900MHZ. 281
FIGURE 74 : DISTRIBUTION DU TEMPS DE PRESENCE ESTIME DES MOBILES SUR LE PERIMETRE « DISNEY CŒUR ». A) DISTRIBUTION DU TEMPS DE PRESENCE PAR TRANCHE D'HEURES. B) DISTRIBUTION DU TEMPS DE PRESENCE DES MOBILES PRESENTS MOINS D'UNE HEURE SUR LE PERIMETRE PAR TRANCHE DE MINUTES. 282
FIGURE 75 : CARTE DE COUVERTURE DES SERVEUSES PRINCIPALE 2G-900MHZ SUR LE PERIMETRE « DISNEY CŒUR ». 284
FIGURE 76 : DISTRIBUTION DES EVENEMENTS INTER-TECHNOLOGIES PARMI TOUS LES EVENEMENTS DECLENCHES AU NIVEAU DES SITES DU PERIMETRE « DISNEY CŒUR » LE 22 DECEMBRE 2012 288
FIGURE 77 : DISTRIBUTION DES CHANGEMENTS INTRA-TECHNOLOGIES PARMI TOUTES LES PAIRES D'EVENEMENTS SUCCESSIFS DECLENCHES AU NIVEAU DES SITES DU PERIMETRE « DISNEY CŒUR » LE 22 DECEMBRE 2012. 290
FIGURE 78 : CARTE DE L'EMPLACEMENT APPROXIMATIF DES SITES 2G CONSTITUANT LE PERIMETRE MOBILE DE L'ETUDE ET REGROUPES PAR ZONES DE LOCALISATION (UNE COULEUR PAR ZONE DE LOCALISATION). 296
FIGURE 79 : DISTRIBUTION DU TYPE D'EVENEMENTS DE L'ENSEMBLE DE DONNEES DU « TERRITOIRE MOBILE COMPLET » LE 22 DECEMBRE 2012. 297
FIGURE 80 : REPRESENTATION SUR DEUX AXES DE L'ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES TYPES D'EVENEMENT PAR CELLULES. 299
FIGURE 81 : DISTRIBUTION DU NOMBRE DE MOBILES EN FONCTION DU NOMBRE D'EVENEMENTS GENERES PAR CES MOBILES LE 22 DECEMBRE 2012. 301
FIGURE 82 : DISTRIBUTION DES MOBILES SELON L'ECART TEMPOREL ENTRE DEUX EVENEMENTS CONSECUTIFS. 302
FIGURE 83 : DISTRIBUTION DU NOMBRE DE MOBILES ET DE LA PORTEE DE LEUR TRAJECTOIRE MOBILE EN FONCTION DU NOMBRE DE COMMUNICATIONS EMISES. 303
FIGURE 84 : PROJECTION SUR UN DIAGRAMME DE VORONOÏ DE L'INDICE D'IMMOBILITE. 305
FIGURE 85 : SCHEMATISATION DES ETAPES PRINCIPALES DU REDRESSEMENT. 309
FIGURE 86 : SCHEMATISATION DES ETAPES INTERMEDIAIRES DE LA DEUXIEME ETAPE DU REDRESSEMENT. 314
FIGURE 87 : SCHEMA DES INTRICATIONS ENTRE LES RESEAUX DE TRANSPORT ET LES RESEAUX MOBILES. 315
FIGURE 88 : DEVELOPPEMENT DES RESEAUX FERRES EN FRANCE DE 1850 A 1930 342
FIGURE 89 : DEVELOPPEMENT DU RESEAU METLOPOLIOTAIN DE PARIS DE 1900 A 2010 343
FIGURE 90 : LES DIFFERENTES PHASES DE CONSTRUCTION DU RESEAU AUTOROUTIER FRANÇAIS DE 1970 A 2011 © LE BARON 347
FIGURE 91 : RESEAU FERRE FRANÇAIS EN 1850 348

FIGURE 92 : EVOLUTION DE L'EQUIPEMENT AUTOMOBILE DES MENAGES DE 1980 A 2009 (A) ET TAUX D'EQUIPEMENT DES MENAGES EN BIENS DURABLES EN 2008 (B)..... 350

Introduction

Chaque jour, des millions de personnes se demandent à quelle heure partir pour éviter les embouteillages, si elles ne vont pas rater leur bus après avoir déposé les enfants à l'école, ou encore si elles devraient prendre les transports en commun plutôt que leur voiture pour aller au travail. Bref, le transport pose beaucoup de questions. De formation initiale ingénieure en télécommunications, les questions que m'a posées le transport avant de débuter ma thèse étaient celles qu'il pose à tout usager : comment trouver l'information nécessaire aux déplacements, surtout lorsque l'on découvre une grande métropole ? Quelle marge horaire prévoir pour assurer telle ou telle correspondance ? Comment éviter les situations de congestion ou d'inconfort ?

Ma perspective sur le monde des transports a évolué au cours de mes premières expériences professionnelles. En travaillant sur la thématique de la qualité de service des réseaux de téléphonie mobile, j'ai été amenée à m'interroger sur la modélisation de la densité d'usagers à proximité des antennes de radiotéléphonie. Question qui amène naturellement à s'interroger sur la modélisation de la mobilité des personnes. Cette interrogation était partagée par mon employeur, Orange, et, c'est en commençant à creuser ce sujet que la nécessité s'est rapidement faite sentir de devoir aborder scientifiquement le domaine des transports.

Si la motivation première à engager cette thèse CIFRE en partenariat entre Orange et le Laboratoire Ville Mobilité Transport était bien d'utiliser des modèles de mobilité des personnes pour apporter une contextualisation de l'usage des réseaux cellulaires ou encore pour des applications d'exploitation, il est bien vite apparu que la réciproque était vraie, et que la connaissance du transport pouvait grandement bénéficier des données produites lors du fonctionnement des réseaux de radiotéléphonie cellulaires.

Ceci n'a pas empêché le transport de continuer à me poser des questions, mais leur nature a bien changé. De celle du simple usager du quotidien, ma perspective sur les transports a emprunté tout à tour, lors de mes lectures et recherches bibliographiques, celle du modélisateur, du planificateur, du sociologue, de l'historien. Comment fonctionnent les réseaux de transports ? Quelle est la place du transport sur un territoire ? Quels acteurs décident des investissements ? Pourquoi tel mode à telle époque, le fer un temps, la voiture un autre ? Choix d'itinéraire, valeur du temps, indicateur de qualité de service, matrice origine-destination, part modale sont autant de concepts dont j'ignorai même l'existence avant de débuter cette thèse.

Ce manuscrit de thèse, structuré en trois parties, débute par une présentation de la compréhension du domaine et des enjeux des transports que j'ai pu acquérir pendant ces trois années. J'ai naturellement choisi une approche de présentation selon une analogie avec le domaine des télécommunications car celle-ci reproduit le schéma de prise en main des concepts que j'ai suivi. Cette première partie, commence par une présentation du domaine des

transports, ses acteurs, ses enjeux et ses besoins, orientée sur l'offre de service (Chapitre 1). Ce préambule sur le domaine des transports est suivi d'un ensemble de définitions autour de l'objet d'intérêt de cette thèse : le déplacement. Le chapitre 2 présente ces notions selon une orientation autour de la demande. Enfin, pour préciser la manière dont pourraient être exploitées les mesures de déplacements que nous voulons construire, le chapitre 3 propose une synthèse des outils à disposition des acteurs de l'offre de transport pour réaliser leur rôle.

La deuxième partie s'articule en deux chapitres. Le chapitre 4 est un état de l'art des méthodes de collectes de données pour la mesure des déplacements et précise le vocabulaire, les notations retenues et les éléments nécessaires pour assimiler la procédure de collecte des données exploitées dans cette thèse basée sur la signalisation des mobiles. J'ai choisi une présentation simplifiée de l'architecture des réseaux de télécommunications et de son fonctionnement. Le chapitre 5 initie la démarche expérimentale et présente des résultats d'estimation d'indicateurs de qualité de service sur la ligne A du RER francilien. J'ai ainsi eu l'occasion de parcourir à nouveau cette ligne arpentée de nombreuses fois pendant mes études, en troquant ma valise contre des équipements de mesures radio. Parmi les indicateurs de qualité de service construits, je me suis intéressée à la distribution cumulée des retards sur la ligne et l'estimation du taux de charge des rames amont qui m'auraient été fort utiles en tant qu'usager de la ligne.

Motivée par la possibilité de traduire par des indicateurs quelques expériences personnelles, mais surtout afin de poursuivre l'exploration du potentiel d'une source composée d'évènements de signalisation, le chapitre 6 contient des résultats sur la quantification du confort ressenti par un usager du système de transport public ferré d'Ile de France. Ces derniers sont complétés par une connaissance des capacités des méthodes de traitement acquises au travers d'une étude des déplacements pour motifs loisirs et achats en Seine-et-Marne. Ce cadre d'étude a permis de mettre en relief les avantages et les limites de la méthode de capture mais aussi des méthodes de traitement des données. Enfin, le chapitre 7 est consacré à une approche exploratoire des données de signalisation qui dessine les relations entre les usages des deux réseaux et les pistes de poursuite des travaux, notamment sur le redressement, afin de remplir l'objectif de mise à disposition des acteurs du transport des mesures de déplacements robustes, comparables et complémentaires aux sources traditionnelles.

Partie I : Eléments de compréhension du domaine des transports, de son fonctionnement, ses acteurs et ses enjeux vers la naissance de nouveaux besoins

Introduction

Le but de cette thèse est de mesurer des déplacements à partir de messages transitant sur les réseaux de télécommunications. Alors l'objectif de cette première partie est d'introduire les raisons qui nous ont amené à choisir ce sujet de métrologie ainsi que le choix du système de capture. Cette dernière vient d'un constat d'analogie de mise en place et d'usage des réseaux par les acteurs de l'offre comme par les acteurs de la demande. En effet, les abonnés des services de téléphonie mobile sont des mobiles sur un réseau de transport. Cependant, pourquoi doit-on mesurer des déplacements ? Qui va utiliser ces mesures ? Comment vont-elles être exploitées ? Que représentent-elles exactement? Ainsi, l'objectif de cette partie est de répondre à ces questions tout en illustrant les intrications entre les réseaux de transport et les réseaux de télécommunications. Elle est construite sous la forme d'une synthèse de l'exercice d'appropriation du domaine des transports qu'a menée l'auteure, ingénieur télécom de formation, aux débuts de ses travaux de thèse.

Cette première partie comprend trois chapitres. Le premier chapitre présente, en suivant un fil conducteur historique, les phases de déploiement des réseaux et de mise en place du rôle des acteurs. L'approche historique permet de mettre en évidence des analogies marquantes entre réseaux de transport et réseaux de télécommunications. Trois analogies sont présentées : celle de la hiérarchie modale, celle de gouvernance des réseaux et celle de l'exploitation des réseaux.

Le deuxième chapitre traite des pratiques de mobilité sur un réseau de transport. Cela permet d'introduire le concept de mobilité, les moyens de capturer ces déplacements et les constats actuels sur la manière dont les individus pratiquent un territoire. Les usagers des réseaux de transports organisent leurs déplacements suivant les impératifs de leur chaîne d'activités. Nous verrons comment le concept de déplacement est privilégié par la littérature transport pour construire des indicateurs de mobilité.

Une bonne compréhension du concept de déplacement au sens du domaine transport est un prérequis nécessaire pour aborder le dernier chapitre de cette partie, consacré aux outils de modélisation et de simulation utilisés par les acteurs de l'offre de transport pour la planification, la conception et l'exploitation des services de transport. En plus d'une présentation simplifiée de ces outils, nous expliciterons le lien qui existe entre l'évolution des méthodologies de représentation de la mobilité et de ses effets et celle des problématiques rencontrées par les acteurs de l'offre, aussi bien du côté de la planification que de l'exploitation. Cette présentation des recommandations actuelles des acteurs de l'offre sur les outils de modélisation font ressortir les caractéristiques de sources de données complémentaires aux méthodes de collecte traditionnelles.

Chapitre 1 : Introduction au domaine des transports par analogie historique avec le domaine des télécommunications

Un besoin de présentation conjointe du domaine des transports et du domaine des télécommunications

Cette thèse traite de la mesure de la mobilité des personnes à partir des réseaux de téléphonie mobile. Elle fait donc par nature appel à deux domaines traditionnellement éloignés l'un de l'autre : celui des transports d'une part, et celui de la radiotéléphonie et des télécommunications d'autre part.

Ce chapitre apportera aux lecteurs spécialistes de télécommunications des connaissances sur le domaine des transports. Réciproquement, il permettra aux experts du domaine des transports de se familiariser avec la terminologie et les concepts du domaine des télécommunications. Pour faciliter la lecture, les deux domaines sont présentés en parallèle, suivant trois angles d'approche successifs : tout d'abord l'angle de la hiérarchie modale ; ensuite celui de la gouvernance des réseaux ; et enfin celui de l'exploitation des réseaux. Cette présentation croisée évite une simple juxtaposition. Chaque angle d'approche suit un fil conducteur historique et fait ressortir des analogies marquantes facilitant ainsi au lecteur d'un domaine l'appropriation des concepts et du vocabulaire de l'autre domaine.

L'angle de la hiérarchie modale montre comment les évolutions technologiques ont fait émerger plusieurs modes de transport, dont le mode routier, le mode ferroviaire, le mode aérien et le mode fluvial. Chacun de ces modes convient à un segment de la demande : l'aérien pour le transport international, le routier pour l'urbain, l'inter-urbain moyenne distance et l'intra-urbain, le ferroviaire pour l'inter-urbain longue distance, l'international moyenne distance et les transports collectifs intra-urbains et périurbains. Le constat est

similaire pour les réseaux de télécommunication. En effet, on observe une segmentation de la demande qui peut s'apparenter à une hiérarchie selon deux modes (fixe et mobile). Les communications de type voix ou de type données en situation de stationnarité prolongée se feront préférentiellement via le réseau fixe. A l'inverse en situation de mobilité, ces communications seront portées par le réseau cellulaire. Les évolutions techniques sont souvent suivies par des évolutions des processus de distribution des produits et donc d'une mutation de la segmentation des usagers.

L'angle de la gouvernance des réseaux s'intéresse à l'évolution dans le temps des jeux d'acteurs, de la régulation (au sens législatif et réglementaire) et de la planification des réseaux. Le domaine des transports distingue aujourd'hui des autorités organisatrices des transports à différentes échelles administratives. Ce découpage administratif a évolué dans le temps pour définir le paysage institutionnel actuel des transports. Ce dernier repose sur une définition claire des rôles des acteurs. Ces acteurs proposent une offre de transport qui s'inscrit dans une politique globale d'aménagement du territoire. De même, les acteurs des télécommunications participent à cet aménagement. On observera alors une analogie dans la construction de la hiérarchie administrative des deux domaines.

L'angle de l'exploitation des réseaux suit les questions de gouvernance et de planification. Les conditions d'exploitation ont évolué au cours des années amenant les épisodes de saturation que l'on connaît aujourd'hui. Ainsi, l'exploitation des réseaux actuels se doit d'être dynamique, pour absorber les fluctuations de la demande, et centrée sur la qualité de service orientée vers les usagers dans un contexte de concurrence.

La suite est organisée en quatre sections, suivies d'une conclusion. La première section propose un constat des interrelations évidentes qui lient les deux domaines transport et télécommunications. Elle permet de justifier l'intérêt de l'approche par analogie développée ensuite en trois sections, une pour chacun des angles d'approche choisis : celui de la hiérarchie modale d'abord ; celui de la gouvernance des réseaux ensuite; et enfin celui de l'exploitation des réseaux.

1 Transport et télécommunications : constat des interrelations

Cette thèse propose des méthodes d'utilisation de données issues des réseaux de télécommunication afin d'en dégager une connaissance utile pour le domaine des transports. Les relations entre ces deux domaines apparaitront de manière récurrente dans le document. Nous ouvrons ce premier chapitre par un constat naïf sur les interrelations sociales et géographiques entre ces deux réseaux, dont l'existence assure un service de connexion entre les individus d'un territoire. Nous conclurons ce chapitre en approfondissant ces relations sous l'angle de l'apport réciproque de ces deux domaines.

1.1 Les interrelations sociales

Les évolutions technologiques conjointes des réseaux de transport et des réseaux de télécommunications ont entrainé des mutations sociales importantes. En effet, l'apparition de la voiture personnelle, de l'avion, puis du TGV a induit une explosion des déplacements sur des grandes distances. Puis l'apparition des technologies de communication mobile a accru cette mobilité (TURCK, 2009). En effet, le rapport au lieu a changé : on peut être accessible n'importe où. Nous sommes constamment connectés. Ainsi, la relation à l'espace et au temps a changé de bases. Il y a un peu plus d'un siècle, l'apparition des « médias électriques », fut à l'origine des bouleversements sociaux tels que la diffusion en temps réel de l'information, la croissance du télétravail, le développement de technopôles, la mondialisation des échanges de toute nature (commerciaux, idées, mode de culture, actualité, découvertes scientifiques), la délocalisation des services, la forte croissance du commerce électronique, etc. Tout ceci impacte directement le domaine des transports en produisant une mobilité différente que l'on peut qualifier de plus complexe. Tout comme l'apparition des moyens de transport à grande vitesse, l'avènement des télécommunications a, en quelque sorte, réduit les barrières de l'espace et du temps.

1.2 Les interrelations géographiques

Les infrastructures de télécommunications terrestres (antennes et réseaux filaires) sont intimement reliées à la géographie. En effet, leur implantation et leur localisation dépendent d'une part de l'environnement de propagation (relief, densité et morphologie des bâtiments) et d'autre part de la localisation de la population (dessertes des personnes) (TURCK, 2009). Le déploiement des réseaux de télécommunications, comme le réseau de transport est optimisé en fonction de la répartition démographique sur le territoire. Ainsi, la densité des antennes relais est plus importante en zone urbaine dense qu'en milieu rural. La topologie d'un réseau de télécommunications est relative à l'activité humaine du territoire qu'il couvre. La Figure 1 illustre cette interrelation géographique. Les communes du département de Seine-et-Marne sont colorées selon le recensement de la population de 1999. En vert apparaissent les communes les moins densément peuplées et en rouge les communes les plus peuplées. Les points noirs représentent l'emplacement approximatif des antennes du réseau de téléphonie mobile opéré par Orange. On remarque que la densité d'antennes est directement corrélée à la densité d'habitants. De plus on observe des antennes le long des axes de transports principaux (A5, A6 et A4) afin de garantir la qualité de connexion au réseau cellulaire en mobilité.

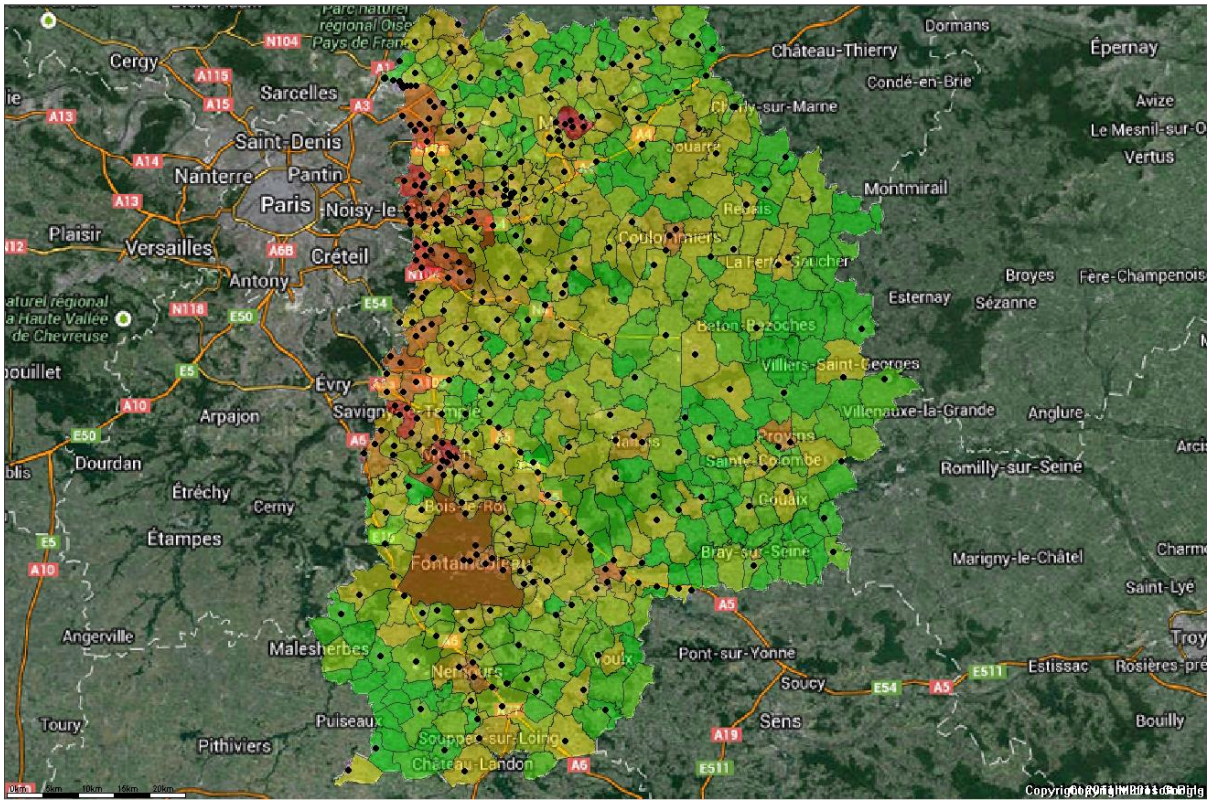


Figure 1: corrélation entre la densité d'antennes d'Orange et la densité d'habitation à l'échelle de la commune sur le département de Seine-et-Marne

La demande en télécommunication est principalement concentrée dans les milieux urbanisés. Or, ce sont les milieux où le positionnement des antennes devient le plus complexe en raison de l'influence des formes urbaines et du type d'occupation des sols associés. Ces difficultés relatives à l'espace géographique sont communes aux problématiques de planification et d'exploitation pour les deux domaines.

2 Angle de la hiérarchie modale

Le choix de l'angle de la hiérarchie modale comme ouverture se justifie par les relations causales qui relient les notions présentées dans ce chapitre. En effet, schématiquement, les évolutions technologiques ont influencé la segmentation des usagers. Cette combinaison a fixé un paysage de la demande autour duquel la gouvernance et l'exploitation des réseaux s'articulent.

Ainsi, nous présenterons la notion de hiérarchie modale sous deux aspects. Nous proposons une brève historique des avancées techniques conclue par un bilan des modes disponibles actuellement. Elle est suivie d'une présentation des conséquences de ces choix technologiques sur les mutations de la segmentation des usages.

2.1 Les phases d'évolutions technologiques

Ce paragraphe permet d'introduire une chronologie des avancées techniques. Ces dernières seront décrites succinctement pour les deux domaines. Nous avons constaté quatre phases déterminantes en terme d'avancées techniques dans le domaine du transport et des télécommunications. Elles sont analogues conceptuellement mais ne coïncident pas temporellement. En effet, les évolutions technologiques n'ont pas suivi le même rythme pour les deux domaines. Ainsi, ces phases ne correspondent pas nécessairement à des périodes temporelles mais plutôt à des étapes d'évolution rendues possibles par les progrès techniques. Nous avons identifié quatre phases que nous présentons ensembles à l'exception de la dernière qui correspond à la situation actuelle d'offre modale.

2.1.1 Les premières phases d'évolutions technologiques

Nous proposons de résumer les trois premières phases de transitions technologiques significatives, dans le sens où elles ont motivé des mutations de gouvernance et d'exploitation. Des précisions détaillées des éléments qui ont nous amenés à la définition de ces phases sont disponibles en annexe paragraphe 1 .

La première phase est définie autour d'un concept nouveau : la capacité de braver la distance car il techniquement possible de se déplacer ou de transporter sa voix sur de longues distances. Les outils de cette mutation sont les chemins de fers et les réseaux de téléphonie filaires. Dans une deuxième phase les avancées techniques ont facilité la liberté de mouvement grâce à la voiture pour le transport et à la téléphonie sans fil pour les télécoms. En effet, la voiture apparait comme un mode flexible et individuel non contraint par des fréquences ou des itinéraires établis comme c'est le cas pour les transports en commun. Il en va de même pour les terminaux mobiles qui permettent de communiquer en tout lieu et à tout moment. Naturellement, la troisième phase s'inscrit dans la poursuite des progrès techniques pour augmenter la portée mais surtout la vitesse. Ce phénomène s'illustre sur le développement des réseaux de Lignes à Grande Vitesse. Cet attrait pour la vitesse prend la forme des efforts de décuplements des débits en télécommunications.

Enfin, la dernière phase correspond à la situation actuelle où les progrès techniques se sont portés sur la diversification des différents équipements des réseaux multipliant l'offre modale sur les réseaux. Le paragraphe suivant y est consacré.

2.1.2 Etat actuel : Un panel varié de technologies disponibles

La dernière phase se résume par l'entrée dans l'ère du choix des technologies. Les progrès techniques permettent d'une part à une technologie offerte d'être capable de couvrir différentes applications modales et d'autre part le développement d'offres de services multimodaux. Cette concurrence soulève la question des critères de choix et élève

l'importance de la qualité de service. Nous proposons alors un bilan actuel des modes sur les deux réseaux.

2.1.2.1 Bilan des modes disponibles sur un réseau de transport

Les déplacements entre pays peuvent être effectués à l'aide de modes tels que l'avion, le fluvial, les chemins de fers et l'automobile. Cependant, l'offre modale longue distance n'est pas homogène selon les pays à relier. En effet, des lignes aériennes existent entre quasiment toutes les villes principales, ce qui n'est pas le cas des autres modes. Les liaisons routières et les voies ferrées s'arrêtent généralement aux littoraux. De plus, toutes les connections ferrées ne proposent pas la « Grande Vitesse ». Ainsi, l'offre des réseaux de transport inter-pays réduit le processus de choix modal au compromis entre un temps de trajet discriminant et d'autres paramètres comme le coût, une volonté d'arrêts le long du trajet, des réticences individuelles (peur de l'avion), etc.

Les déplacements sur de distances moyennes, typiquement à l'échelle inter-urbaine d'un pays comme la France, sont plus enclins à une concurrence modale. En effet, pour la majorité des liaisons, les LGV proposent des temps de parcours cumulés (temps d'attente et temps de trajet) semblables aux lignes aériennes. Le processus de choix repose alors sur des critères de fréquence de l'offre, de coût et de confort. La compétition de ces modes avec la voiture est relative au temps de parcours, mais aussi à la liberté offerte par cette dernière et au coût qui se réduit selon le nombre de passagers. L'arbitrage entre des modes à l'échelle inter-urbaine n'est pas immédiat car il dépend de processus de choix basés sur des critères individuels.

On observe le même phénomène à l'échelle intra-urbaine où les modes en compétition sont l'automobile, les transports en commun (bus, transports en sites propres, réseau ferré) et les modes doux (vélos, marche à pied, etc.). Sur certaines parties des agglomérations, la qualité de l'offre des réseaux de transport en commun peut favoriser un recours à l'automobile (distance à l'arrêt TC, multiplicité des connexions, fréquence). Néanmoins, en milieu urbain dense, les réseaux de transport en commun offrent une desserte au maillage fin avec des fréquences élevées. Par exemple, à Paris une rame de métro passe en moyenne toutes les 2 minutes et les stations du maillage sont espacées en moyenne de 465m (TRICOIRE, 1999). Le processus de choix repose alors sur des critères de performances, de vitesse, de disponibilité, mais aussi de confort et d'aspirations personnelles. Nous approfondirons la notion de choix de mode par les usagers en fonction de divers paramètres dans le chapitre 2.

2.1.2.2 Bilan des modes disponibles sur un réseau de télécommunications

Par analogie avec les transports, nous avons identifié deux modes relatifs au type de canal qui permet de transporter l'information : le mode radio et le mode filaire. Selon l'usage, voix ou « data », les écarts de performance sont différents. Comme dans le domaine des transports, il existe une concurrence modale mais aussi de marché. Cette concurrence est cependant plus marquée dans le domaine des télécommunications avec une concurrence

modale moins nette. Elle s'illustre, par la popularité des offres « quadruple play » qui est un packaging comprenant les offres de téléphonie fixe et mobile et les offres d'accès à l'Internet fixe et mobile dans un même abonnement. Une particularité des télécommunications est que le terminal peut-être compatible avec plusieurs modes, tandis qu'un matériel roulant est propre à un réseau. Parmi les terminaux, on peut citer les ordinateurs fixes, les ordinateurs portables, les tablettes, les téléphones fixes et les téléphones mobiles. Les trois premiers sont traditionnellement utilisés pour l'usage de données et les téléphones pour des usages voix. Les terminaux qualifiés de fixes ont été développés pour fonctionner sur le réseau filaire tandis que les autres terminaux sont compatibles sur les deux modes. Les téléphones mobiles se distinguent car ils permettent l'accès à tous les services (voix et données) sur les deux modes.

2.2 Une évolution des segments d'usagers

La chronologie des progrès techniques a induit une mutation des segments des usagers des réseaux. Ces avancées technologiques ont engendré de nouveaux modes de consommation des services offerts. Nous distinguerons trois étapes de segmentation de la demande.

Nous gardons la même structure et la même philosophie de découpage en étapes désynchronisées entre les deux domaines sur l'échelle des temps que pour la section consacrée aux évolutions techniques. La phase actuelle est décrite en dernier car elle contient les éléments sur lesquels nous baserons nos réflexions. Les premières phases qui expliquent la segmentation actuelle sont résumées au préalable et le lecteur pourra trouver des compléments d'informations en annexe paragraphe 2.

2.2.1 Les premières phases d'évolution des segments d'usagers

Tout d'abord, au balbutiement des réseaux, la demande ne concernait qu'un segment de niche car les technologies nouvelles entrainaient une segmentation spatiale en raison de la disponibilité, qu'en certains endroits d'un territoire d'une ligne de chemin de fer ou d'un réseau de téléphonie. On observait également une segmentation sociale en raison des coûts des équipements à leur début comme par exemple la voiture ou le téléphone mobile. Toutefois, les possibilités offertes par ces nouvelles technologies et les progrès des systèmes de production de équipements ont permis la distribution massive des produits. Si bien qu'actuellement, des équipements nécessaires pour pratiquer les réseaux, comme la voiture ou le téléphone, sont des biens courants des ménages des pays développés. On peut parler actuellement d'une démocratisation des services offerts par les réseaux de transport et les réseaux de télécommunications.

2.2.2 D'une technologie pour chaque usage vers une technologie pour plusieurs usages

Aujourd'hui, plusieurs réseaux de transport ou de télécommunications coexistent sur le territoire et se concurrencent. Toutes ces technologies disponibles répondent à un ou

plusieurs besoins d'usage. De plus, les modes se combinent. Les interconnexions des sous-réseaux modaux multiplient les combinaisons et donc les processus de choix. Nous aborderons plus en détail dans le chapitre suivant les conséquences de cette diversité de choix et de densification des réseaux de transports et de leurs ramifications sur les pratiques de déplacement. Dans ce paragraphe, nous traitons principalement des évolutions d'usages des réseaux de télécommunications.

Tout d'abord, la concurrence modale était-elle la même pour un usage voix que pour un usage données ? A partir du premier trimestre 2012, le volume de téléphonie « voix » est supérieur sur le réseau mobile que sur le réseau fixe[1]. Cette tendance se poursuit en 2013 et 2014 comme le montre la Figure 2.

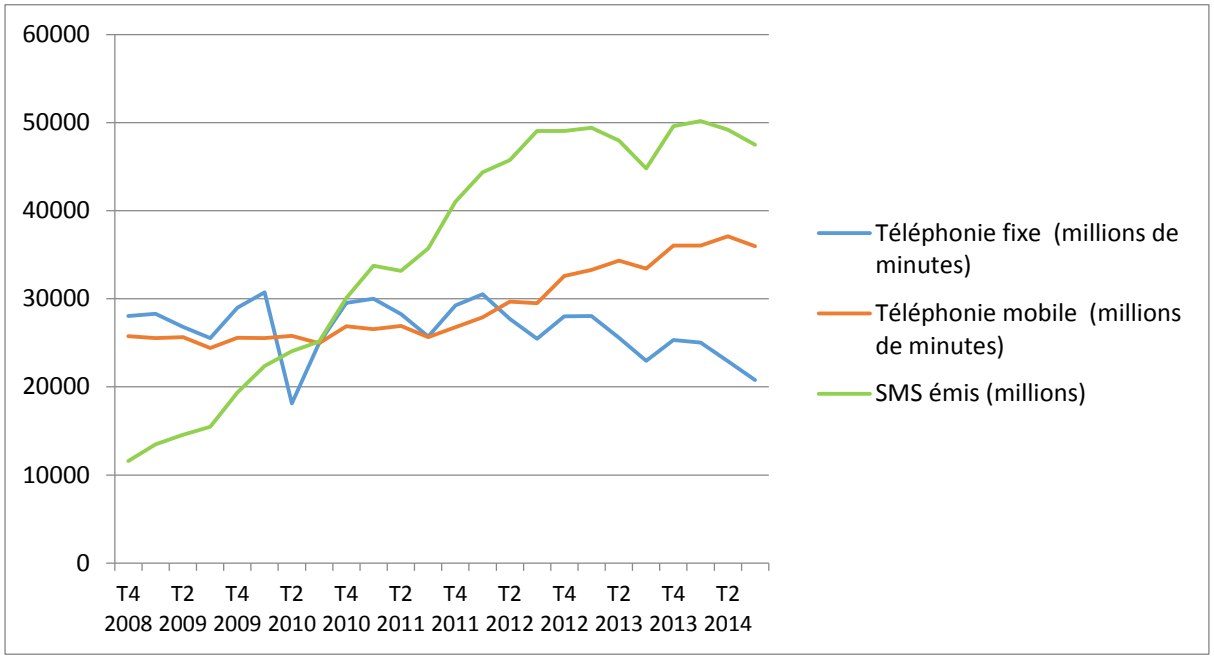


Figure 2: évolution de la consommation des services voix via la téléphonie mobile et via la téléphonie fixe et des services SMS de par trimestres de 2008 à 2014 (synthèse des « Observatoire des marchés des communications électroniques en France » proposés par l'ARCEP)

Cette tendance trouve une explication partielle avec la diversification des terminaux utilisant les réseaux de télécommunications. A-t-elle également entrainé une compétition entre fixe et mobile pour l'usage des données ? Les évolutions des terminaux portatifs en terme notamment de taille d'écran et de fluidité semblent avoir favorisé des utilisations prolongées en dehors des situations de mobilité. En effet, ces outils offrent la possibilité d'être emmenés partout, tout en permettant un confort satisfaisant en situation d'immobilité

[1] www.arcep.fr

prolongée (par exemple le soir à son domicile). De plus, les performances des réseaux mobiles de dernière génération, particulièrement en termes de débit, vont-elles concurrencer les réseaux fixes ? Cela dépendra de la vitesse de déploiement et des offres proposées. Mais que se passera-t-il pour certains abonnés dont les débits disponibles via leur smartphone, leur tablette ou même leur ordinateur connecté au réseau 4G dépasseraient largement les débits disponibles via un réseau xDSL ?

Intéressons-nous maintenant à la mutation des usages. La Figure 2 montre également l'évolution de la consommation de SMS de 2008 et 2014. On notera une croissance bien plus importante que pour la communication voix via la téléphonie mobile. Toutefois, aucune conclusion de transfert d'une partie des communications vocales vers des messages textuels n'est possible. Cependant, à partir de 1998, le trafic de données a dépassé le trafic voix pour les communications internationales tous modes confondus (ITU/TGI, 1999). La progression de la consommation de données sur le réseau mobile est nettement supérieure à la progression de consommation voix sur ce même mode. En effet, il semblerait que les manières de communiquer évoluent de la voix vers du textuel sous forme de SMS, de mails, d'accès à des réseaux sociaux, de chats, etc.

3 La gouvernance des réseaux

Ce paragraphe occupe une place importante car il introduit au travers d'une chronologie non-exhaustive, la mise en place des réseaux actuels sous l'angle de la gouvernance. En effet, ce dernier paragraphe a deux objectifs. Le premier est de présenter le périmètre de décision qui dessine le paysage du transport par analogie à celui des télécommunications. Le deuxième est de révéler quelques problématiques du découpage des rôles des acteurs qui sont issus pour une part du public et pour l'autre du privé.

Nous structurerons cette section autour des trois phases principales de gouvernance sur les secteurs des transports et des télécommunications que nous avons identifiées pour décrire l'évolution des rôles des différents acteurs qui ont participé – et participent – à la mise en place des réseaux. A la création des réseaux, ils étaient construits et opérés par des sociétés privées. L'Etat est par la suite intervenu pour assurer la coordination des ouvrages lors d'une politique d'équipement massif et gérer la concurrence modale. Enfin, le schéma actuel repose sur un partage des rôles entre l'Etat et le secteur privé. Une simplification de cette organisation tenante se représenterait par un réseau opéré par des entreprises privées et dont l'Etat est souvent le propriétaire. Nous ferons alors une synthèse des rôles des acteurs et donnerons des exemples des difficultés qu'ils rencontrent dans l'exercice de leurs tâches en raison de cette distribution des champs d'actions qui leurs sont attribués.

3.1 **Des premiers investisseurs privés**

Dans l'ensemble, les premiers réseaux de transports et de télécommunications ont été développés et opérés par des acteurs privés. En effet, la Compagnie du chemin de fer de Saint-Étienne à la Loire a construit la première ligne en Europe continentale dans la région de

Saint-Étienne, en France, entre 1827 et 1830. La loi du 15 février 1838 décide la construction de neuf grandes lignes par l'État (COLLING, 1949). Cependant, la loi du 11 juin 1842, tranche en faveur d'un financement privé (COLLING, 1949). Le RTC est né dans les conditions similaires aux chemins de fers. Effectivement, le premier réseau déployé en France a été développé et opéré par la Société Générale des Téléphones de 1880 à 1890 sur les villes de Lyon, Marseille, Bordeaux et le Havre. On observe à cette époque une prolifération anarchique des liaisons privées et une étanchéité entre les différents réseaux isolés. L'histoire du « chemin de fer métropolitain » est légèrement différente. Bien que les transports en commun d'Ile de France soient opérés par des opérateurs privés jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, la création des premières lignes est l'affaire d'une coopération entre l'Etat et des concessionnaires. En effet, afin de ne pas dépendre de la Compagnie des chemins de fer de l'État pour la desserte urbaine, la ville de Paris décide en 1883 la construction d'un réseau métropolitain. En 1895, Louis Barthou, ministre des travaux publics, reconnaît un intérêt local aux lignes à construire. Le « chemin de fer métropolitain » est déclaré d'utilité publique par une loi du 30 mars 1898. La première ligne doit être ouverte à l'occasion de l'exposition universelle de 1900. Les responsables veulent alors accélérer les démarches. Les travaux d'ouvrages d'art (tunnels, viaduc et stations) sont confiés à la Ville et ceux des accès de voies et de l'exploitation reviennent à un concessionnaire, la Compagnie générale de traction. Cette dernière deviendra en 1899 après fusion, la société anonyme en charge de l'opération des transports en commun souterrain sous l'appellation Compagnie du chemin de fer Métropolitain de Paris (CMP). Le 1er janvier 1931, la CMP absorbe le Nord-Sud et redevient l'unique exploitant du réseau métropolitain de Paris. L'exploitation et l'infrastructure sont uniformisées.

3.2 **Une centralisation par l'Etat**

L'intervention de l'Etat sur la planification et l'opération des chemins de fer se fera en deux étapes. Tout d'abord, la réorganisation des chemins de fer est actée par décret-loi (DECRET-LOI, 31 août 1937). De cette convention entre l'État, les compagnies privées de l'époque (Nord, Est, Paris à Orléans, Paris à Lyon et à la Méditerranée, Midi, Syndicat du Chemin de fer de Grande Ceinture et Syndicat du Chemin de fer de Petite Ceinture) et les deux réseaux administrés par l'État (État, Alsace et Lorraine), nait la SCNF (Société Nationale des Chemins de Fer) (DOUMAYROU, 2007). L'exploitation des lignes de tous ces réseaux est transférée à la SCNF en janvier 1938. A sa création la SNCF était une société anonyme d'économie mixte dont l'Etat possédait 51% du capital, laissant les 49% aux actionnaires des sociétés financières ayant succédé aux six anciennes compagnies ferroviaires (Compagnie des chemins de fer du Nord, Administration des chemins de fer d'Alsace-Lorraine, Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée, Compagnie du chemin de fer de Paris à Orléans, Compagnie des chemins de fer de l'Est et Réseau de l'État). Des travaux sont entrepris pour relier les réseaux et poursuivre l'équipement en chemin de fer sur le territoire national. Après la deuxième guerre mondiale, le rail est fortement concurrencé par les débuts de « l'ère de l'automobile ». Des actions sont alors nécessaires.

Des lois ont été promulguées pour réglementer les transports par route et « coordonner » ceux-ci avec les transports par rail. En conséquence, les grands réseaux ferrés ont abandonné à la route le transport des voyageurs sur 11000 km, et simultanément les services routiers ont cessé leur concurrence sur les lignes parallèles aux voies ferrées maintenues en exploitation. Dans ce contexte, la convention, qui prévoyait une durée d'existence de la SNCF de 45 ans sous sa forme initiale, arrive à expiration. Le 30 décembre 1982, entre en vigueur la Loi d'orientation sur les transports intérieurs (LOTI). Ainsi, le 31 décembre 1982, l'ensemble de la SNCF revient à l'État, qui la dote d'un nouveau statut au 1er janvier 1983. La SNCF devient alors un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Un cahier des charges et des « contrats de plan » pluriannuels règlent l'ensemble des relations entre l'État et l'entreprise. On observe un déroulement similaire pour la gouvernance du réseau de transport en commun d'Ile de France. En effet, des suites des évolutions administratives imposées par le régime de Vichy (1942), la gestion des infrastructures de transport en commun de surface, opérée jusqu'alors par la Société des Transports en Commun de la Région Parisienne (STCRP), devient le fait de la CMP. Cette fusion annonce la gestion des transports par un exploitant unique. Après la Libération, le nouveau Ministre des Transports (René Mayer) écarte la CMP et la remplace par une Administration Provisoire des Transports Parisiens (APTP). Cette dernière est chargée d'assurer le fonctionnement des réseaux avant la mise en place d'un nouveau régime juridique. Ainsi, le 1 janvier 1949 nait la Régie Autonome des Transports Parisiens, établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), qui se voit chargée de l'exploitation des réseaux du métro et de surface. Les premières actions de la RATP porteront sur une modernisation urgente de son réseau, dont l'attractivité est en chute dans un contexte où les moyens financiers sont restreints.

Dans un deuxième temps, à la sortie de la Deuxième Guerre Mondiale, l'Etat est garant des investissements d'équipements en infrastructures ferrées. Le réseau autoroutier dont l'essor commence dans les années 1950 va donc s'inscrire dans un cadre législatif et institutionnel différent des premiers modes historiques. Le 18 avril 1955 voit en effet l'adoption de de la loi 55-435 « portant statut des autoroutes ». L'État n'ayant pas les moyens de développer à lui seul le réseau autoroutier, la loi introduit le régime de la concession et permet le recours au péage comme moyen de financement des tronçons concédés, à l'exception des portions en milieu urbain. Les sociétés concessionnaires sont garantes de la construction, de l'entretien et de l'exploitation des autoroutes. La première société d'autoroutes, Autoroutes Esterel-Côte d'Azur (ESCOTA), est fondée en 1956 pour réaliser l'autoroute A8. Cette autoroute inaugure le premier péage autoroutier en France. Jusqu'en 1974, la construction des autoroutes s'est effectuée assez rapidement, peu de temps séparant les premières études de la mise en service effective. En 1968, le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) est fondé pour l'application des règlements techniques autoroutiers. Le réseau s'étire alors sur 963 kilomètres. Entre 1974 et les années 1990, du fait du krach pétrolier, du manque de volonté politique et de la raréfaction des financements publics, le développement du réseau autoroutier, notamment celui situé en milieu urbain qui n'est pas concédé, subit un coup d'arrêt. Le développement du réseau interurbain est assuré par l'adossement des nouveaux tronçons autoroutiers aux réseaux

concédés existants dont le péage permet de financer le coût de ces extensions. A partir de 1995, après réorganisation des Sociétés d'Economie Mixtes concessionnaires, le rythme de construction d'autoroutes redevient élevé. De 1955 à 2003, le péage a permis de financer 7 600 km d'autoroutes, soit environ 80 % du réseau total - ce système permettant des investissements en infrastructures importants et nettement supérieurs à ceux que peut engager l'État par le biais de ses finances publiques[2].

La gouvernance des réseaux de télécommunications a suivi un schéma plus direct que les réseaux de transport. En effet, le réseau filaire n'a connu qu'une faible période, à sa création, d'opération par des sociétés privées. L'administration publique des Postes et Télégraphes devient, dès 1889, le ministère des Postes et Télégraphes et reprend le monopole sur la téléphonie. Pourtant ce n'est qu'en 1923, que le second « T » pour Téléphones apparaît, le ministère des P & T devenant celui des PTT. A partir des années 1940, une Direction générale des Télécommunications est créée au sein du ministère. Elle est suivie par la mise en place d'un Centre national d'études des télécommunications (CNET) dont la mission est de développer l'industrie des télécommunications en France. Dans les années 1970, l'Etat français redouble d'effort d'investissement sur le réseau filaire avec le programme « delta LP » dont l'objectif principal porte sur l'accroissement des lignes principales. En effet, la France est en retard par rapport à d'autres pays. C'est à cette époque que fût construite la plus grande partie de la boucle locale. De plus, avec le concours des industriels français, sont mis au point par les ingénieurs et chercheurs du CNET : la commutation numérique, le Minitel en 1980, le réseau Radiocom 2000 en 1986 et la norme GSM. En réaction à une directive européenne de mise en concurrence des services de télécommunication (téléphonie fixe principalement), la Direction générale des télécommunications devient France Télécom le 1er janvier 1988. Deux ans plus tard, une loi est promulguée afin que la société France Télécom devienne un exploitant de droit public. Elle est ainsi dotée d'une personnalité morale distincte de l'État et acquiert une autonomie financière. Auparavant, le budget des Télécommunications était inscrit au sein du budget annexe des PTT voté chaque année par l'Assemblée nationale. Pour préparer l'ouverture à la concurrence au 1er janvier 1998, une loi est votée en juillet 1996 transformant l'exploitant public en société anonyme dont l'État français est le seul actionnaire.

3.3 Un paysage mixte entre public et privé

3.3.1 L'évolution contemporaine de la gouvernance des réseaux

Aujourd'hui la gouvernance des réseaux peut se schématiser par des canaux de communications (voies ferrées ou routes, connexion filaire ou bande de fréquences) dont les institutions publiques définissent les schémas de développement/déploiement et le cadre législatif mais qui sont opérés par des sociétés privées. Dans le cas des transports, les

[2] www.info-autoroute.com/essentiel

infrastructures sont propriété de l'Etat ou concédées sur une période à l'exploitant qui en est garant. Cette présentation de la gouvernance actuelle des réseaux nous permet d'introduire les différents acteurs, leurs fonctions et les moyens dont ils disposent.

Dans le domaine des transports, nous débuterons par le cas du réseau autoroutier car il illustre tout à fait notre propos, tout en se distinguant des autres modes au travers d'un cadre législatif singulier. La politique des pouvoirs publics sur ce réseau s'exerce au travers d'un cadre législatif d'une part et de schémas directeurs d'autre part. Actuellement environ 75,5 % du réseau autoroutier français est exploité sous le régime de la concession. Cela signifie que l'État confie à une société concessionnaire le soin de construire, d'entretenir et d'exploiter certaines autoroutes, moyennant la perception d'un péage auprès des usagers (LA DOCUMENTATION FRANCAISE, juin 2005). La Figure 3 montre les différentes portions autoroutières par concessionnaires.

Figure 3 : le réseau autoroutier français en 2015. © Thomas G[3]

Tout au long du développement du réseau autoroutier français, la mise en place d'organes institutionnels de contrôle et de gestion a permis aux pouvoirs publics de veiller à l'application du cadre législatif et à élaborer des programmes de constructions cohérents et viables, notamment sur les plans techniques et financiers. L'intervention des pouvoirs publics a également porté sur des thématiques plus globales comme la sécurité routière, l'organisation du transport des biens et des personnes, la protection de l'environnement - la « gouvernance environnementale » - et le développement durable[4]. L'acte législatif fondateur du réseau autoroutier français fût l'adoption de la loi du 18 avril 1955. Cette loi porte notamment sur le mode de financement de son développement. Les lois, décrets et règlements sont les outils

[3] http://routes.wikia.com/wiki/Liste_des_sociétés_concessionnaires_d'autoroutes_françaises

[4] www.vie-publique.fr/politiques-publiques :La politique de la route et de sécurité routière jusqu'en 2005

qui permettent d'adapter le réseau autoroutier aux réalités, aux contraintes économiques et budgétaires, et assurent l'intégration de la politique autoroutière française à la politique commune européenne. Présentons maintenant un historique succinct des plans et schémas directeurs relatifs aux réseaux autoroutiers. Le premier plan directeur routier, le « plan directeur d'aménagement du réseau routier », est élaboré en 1960. Il prévoyait le tracé de 3 558 km d'autoroutes dont 1 933 km à réaliser avant 1975, 15 500 km de routes nationales importantes dont 6 500 km de premier ordre, 9 000 km de second ordre et 62 000 km de troisième ordre. Ce premier plan sera suivi d'autres comme le « Schéma directeur des grandes liaisons routières » en 1971 et le « schéma d'aménagement à long terme du réseau national » en 1978 (RAPPORT SENAT, juin 1998). La « loi d'orientation des transports intérieurs » (LOTI) de 1982 introduit le principe des « schémas directeurs routiers nationaux ». Elle prévoit que les schémas soient « élaborés en prenant compte de nombreux critères tels que les besoins des usagers, l'aménagement du territoire, les coûts, les besoins de la nation et le plan de la nation ... Les schémas directeurs routiers nationaux sont des documents « d'affichage des choix publics », auxquels doit se conformer tout projet de voie rapide de plus de 25 kilomètres. Les schémas s'appliquent aux liaisons interurbaines. »[5]. En 2002, les « schémas de services collectifs de transport » se substituent aux « schémas directeurs routiers nationaux » par décret.

Pour les chemins de fers, la séparation entre infrastructure et exploitation se produit en 1997. Les activités de la SNCF - Grandes Lignes et Transport Public pour les voyageurs, le Fret et l'Infrastructure - sont scindées et réduites à l'exploitation et la maintenance du réseau ferré. Il en résulta la création de l'Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), Réseau Ferré de France (RFF), principal gestionnaire d'infrastructure ferroviaire en France. Il est chargé de l'aménagement, du développement, de la cohérence et de la mise en valeur du réseau ferré national (CODE DES TRANSPORTS, 2015). RFF est sous la tutelle de l'État, exercée par la Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Le renouveau du rail découle du schéma directeur des lignes à grande vitesse, adopté par le Comité interministériel d'aménagement du territoire (CIAT) du 14 mai 1991 et publié par décret du 1er avril 1992 (SENAT, 2003). Ce schéma prévoyait la construction à long terme de 3 500 km de lignes nouvelles à grande vitesse, portant la longueur totale du réseau à grande vitesse à 4 700 km. Cependant, il ne prévoit pas de financement ni de date limite pour ces lignes.

Le réseau ferré de transports en commun d'Ile de France est gouverné de manière analogue, à l'exception de la propriété des infrastructures qui revient à l'opérateur sur la durée de son contrat d'exploitation. En effet, en 2009, des modifications législatives ont entrainé une évolution du contexte d'intervention de la RATP. Le règlement CE n° 1370/2007 du Parlement européen relatif aux services publics de transport de voyageurs par chemin de fer et par route, oblige les autorités compétentes en matière de transport « à conclure un contrat de service public avec l'opérateur à qui elles octroient un droit exclusif

[5] www.senat.fr

et/ou une compensation en échange de la réalisation d'obligations de service public» (LEGISLATION EUROPEENNE TRANSPORT). Parmi les principes de ce règlement, on trouve la possibilité des opérateurs de transport de recevoir des aides publiques, le choix de l'autorité organisatrice à fournir le service elle-même ou de le confier à un opérateur interne sur lequel elle exerce un contrôle, ou bien faire appel au marché et dans le cas d'appel au marché, l'autorité organisatrice attribue un contrat de service public à l'issue d'une procédure de mise en concurrence transparente et non discriminatoire. Ainsi, l'ordonnance de 1959 qui accorde des droits exclusifs à durée illimité à la RATP est annulée. Cette mise en concurrence future est arrangée par une loi qui désigne la RATP comme « *gestionnaire de l'infrastructure du réseau de métropolitain affecté au transport public urbain de voyageurs en Ile-de-France, dans la limite des compétences reconnues à Réseau ferré de France. A ce titre, elle est responsable de l'aménagement, de l'entretien et du renouvellement de l'infrastructure, garantissant à tout moment le maintien des conditions de sécurité, d'interopérabilité et de continuité du service public, ainsi que de la gestion des systèmes de contrôle, de régulation et de sécurité des lignes et des réseaux ferroviaires en Ile-de-France. Elle est également chargée de la gestion du trafic et des circulations sur ces lignes et ces réseaux lorsque les exigences de sécurité et d'interopérabilité du système ferroviaire ou la continuité du service public l'imposent. […] A l'effet d'exercer les missions qui lui sont dévolues par le présent alinéa, la régie est rémunérée par le Syndicat des transports d'Ile-de-France dans le cadre d'une convention pluriannuelle qui, pour chacune de ces missions, établit de façon objective et transparente la structure et la répartition des coûts, prend en compte les obligations de renouvellement des infrastructures et assure une rémunération appropriée des capitaux engagés.*» (ORDONNANCE, 7 janvier 1959). Cela a entrainé les changements suivants dans la propriété des biens entre le STIF (Syndicat des Transports d'Ile-de-France) et la RATP. Notamment, la propriété des biens constituant l'infrastructure et autres biens immobiliers est transférée à la RATP et la propriété des matériels roulants et matériels d'entretiens est transférée au STIF. Le STIF est un établissement public administratif qui assure la fonction d'autorité organisatrice des transports de la région Île-de-France (voir paragraphe 3.3.2). Il a remplacé le Syndicat des Transports Parisiens (STP) en 2000. Dès lors, le mode de financement des transports par le STIF évolue et la RATP comme la SNCF s'engagent dans un système de contrats pluriannuels. En effet, jusqu'alors le STP compensait la différence entre le coût réel d'exploitation des lignes par les entreprises chargées des réseaux et les recettes directes (vente des tickets et abonnements). Ce versement à la RATP provenait de deux apports, le versement transport d'une part, et l'indemnité compensatrice, versée en fin d'exercice par l'État (70 %) et par les huit départements franciliens (30 %) d'autre part, et ce, quels que soient les résultats des entreprises exploitant le réseau. Le STP avait donc peu de prise sur le service offert. Désormais le STIF et les entreprises publiques de transport, s'obligent par un contrat. Celui-ci précise la consistance et la qualité du service à réaliser par les opérateurs[6]. En 2005, les compétences du STIF s'élargissent à l'égal de celles des

[6] *www.idf.pref.gouv.fr/biblio/lettres/2000.let89.pdf*

autorités organisatrices de transport de province. Ainsi, le STIF a le pouvoir de réaliser des projets d'infrastructures, d'organiser les transports scolaires et les services fluviaux réguliers de voyageurs, de réviser le Plan de Déplacements Urbains (voir paragraphe 3.3.2), ou de fixer les taux du versement transport.

Dans le domaine des télécommunications, la gouvernance de l'Etat a été prédominante sur les réseaux filaires jusqu'à l'ouverture à la concurrence de 1998. Une loi votée en 1996, stipule que l'exploitant public France Telecom devient une société anonyme dont l'Etat français est le seul actionnaire. Ainsi, en 1997, une autorité administrative indépendante chargée de réguler les communications électroniques est créée sous le nom d'Autorité de Régulation des Télécommunications (ART). Elle deviendra l'ARCEP en 2005 avec des compétences étendues au domaine postal. L'ouverture à la concurrence des réseaux fixes n'a pas été sans conséquence pour l'opérateur historique. Cette transformation de métier de fournisseur de services publics en situation de monopole à celui de prestataire de services aux consommateurs sur un marché concurrentiel s'est faite progressivement et avec certaines difficultés. En raison du coût élevé du déploiement d'infrastructures de desserte filaire, les exploitants concurrents ont fait le choix de déployer uniquement des réseaux filaires de nouvelles technologies (câble et fibre) et d'utiliser le réseau déjà déployé en 1998 par France Telecom. Autrement dit, France Télécom a partagé son réseau filaire historique avec ses concurrents pour leur permettre l'accès au marché. L'exploitant historique a proposé des offres d'accès à ses infrastructures (offres de gros, dégroupage, etc.) et par conséquent,. des contraintes législatives et réglementaires. Des encadrements économiques lourds ont été mis en place par les pouvoirs publics concernant la validation des tarifs d'interconnexion et la validation des offres tarifaires proposées par France Télécom pour s'assurer que la société ne bénéficie pas d'avantages liés à sa position dominante sur le marché. Cette concurrence garantie par les pouvoirs publics a permis à la France d'être le pays européen où la technologie ADSL s'est développée le plus rapidement avec des tarifs très bas en comparaison avec les pays voisins. Il en fût autrement pour les réseaux mobiles. En effet, France Telecom ouvre son service de radiotéléphonie sous l'appellation Itineris en juillet 1992. Le premier réseau de deuxième génération est ouvert. Le 15 décembre 1992, SFR ouvre le deuxième réseau GSM du téléphone mobile. En 1996, le groupe devient SFR-Cegetel et est le premier opérateur privé de téléphonie fixe et mobile alternatif à France Télécom. En 1998, Itineris couvre 97 % de la population française avec 7 700 relais et compte 5,5 millions de clients, soit 49,6 % de parts de marché. En 2000, suite à un rachat à Vodafone par France Telecom, le réseau mobile de France Telecom devient le réseau Orange. La privatisation totale de France Telecom devenu le groupe Orange, s'opère en septembre 2004. A cette date, l'État français cède une partie de ses actions pour passer en dessous de la barre des 50 %. Cent-quinze ans après sa nationalisation, le réseau de téléphone fixe redevient totalement privé en France. Le changement total de nom pour Orange scelle le détachement de France Telecom avec l'Etat. En février 2012, la ligne fixe France Télécom change de nom et devient la ligne fixe Orange pour s'accorder avec le nom de l'offre mobile. Tous les services d'Orange France portent désormais le même nom. Les sites internet de

France Télécom renvoient tous vers les sites Orange. Toutefois, le nom juridique de l'entreprise, sa raison sociale, son adresse, son RCS (Registre du commerce et des sociétés français) restent France Télécom SA. Le changement complet de nom au profit d'Orange est finalement adopté en 2013. Ces changements de l'opérateur historique sont nécessaires pour « jouer le jeu de la concurrence ». En effet, en novembre 2004, SFR est le premier opérateur à lancer une offre sur son nouveau réseau UMTS (USINE OUVELLE, 18 novembre 2004). Orange est devancé d'un mois. Quant au troisième opérateur possédant une licence d'opération d'un réseau de téléphonie mobile, Bouygues Télécom, il fait le choix de se concentrer sur la technologie EDGE uniquement à partir de 2005 afin de limiter des coûts d'investissements tout en proposant des services de même type. Néanmoins, Bouygues Telecom a été tenu, du fait de ses engagements envers l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes), d'ouvrir son réseau commercialement début 2007. Fin 2009, l'ARCEP retient la candidature de l'opérateur Free Mobile pour la quatrième licence UMTS (L'HUMANITE, 4 Août 2009). Ainsi, une redistribution partielle des fréquences de transmission de l'ensemble des opérateurs possédant une licence 3G a eu lieu pour permettre l'arrivée du quatrième opérateur (DECISION ARCEP, 26 février 2008). Dès lors, la bande de fréquence 2100MHz est réservée à la 3G et la bande 900MHZ est utilisée pour les technologies 2G et 3G. La technologie UMTS nécessite le déploiement d'un nouveau réseau physique d'antennes et nécessite de nombreuses stations afin de fournir une couverture adaptée. En 2007, Orange ne couvrait que 65 % de la population avec 6 500 sites et fin 2009, 87 % de la population avec 11 000 sites. Afin d'offrir une couverture correcte dans les zones peu denses, les opérateurs peuvent se partager le réseau comme pour le réseau filaire. Fin 2012, l'ARCEP a confirmé un taux de couverture 3G supérieur à 98 % pour Orange et SFR et de plus de 94 % pour Bouygues Telecom (RAPPORT ARCEP, Novembre 2012).

3.3.2 **La gouvernance en résumé**

Ce paragraphe permet de synthétiser les notions qui se dégagent du paragraphe précédent.

Autorité organisatrice des transports:
En France, une autorité organisatrice de transports (AOT) est une collectivité publique à laquelle la loi d'orientation pour les transports intérieurs n° 82-1153 du 30 décembre 1982 (LOTI) a confié la mission de définir la politique de desserte et la politique tarifaire des transports. La définition des rôles varie selon l'échelle administrative. À l'échelle des communes, ou plus souvent leurs regroupements, on parle d'autorités organisatrices des transports urbains. Elles assurent l'exploitation directe des transports urbains en régie ou bien la délèguent à des sociétés privées. Elles participent à l'équilibre financier des services grâce notamment au versement transport prélevé sur la masse salariale des entreprises situées dans leur périmètre des transports urbains (PTU). Les départements sont autorités organisatrices des transports non urbains sur leur territoire, et les régions sont autorités organisatrices des transports ferroviaires régionaux. L'organisation des transports en Île-de-France constitue une

exception puisque qu'elle est fixée par le décret du 14 novembre 1949 et non par la Loti qui ne s'y applique pas. Le STIF est l'actuelle autorité organisatrice de transport en Île-de-France.

Schéma directeur :
Prenons l'exemple du schéma directeur de la région d'Île-de-France (SDRIF). C'est un document d'urbanisme et d'aménagement du territoire qui définit une politique à l'échelle de la région Île-de-France. Il vise à contrôler la croissance urbaine et démographique ainsi que l'utilisation de l'espace, tout en garantissant le rayonnement international de la région. Il préconise des actions pour corriger les disparités spatiales, sociales et économiques de la région, coordonner l'offre de déplacement et préserver les zones rurales et naturelles. L'Île-de-France est la seule région dans laquelle la loi SRU de 2000 a maintenu une planification à l'échelle de la région**.**

Périmètre de Transport Urbain :
Le périmètre de Transport Urbain (PTU) comprend le territoire d'une commune ou le ressort territorial d'un établissement public ayant reçu mission d'organiser le transport en commun de personnes. La circulaire du 7 octobre 1974 transforme le « Périmètre Urbain » en « Périmètre de Transport Urbain ». D'après la circulaire, ce périmètre s'identifie désormais, non plus en référence à un ensemble bâti, mais en fonction du ressort territorial de l'autorité administrative compétente en matière de transports urbains (AOT).

Plan de Déplacements Urbains :
Un plan de déplacements urbains (PDU) détermine, dans le cadre d'un PTU, l'organisation du transport des personnes et des marchandises, la circulation et le stationnement. Tous les modes de transports sont concernés, ce qui se traduit par la mise en place d'actions en faveur des modes de transports alternatifs à la voiture particulière (VP) : les transports publics (TP), les deux roues, la marche, etc. Chaque Plan de Déplacements Urbains doit maintenant aussi comporter un volet d'évaluation environnementale. Il est un levier pour les démarches visant à économiser l'énergie et limiter les émissions de gaz à effet de serre.

L'Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP) :
Il s'agit de l'autorité administrative indépendante chargée de réguler les communications électroniques et les postes en France. Elle a plusieurs missions dont la charge d'accompagner l'ouverture à la concurrence du secteur des télécommunications, et de réguler les marchés correspondants. Dans ce secteur d'activité, le rôle essentiel de l'Autorité est de veiller à l'exercice d'une concurrence effective et loyale au bénéfice des consommateurs sur le marché des communications électroniques. Son principal outil est nommé « analyses de marché ». Il consiste à définir les marchés pertinents, à désigner les opérateurs puissants et à définir les obligations spécifiques leur incombant, en général sur les marchés de gros – c'est-à-dire les marchés sur lesquels les opérateurs se facturent des prestations entre eux –, pour résoudre les problèmes concurrentiels identifiés. L'Autorité peut aussi fixer, dans le cadre légal, des obligations générales s'appliquant à tous les opérateurs, sous réserve qu'elles soient

homologuées par le ministre chargé des télécommunications. C'est le principe de la régulation dite "symétrique", qui s'impose de la même manière à chaque opérateur sur le marché, à l'exemple de la « portabilité mobile » (conservation du numéro lors du passage d'un opérateur mobile à un autre), sanctionner des opérateurs ne remplissant pas leurs obligations, et intervenir pour régler les différents entre opérateurs en matière d'accès au réseau (conditions techniques et tarifaires), attribuer des ressources en fréquences et en numérotation, et déterminer les montants des contributions au financement des obligations de service universel, défini par la loi de 1996. Elle assure la surveillance des mécanismes de ce financement. L'ARCEP collabore avec les régulateurs des 26 autres États membres de l'Union européenne au sein de l'Organe des Régulateurs européens des communications électroniques (l'ORECE) et est en lien avec la plateforme européenne des instances de régulation.

3.3.3 **Quelles sont les conséquences de ce paysage mixte pour les différents acteurs ?**

Ce paragraphe vise à mettre en relief quelques problématiques des différents acteurs dans la réalisation de leurs missions dans le contexte de gouvernance actuel.

Tout d'abord, les différents retraits de l'Etat et la multiplicité des opérateurs, sur un même mode et sur des modes distincts, entraine une difficulté pour les acteurs publics d'accéder à des données globales des activités sur les réseaux. En effet, certaines informations sont la propriété de l'opérateur et ne sont pas accessibles par les autorités de veille. De plus, selon l'opérateur, la nature des données fournies varient (BANOS, et al., 2010). Il est alors plus compliqué d'agréger l'ensemble des informations par modes pour accéder à une connaissance globale sur un périmètre. A titre d'exemple sur le domaine des transports, le STIF ne peut se constituer une base de traces numériques de l'activité sur le réseau de transport en commun ferré d'Ile-de-France qu'aux validations des cartes d'abonnement au niveau des barrières de péages, tandis que les opérateurs de ce réseau, la RATP et la SNCF disposent d'un comptage exhaustif des validations par cartes d'abonnement et par tickets unitaires dont ils sont propriétaires et non contraints à partager l'ensemble de ces mesures avec l'AOT. Cette connaissance incomplète d'estimation de l'activité sur les réseaux est un frein à l'élaboration d'une politique de gestion. Nous verrons dans le chapitre 3 les besoins d'outils des décideurs qui permettent d'évaluer les bénéfices (économiques, sociaux, environnementaux) des investissements et quelles sont les limites des outils et méthodes actuelles.

La décentralisation croissante et l'ouverture à la concurrence a également amené de nouvelles problématiques pour les opérateurs. Dans une dynamique économique concurrentielle, chaque opérateur doit d'une part proposer des services attractifs pour les usagers en terme de coût et de qualité de service et d'autre part se conformer aux exigences réglementaires posées par les autorités organisatrices en terme de respect de la libre concurrence, de qualité de service et d'interconnexion à garantir. Les conséquences de non-respect de ces engagements font l'objet d'amendes jusqu'au retrait du droit d'exploitation du canal de communication. Le paragraphe suivant se consacre de manière plus détaillée à la problématique de l'exploitation des réseaux, cœur de métier des opérateurs.

4 L’exploitation des réseaux

La gestion de la demande sur un réseau sous l’angle de l’exploitation est l’activité portée par l’opérateur. Nous traiterons de cette notion sous deux axes. Premièrement, comme dans les paragraphes précédents, nous décrirons les principales phases d’évolution des conditions d’exploitation. Dans un deuxième temps, nous spécifierons le rôle des acteurs de l’exploitation et les besoins induits par la pratique de leur métier dans l’environnement actuel des transports et des télécommunications.

4.1 Une évolution des enjeux de l’exploitation

Ce paragraphe traite des évolutions des dispositions d’exploitation face à une mutation des problématiques. On distingue trois phases : premièrement à la naissance des réseaux, les difficultés de l’exploitation portaient sur des difficultés techniques plus que sur une demande dépassant l’offre ; par la suite, l’engouement a généré des besoins de gestion de la demande croissante par le déploiement de nouvelles infrastructures ; enfin, une fois un réseau dense déployé, les politiques de gestion de la demande ont dû s’adapter à un contexte économique limitant les déploiements d’infrastructures nouvelles.

4.1.1 Un réseau à construire

Les difficultés d’exploitation des premiers réseaux de transports et de télécommunications relevaient principalement de considérations techniques d’opération. Néanmoins, les avancées techniques et l’acceptation d’un mode pouvaient entrainer une congestion d’un réseau. C’est le cas des transports de surfaces de Paris qui sont saturés au début du XXème siècle. Cet état de fait est un des facteurs ayant déterminé la construction du réseau métropolitain. L’excédent de demande par rapport à l’offre du réseau de transport parisien a été absorbé grâce au déploiement d’une nouvelle infrastructure. On observe ce même phénomène d’équipement massif pour répondre à un nombre d’abonnés croissant dans le secteur des télécommunications. En résumé, la construction d’une offre adaptée à la demande était synonyme de construction d’infrastructures et les acteurs de l’exploitation étaient concentrés sur l’évolution de l’offre en terme de vitesse, de capacité et surtout de sécurité.

4.1.2 Les débuts de l’outillage d’aide à l’exploitation

Les années 1960-1970 marquent un tournant dans le déploiement massif des infrastructures de transport. Cependant, la demande ne cesse de croître avec l’étalement des agglomérations des grandes villes. Ainsi, apparait par exemple le Réseau Express Régional à Paris dont le but était de desservir les banlieues, tout en favorisant l’urbanisation des villes nouvelles à l’est et à l’ouest de Paris. Le tracé du RER, le plan d’opération, les

interconnexions avec le réseau en place et la prévision de connexions avec de futures branches du réseau de transport en commun ferré d'Ile de France (Ligne 14 et RERE) sont minutieusement étudiées. Il faut s'assurer que ces réseaux répondront à la demande tout en optimisant les coûts de construction et d'opération à venir. De plus, l'espace urbain se densifiant avec les années, la marge de manœuvre spatiale est à prendre en considération. Les avancées technologiques des matériels roulants ont donné naissance au TGV. Son arrivée en 1980 a signé la fin du déploiement des lignes traditionnelles. Ainsi, pour des trajets sur des longues distances, trois réseaux se concurrencent : le réseau autoroutier, le réseau ferré et ses Lignes Grande Vitesse (LGV) et le réseau aérien. Les avancées technologiques portent également sur des outils d'aide à l'exploitation comme le SACEM pour le RER. Néanmoins, au début du XXIème siècle, le déploiement de nouvelles infrastructures qui avait commencé à s'essouffler à la sortie des Trente Glorieuses est en phase de déclin, voir fini. Il n'est plus spatialement, et surtout financièrement envisageable de répondre à une demande toujours croissante en ne proposant qu'une amélioration de l'offre par la construction de nouvelles infrastructures. Il s'agit d'améliorer l'existant par des progrès technique sur les infrastructures (l'automatisation des lignes de métro, des postes d'aiguillages, …), sur l'organisation des transport (rôles de acteurs, tarification, réglementation,…), mais surtout sur les outils d'exploitations (SACEM, boucles électromagnétiques, feux tricolore commandé, ….), et de planification pour dimensionner le réseaux de transport en fonction des prévisions de demande et des volontés d'aménagement du territoire qui se veulent durables. Nous verrons dans le chapitre 3 l'évolution des méthodologies de modélisation des transports.

On observe le même phénomène dans les réseaux télécommunications filaires. En effet, une fois chaque bâtiment connecté au réseau, il s'agit d'améliorer les techniques de diffusion des informations, l'organisation du réseau et ses équipements sans pour autant modifier les canaux physiques de propagation.

En résumé, l'effort d'exploitation de cette phase était conjointement porté par un effort de construction d'infrastructures de réseau en essoufflement mais surtout un nouvel effort d'optimisation des réseaux et leur gestion.

4.1.3 La fin des investissements massifs en infrastructure : quelles options pour l'exploitant face à une demande croissante ?

Cette dernière phase est centrée sur les leviers de construction d'une offre de transport adaptée à une demande qui ne cesse de croître, dans un contexte où l'investissement dans de nouvelles infrastructures se raréfie. Tous d'abord, nous verrons au travers d'un exemple urbain les cas où les efforts de génie civil sont encore priorisés. Nous traiterons ensuite des exemples d'actions menées et d'outils utilisés par les opérateurs pour optimiser l'exploitation. Enfin, nous verrons quelles sont les tendances globales de réaction face à un territoire équipé en infrastructures sur lequel la demande ne cesse de croître.

Premièrement, illustrons le phénomène d'essoufflement des investissements massifs en infrastructure à l'échelle urbaine car c'est un espace contraint. En effet, l'espace urbain constructible ou aménageable est précieux et rare, et donc impacte fortement les coûts de génie civil pour le développement de nouvelles infrastructures. Néanmoins, dans certaines zones périurbaines où le bâti est moins dense, il est plus aisé de réaliser des infrastructures qui, pour la plupart, sont des réhabilitations d'anciens tronçons et le prolongement de ceux-ci. A titre d'exemple, nous citerons l'exemple de la ligne 2 du tramway d'Ile de France (T2) dont l'exploitant est la RATP. La majeure partie de son parcours emprunte les infrastructures de la ligne de Puteaux à Issy-Plaine ouverte en 1889. Cette ancienne ligne, aussi nommée Ligne des Moulineaux, souffrait d'un manque d'investissement qui en faisait une des lignes les plus vétustes de la banlieue de Paris, entrainant des performances médiocres, malgré un tracé opportun car situé à proximité de la Défense. Cette ligne ferme en 1993 pour sa réhabilitation en ligne T2 mise en service en 1997. Elle sera prolongée en 2012 jusqu'à la Défense pour assurer les connexions avec le réseau de transport en commun ferré (G., 2003). La modernisation de la ligne avec son prolongement au nord à La Défense est inscrite au contrat de plan État-Région. Le schéma de principe est pris en considération par le Syndicat des transports parisiens le 23 octobre 1991. La concertation préalable à la déclaration d'utilité publique est prononcée en mars 1993 pour une mise en service prévue en 1996. Les travaux sont engagés en septembre 1993, mais en 1994, le maire de Puteaux entame un recours contre la déclaration d'utilité publique, exigeant des aménagements pour sa commune en raison des nuisances qu'apporterait, selon lui, la nouvelle ligne de tramway. En 1995, les travaux de rénovation sont en cours de réalisation entre Puteaux et Issy, mais restent bloqués au nord par l'intransigeance du maire, en pleine campagne électorale des municipales de mars. Après plusieurs mois de procédure, le tribunal administratif rejette le recours, considérant les demandes du maire infondées en raison du caractère peu bruyant du tramway. Cette opposition provoque néanmoins un retard de dix-huit mois, préjudiciable aux exploitants comme aux usagers (LE PARISIEN, 4 avril 2014). Le coût du chantier se monte à 94,52 millions d'euros, auxquels il faut ajouter 41,47 millions d'euros pour les seize rames de tramway. La modernisation de la ligne, l'accès direct à La Défense et la desserte selon une fréquence d'un tramway toutes les quatre à douze minutes rencontre un grand succès, avec un trajet entre Issy et La Défense effectué en 22 minutes, et fait rapidement croître le trafic bien au-delà des prévisions initiales de 27 000 voyageurs par jour. Le succès de la ligne entraîne sa rapide saturation. L'extension des quais et le remplacement du matériel roulant sont envisagés peu de temps après son ouverture. En 2003, de nouvelles rames, plus longues et pouvant être accouplées sont mises en service. Grâce à eux, l'intervalle théorique aux heures de pointe est passé de 4 minutes 15 à 3 minutes 45 et la capacité de transport global a augmenté de 35 %, chaque rame pouvant transporter davantage de voyageurs. À partir de juillet 2003, les travaux d'infrastructure, actés par le STIF, débutent afin de permettre à terme la future exploitation de la ligne en rames doubles aux heures de pointe. En 2005, le trafic de la ligne s'élève au double des prévisions initiales, avec 60 000 voyageurs par jour. Des rames doubles de soixante-cinq mètres sont alors mises en service en septembre 2005 augmentant la capacité

de la ligne de 33 %. Depuis, le T2 connaît une progression constante de son trafic, dépassant les 65 000 voyageurs par jour, et entamait en 2007 son prolongement tant au nord qu'au sud (TRICOIRE, 2007). Ces travaux ont été financés à hauteur de 14,48 millions d'euros par la région Île-de-France (6,36 M€), l'État (3,82 M€), la Ville de Paris (1,75 M€) et la RATP (2,55 M€ sur prêt bonifié de la région) (RATP, 5 septembre 2005). Cet exemple en périmètre urbain illustre deux aspects. Premièrement, les investissements en infrastructure se raréfiant, ils sont priorisés pour permettre le rabattement vers des réseaux en place, mais aussi pour désengorger des tronçons saturés. En effet, en prenant l'exemple trajet de la Défense-Mairie d'Issy, le T2 offre un itinéraire compétitif en temps, 39 minutes contre 45 minutes en métro, et en nombre de correspondances, aucune contre 2 en métro[7]. Deuxièmement, l'étape de mise en place d'une nouvelle infrastructure est accompagnée d'optimisation de la ligne en augmentant la fréquence, en ajustant la capacité des matériels roulants et en facilitant les connexions au reste du réseau de transport. Dans le domaine des télécommunications, il est d'usage de procéder à des incrémentations techniques pour s'affranchir du déploiement de nouvelles technologies et donc de nouveaux équipements. C'est le cas des évolutions au sein d'une même norme. Par exemple, en 3G, les évolutions Rel99, HSDPA et HSDPA-DC ont permis d'utiliser les mêmes canaux afin de faire circuler plus d'informations (BINUCCI, et al., 2004).

Afin d'adapter leur offre à la demande, les opérateurs disposent de plusieurs méthodes. Certaines méthodes sont transparentes pour les usagers, comme les outils d'aide à l'exploitation, et d'autres sont basées sur des encouragements des usagers à observer un certain comportement, modulant ainsi directement la demande. Tout d'abord, présentons un exemple d'outils d'aide à l'exploitation, le SACEM (Système d'Aide à la Conduite à l'Exploitation et à la Maintenance). Cet outil a été mis en place dans le contexte de l'ouverture du tronçon Auber-Nation de la ligne A du RER en 1977. La charge maximale théorique par heure pour ce tronçon était de 44 500 voyageurs par heure avec un intervalle minimal de 2 minutes et 30 secondes (avec un arrêt de 50 secondes en gare). A partir de la mise en service, le trafic ne cesse d'augmenter. Cette charge limite a vite été dépassée. Avant même que les opérateurs du tronçon (RATP et SCNF) ne trouvent une solution la charge atteignait déjà 50 000 voyageurs par heure, posant ainsi des problèmes de sécurité sur la ligne (PARKINSON, et al., 1996). Les solutions envisagées par les autorités de transport pour parer à cette surcharge étaient soit de prolonger les trains et donc les quais, soit de construire une ligne parallèle, soit d'appliquer un système de contrôle des trains[8]. Etant donné les coûts financiers et temporels des deux premières solutions, ils ont favorisé le choix de l'option du SACEM développé par MATRA Transport. Cette solution d'aide à la conduite a permis de

[7] www.ratp.fr

[8] http://www.swe.siemens.com/FRANCE/WEB/FR/STS/REALISATIONS/EUROPE/FRANCE/Pages/iledefrance_rer.aspx

résoudre la situation sans changements radicaux des infrastructures. De plus, cet outil permet d'assurer la sécurité et la maintenance grâce à un ordinateur de bord qui remontent toutes les informations nécessaires (vitesse, distance au train précédent, état des freins, détection de pannes matérielles ….)[9]. La mise en service du SACEM sur le tronçon central du RER A entre Nanterre-Université, Val de Fontenay et Fontenay sous-Bois a permis de réduire l'intervalle minimal de 2 minutes et 30 secondes à 2 minutes. Il est théoriquement possible de le réduire encore à 90 secondes pour les trains courts. Le SACEM fait partie de la famille des outils d'opération automatique des trains et de contrôle automatique des trains (ATO/ATC). L'étape suivante à la conduite assistée était de passer d'une ligne opérée par un conducteur à une ligne complètement automatique. En 1998, la ligne 14 du métro de Paris est inaugurée. La fiabilité de la ligne est de 99% avec un coût de l'opération de la ligne estimé à deux fois moins que les autres lignes, les intervalles entre les rames sont de 85s contre 105s en moyenne sur les autres lignes, et la vitesse commerciale est de 40km/h en moyenne contre 20-27km/h pour les lignes non-automatiques. Les évolutions en matière d'automatisation de la gestion et de l'opération des matériels roulants a permis d'enrichir l'offre proposée, en terme- de performance mais aussi en terme de ponctualité, confort et facilité d'accès, tout en améliorant la sécurité et la détection d'incident[10]. La Figure 4 montre les différentes évolutions en matière d'automatisation des lignes de métro et de RER depuis 1952.

[9] SACEM Automated Train Control MATRA TRANSPORT

[10] http://www.frost.com/sublib/display-market-insight-top.do?id=243119311

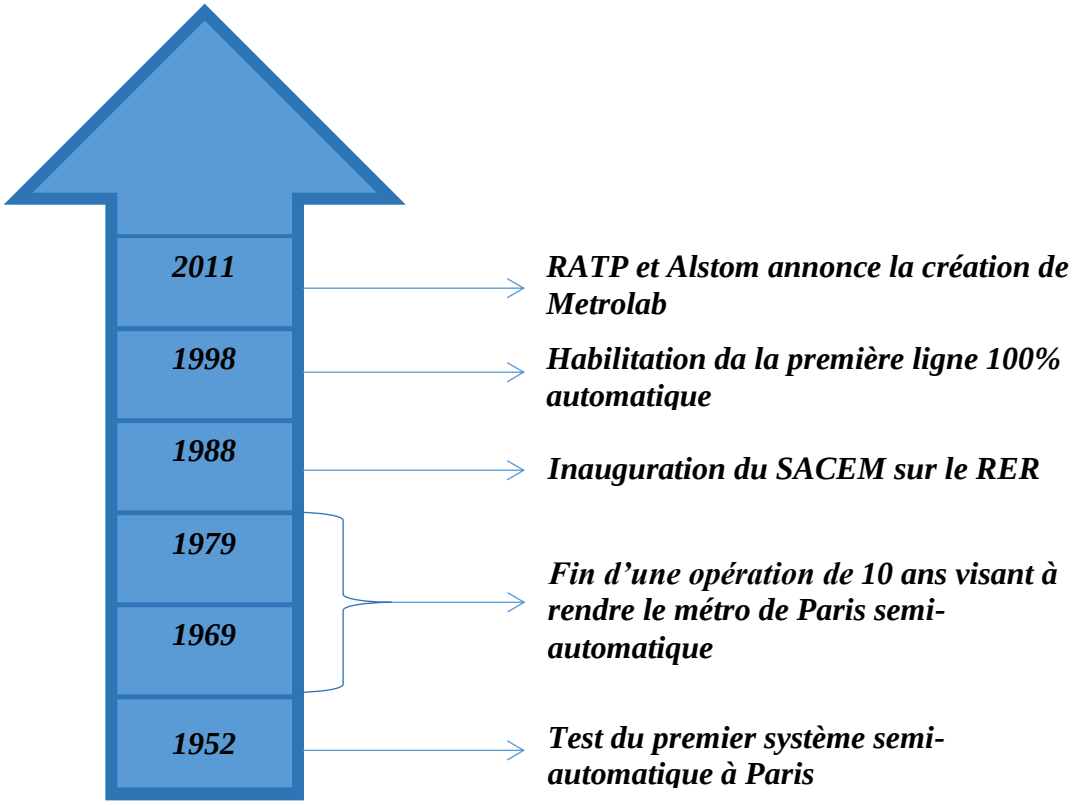


Figure 4 : Les étapes importantes de l'automatisation du Métro parisien

Ensuite, les opérateurs peuvent « favoriser » le désengorgement de certaines lignes, ou faciliter la désaturation localisée dans le temps et dans l'espace au travers d'une communication aux voyageurs. Nous développerons l'information aux voyageurs dans le chapitre suivant qui est consacré à la perception utilisateurs. Ainsi, en différents points du réseau opéré, des propositions d'itinéraires alternatifs proposés par l'opérateur, permettent d'influencer l'affectation de la demande. De la même manière, un opérateur peut proposer des reports modaux en cas d'incidents ou de travaux (système de bus par exemple) mais également pour désengorger certaines lignes en introduisant des offres tarifaires avantageuses. Le report modal est également pratiqué dans les télécommunications. Il s'agit soit de possibilités techniques offertes, que l'usager déclenche (report de consommation de données par le réseau mobile vers des AP wifi) ou des reports déclenchés par le réseau lui-même. A l'heure actuelle, le réseau fibre et le réseau cellulaire de quatrième génération sont en pleine phase de déploiement massif. Ils résultent d'évolutions technologiques nécessaires pour répondre aux besoins capacitaires des lignes de communication et au support des nouveaux services. En cela, les réseaux de télécommunications sont différents des infrastructures de transport car l'espace de fréquences n'est pas saturé et le déploiement de nouvelles infrastructures à l'échelle nationale est encore envisageable. Néanmoins, les services proposés, notamment pour tout ce qui est de type LBS (Location Based Services) et les applications multimédia entrainent des difficultés d'opération pour satisfaire la qualité de service annoncée. On observe des phénomènes de congestion localisée dans l'espace et dans

le temps sur les réseaux de télécommunications. Dans le cas des réseaux mobiles, des solutions de « report modal » vers des hotspots Wi-Fi sont plébiscitées. Une fonctionnalité appelée ANSDF (Access Network Discovery and Selection Function) est actuellement normalisée 3GPP pour permettre un déchargement du réseau mobile vers les réseaux Wi-Fi avoisinant (ORLANDI, et al., 2012).
Le report modal est encouragé par des politiques globales pour faciliter le rôle des exploitants, mais aussi réduire les nuisances (sonores, environnementales), et participer au désenclavement. Par exemple, les villes tendent à limiter les accès au centre-ville en voiture pour implanter des réseaux de transport en commun en site propre. Des réseaux de rabattement depuis les banlieues et des parkings sont mis en place. L'intermodalité est alors encouragée pour connecter des réseaux à différentes échelles et différentes finesses de desserte. D'autres politiques peuvent être proposées par les acteurs de l'offre non-exploitants. On peut citer la circulation alternée, des réductions de vitesses sur certains tronçons, des régulations de vitesses automatiques ou encore des demandes d'aménagements des horaires de travail pour étaler les heures de pointe.

En résumé, pour absorber une demande qui ne cesse de croître, les acteurs de l'offre en charge de l'exploitation disposent de trois leviers. Tout d'abord, la méthode qui fonctionne depuis le début des réseaux, est le développement de nouvelles infrastructures, ou pour la prolongation de l'existant ou encore pour des travaux de restructuration. Nous avons vu que ce type d'action coûteuse n'est plus la solution vers laquelle se tournent les opérateurs en priorité. Ensuite, les outils d'aide à l'exploitation et l'automatisation de l'exploitation doivent être constamment enrichis pour optimiser l'opération des infrastructures. Les efforts des opérateurs continuent activement sur ces sujets. Enfin, le dernier levier qui apparait dans cette phase est la mise en place de politique de régulation locale, par les opérateurs sur leurs réseaux, et globale, par les autres acteurs de l'offre, pour renforcer les efforts menés par les opérateurs. On remarquera que l'ordre de mise en application des méthodes de calibrage de l'offre s'est inversé par rapport aux phases précédentes.

4.2 **Présentation du contexte actuel d'exploitation**

Aujourd'hui, les réseaux de transports recouvrent une portion importante des espaces terrestres et aériens, et les financements d'investissement en infrastructure se font plus rares. Dès lors, l'activité des exploitants de transport et de télécommunications a évolué vers une activité d'optimisation de l'opération, des réseaux existants, c'est-à-dire une activité d'administration des réseaux. Il s'agit d'une administration contrainte par des considérations de fluctuations de charge des réseaux qui se saturent, de gestion des interconnexions entre des réseaux opérés par différents acteurs, de garantie d'une qualité de service maximale dans un environnement concurrentiel tout en réduisant les coûts financiers et environnementaux. Le but de ce paragraphe est de placer ces acteurs de l'offre dans leur écosystème et d'illustrer les contraintes avec lesquelles ils évoluent.

4.2.1 **Le rôle des exploitants**

Parmi les acteurs de l'offre de transport, les opérateurs sont ceux dont le métier est en interaction directe avec les usagers. A ce titre, ils sont garants du bon fonctionnement des réseaux pour assurer les services dans des conditions de sécurité, de confort et de performance. La performance est traitée selon trois aspects. Tout d'abord, la performance est assurée par la maintenance des équipements, leur paramétrage et la manière de les utiliser de manière optimale sur le réseau. Cette optimisation des paramètres du réseau, dont fait partie les équipements, est un enjeu essentiel pour les opérateurs. En effet, dans un milieu concurrentiel la qualité de service est un facteur de choix important pour un usager. Ainsi, les opérateurs doivent mettre en place des mécanismes de gestion des saturations pour garantir une dégradation minimale de la qualité de service. Enfin, les performances sont à assurer également pour les connexions entre réseaux, même s'ils sont opérés par la concurrence. Les opérateurs exploitent des sous-réseaux connectés à d'autres réseaux. Dans les cas de télécommunications, cette transition entre opérateurs doit être transparente pour l'usager, c'est-à-dire que la qualité de service doit être maintenue. Ce maintien des performances en intermodalité ou en interopération sur des réseaux est un exemple de directives des acteurs de l'offre globale. Les opérateurs sont en effet assujettis à des autorités qui fixent certaines contraintes d'exploitation. Comme vu précédemment, ces dernières fixent la tarification, les objectifs de qualité de service minimum, les réglementations de fonctionnement (règle de circulation, limitation des polluants, …) et les directives d'encouragement aux reports modaux et les conditions d'intermodalité et d'interopérabilité.

4.2.2 **L'exploitation : un monde contraint**

Le rôle de l'exploitant s'opère dans un milieu doublement contraint. D'une part, le cadre de l'exploitation est déterminé et fixé par les directives des acteurs de l'offre garants de l'intégration des réseaux de transports dans les écosystèmes territoriaux. D'autre part, les usagers et donc la demande posent les difficultés de l'exploitation. La demande fluctue dans le temps, entrainant des saturations qui dégradent la qualité de service. Afin de gérer les fluctuations de la demande, autant pour des raisons de performance que de sécurité, un opérateur a besoin d'une connaissance fine et dynamique de l'état des lieux sur l'ensemble de son réseau. En effet, une information adaptée lui permet de prédire, de détecter des seuils caractéristiques de demande avant d'éventuels effets de saturations critiques, et donc de déployer des actions adaptées à la gestion des dépassements de capacité. L'observation du réseau doit donc être réalisée dynamiquement et statiquement. En effet, les comportements moyens des usagers peuvent être appris à des échelles temporelles plus grandes, notamment pour l'apprentissage des phénomènes répétitifs des comportements (voir chapitre suivant). Néanmoins, les comportements exceptionnels ne peuvent être observés et appris que dynamiquement. Il est également primordial de connaitre les flux en provenance des autres réseaux. A ce titre les opérateurs de transport deviennent des opérateurs de mobilité.

5 Conclusion

5.1 Vers quelles interactions entre réseaux de transport et réseaux de communications ?

Par construction, les réseaux de télécommunications ont été conçus pour des usagers en mobilité. L'usage des réseaux de transports et de télécommunications semble donc lié. Ainsi, décomposons les deux implications.

5.1.1 Des outils de planification transport pour l'aide au déploiement des réseaux de télécommunication

Au début des années 2000, des travaux de recherche ont débuté pour répondre à la problématique du réseau UMTS en France. Face à la concurrence, l'optimisation des réseaux de télécommunications a subi une forte pression. Ainsi, des besoins plus fins pour la description de la réalité des milieux de propagation des ondes radioélectriques sont apparus, car l'espace géographique doit être pris en compte dans les modèles de propagation. Traditionnellement, les opérateurs utilisaient des cartes topographiques classiques combinées à des photographies aériennes pour optimiser le déploiement de leurs réseaux. Une mauvaise prévision sur les conditions de propagation entraine des difficultés d'opération pour maintenir la qualité des communications. Or dans un secteur concurrentiel tel que les télécommunications, le mécontentement des abonnés est à exclure. Ainsi, la question de l'influence des données géographiques orientée occupations du sol sur les modèles de propagation a été posée. Grâce à l'Analyse Spatiale et l'intégration de données pertinentes au sein d'un SIG (Système d'Information Géographique), des algorithmes de calculs de couverture ont pu être élaborés afin d'optimiser les réseaux mobiles (TURCK, 2009). De plus, face à la demande croissante, la nécessité de densification du réseau devient inévitable. Ceci complexifie le calcul de couverture par la réduction de la taille des cellules. Alors la pertinence des données géographiques réside dans leur résolution. Ainsi, en 2005, il existait trois domaines en expansion qui lient SIG et télécommunications :

- le dimensionnement du réseau mobile
- la sélection des futurs sites d'implantations
- la visualisation. En effet, la possibilité de visualiser les réseaux radio-mobiles (zone de couverture, zone d'interférence, débits théoriques …) est un apport important pour les ingénieurs et les aménageurs. Elle renforce ainsi l'idée d'une complémentarité entre SIG et télécommunications.

Généralement, seul des calculs de champs émis et de débits théoriques sont produits par les outils de modélisation de propagation. En effet, la charge (nombre d'abonné présents dans une cellule et leur utilisation) est supposée constante. Certains outils permettent de simuler une charge variable. Il existe différents modèles de mobilité utilisés dans les logiciels d'aide au déploiement. Cependant, à la connaissance de l'auteur, il s'agit de modèles synthétiques et non à traces. Les besoins d'outils de mesure de déplacements dynamiques du domaine du transport ne seraient-ils pas aussi un besoin des réseaux de télécommunications à

l'ère des réseaux auto-organisés ? De manière générale, l'industrie des télécommunications utilise des modèles dans lesquels les terminaux mobiles sont statiques. Néanmoins, connaitre les activités des abonnés est un point important pour le dimensionnement des réseaux cellulaires. En effet, les conditions de transmission et de réception du signal radio sont différentes selon la nature mobile ou immobile du terminal. Dans le cadre du déploiement de nouveaux sites, l'hypothèse de stationnarité des mobiles prise, était légitime car le choix de l'emplacement d'une antenne et de ses paramètres sont statiques. Cela ne se vérifie plus pour la mise en place de fonctions dynamiques implémentées au niveau des réseaux de télécommunication. Par exemple, (JOUMAA, et al., 2008) propose d'utiliser un modèle de mobilité MBMM (pour Mask Bases Mobility Model) dans le but d'évaluer les paramètres de la fonction de régulation de puissance des réseaux UMTS. En effet, la variation des puissances des signaux radios-électriques permet d'assurer la qualité de service des communications. Enfin, la nouvelle génération d'antenne est faite d'équipements dont certains paramètres peuvent être pilotés à distance voire automatisés (BRUNNER, et al., Avril 2009). Ainsi, des modèles de propagation enrichis des comportements de déplacements ne seraient-ils pas un plus pour le dimensionnement des réseaux, l'opération, et la mise en place d'autorégulation en fonction de la mobilité des abonnés?

5.1.2 **Faciliter l'opération des transports via les réseaux de télécommunications ?**

Les mutations de la relation à l'espace et au temps ont entrainé une recherche de l'optimisation du temps de transport par chaque usager. L'avènement des technologies de télécommunications, a permis à chaque usager l'accès en temps réel depuis son terminal à un large panel d'informations relatives à son trajet afin d'optimiser son choix d'itinéraire, d'horaires etc. En effet, il est possible d'accéder via l'Internet sur mobile, ou via des applications dédiées, à l'état du trafic, les possibilités de connexions intermodales, les conditions météorologiques, les points d'intérêts à proximité tout au long du trajet, etc. Les mobiles sont devenus de véritables aides pour les acteurs de la demande des transports pour optimiser leurs activités, et notamment leurs déplacements dans un système de mobilité de plus en plus complexe. Une meilleure connaissance de l'état des réseaux de transport permet une plus grande efficacité dans l'organisation même des activités. Ceci peut entrainer de nouveaux déplacements comme nous le verrons dans le chapitre suivant. Mais surtout, on retrouve la relation entre le domaine des transports et le domaine de télécommunication au travers de l'information aux voyageurs. Divers opérateurs, comme la RATP par exemple, mettent en ligne l'heure de départ des prochains trains. Bien que cette information soit disponible à quai, cela permet à un usager d'anticiper son heure d'arrivée à la station, ou même à un voyageur grandes lignes de revoir son interconnexion avec les systèmes de transport urbain via un plan de la gare et des différents horaires proposés dans le cas d'itinéraires compétitifs. De plus, de nombreux réseaux sociaux autour des transports se sont développés dans lesquels des voyageurs échangent leur expérience du réseau. L'implication des opérateurs dans les réseaux sociaux n'est pas avérée. Ainsi, à l'aide des technologies de commutations, la demande est modifiée et « s'auto-adapte » à l'offre. Cependant, chaque

usager aura une réponse individuelle à un problème collectif. On observe bien une évolution des usages des réseaux où une demande en transport va générer une demande en télécommunication. Ne serait-il pas intéressant pour les opérateurs d'utiliser les terminaux mobiles pour transmettre une information voyageur maitrisée voir orientée pour réguler leur réseaux ? De plus, ces terminaux qui accompagnent les usagers dans leur déplacement n'agissent-ils pas comme des capteurs de déplacement ?

5.2 **Un bilan sur les réseaux de transport**

Nous avons observé plusieurs phases historiques, à la fois sous l'angle de la hiérarchie modale, de la gouvernance et de l'exploitation. Elles ont mené au contexte actuel sur les réseaux de transports. Des technologies matures dans leurs performances de portée et de vitesse, qui ont muri avec le temps, nous sommes passés à des besoins techniques qui portent sur plus de services, plus de confort, plus d'information, plus de fiabilité, plus de sécurité, tout en réduisant les nuisances (sonores, environnementales). On peut faire une observation similaire dans le domaine des télécoms, à ceci près que la « course aux vitesses (débits) » est encore d'actualité mais sous un angle de régulation des ressources énergétiques, tout en privilégiant la qualité de service dont le débit est un critère fort. Les matériels roulants peuvent techniquement atteindre des vitesses élevées dans des conditions de sécurité, ainsi, les contraintes de temps de parcours des usagers ne dépendent plus que de l'exploitation des réseaux. Les efforts techniques portent sur l'administration des réseaux dans un contexte intermodal.

Alors, le besoin de connaissance de l'usage des réseaux pour l'investissement, la planification et l'exploitation est devenu central. Cette connaissance porte à la fois sur l'environnement global des réseaux dans leur contexte territorial dans le cadre de l'aménagement, et sur des phénomènes localisés dans le temps et dans l'espace dans le cadre de l'exploitation. Les acteurs du transport ont besoin d'un outillage adapté pour traiter cette connaissance des déplacements. Le chapitre 3 est consacré à ce point particulier. Cependant, au cœur des réseaux se trouve l'usager. Cet usager dont le besoin de se déplacer et de communiquer va l'amener à emprunter les réseaux de transport et de télécommunications. Cet usager a le choix dans sa manière de se déplacer et de communiquer. Il forme l'objet de connaissance nécessaire pour que les exploitants des réseaux puissent remplir leur rôle de fournisseur de service. Le chapitre 2 est consacré à l'usager des réseaux de transport. En effet, il était nécessaire, avant même d'aborder la mesure des déplacements à partir de remontées du réseau de télécommunications, de s'intéresser à l'objet à estimer tel qu'il se définit dans le domaine des transports. Le chapitre suivant pose les définitions et les constats qui serviront de base à notre travail, à savoir celle de la mobilité, celle des déplacements et comment ces derniers sont pratiqués sur un réseau de transport.

Chapitre 2 : Etat des lieux de la pratique de la mobilité sur les réseaux de transport

Les acteurs de la demande de mobilité : les usagers

Le chapitre 1 a posé une base de compréhension des enjeux des acteurs de l'offre de transport ou de télécommunication. Ce chapitre est consacré aux acteurs de la demande de services de mobilité, c'est-à-dire les usagers. La connaissance fine de la mobilité des personnes est un outil indispensable à l'étude du fonctionnement des territoires. Cette connaissance est centrale pour aborder les questions de planification et d'aménagement (structuration des réseaux, implantation d'activités, de logements, etc.) ou de dimensionnement et d'exploitation (adéquation offre-demande, politique tarifaire, etc.). La planification et l'exploitation des réseaux de transport nécessitent l'utilisation de données concernant les déplacements effectués par les usagers. Dans leur forme et leur fond, les outils de collecte et/ou de traitement des données de déplacements ont peu évolué depuis plusieurs décennies, alors que, dans le même temps, les pratiques de mobilité des personnes ont connu d'importants bouleversements socio-économiques (baisse généralisée des coûts de transport, évolution des marchés du logement et d'emploi, changements de modes de vie et de consommation, augmentation du travail le week-end, mise en place de l'ARTT, etc.). En particulier, on voit apparaître de nouveaux rythmes dans la conduite des activités quotidiennes et donc des déplacements, qui amènent d'une part, à l'échelle des journées, à un allongement des périodes de pointe et d'autre part, à l'échelle de la semaine, à des différenciations entre les journées. De plus, le contexte même dans lequel prennent place les

politiques de transport a lui aussi considérablement changé : en traversant le prisme du développement durable, les coûts environnementaux d'utilisation des ressources non renouvelables apparaissent et doivent être pris en compte. Enfin, pendant que de nouveaux modes et pratiques émergent (modes doux, véhicules en libre-service, véhicules partagés), les problématiques de l'intermodalité et de l'interconnexion des réseaux sont renouvelées. L'objectif central de ce chapitre est donc d'introduire la définition d'un déplacement que nous avons retenu après exploration de la littérature transport. En effet, le déplacement apparait comme une notion complexe en raison des différentes méthodes de le définir, de la prise en compte de la variété de facteurs qui influencent les choix individuels de ses attributs et des angles d'observation possibles pour décrire la mobilité.

Pour introduire cette notion essentielle au sujet que nous traitons dans cette thèse, nous divisons notre compréhension de la littérature transport dédiée à l'étude des mobilités en trois sections. Tous d'abord, nous introduirons le concept de mobilité, qui nous amènera à nous poser la question de la mesure des déplacements. Ainsi, dans une deuxième section, nous proposerons une définition d'un déplacement et de son utilité pour un usager. Cette définition provient de nos investigations dans la littérature dans la phase d'appropriation de l'objet à mesurer. Enfin, nous traiterons de l'évolution des pratiques de déplacements. La mise en relief des mutations de mobilité et de leurs pratiques alimente les besoins de métrologie.

1 Concept de mobilité

La mobilité est un besoin basique pour tous les résidents d'un territoire. Un réseau de transport permet de répondre à ce besoin. En effet, on peut observer une corrélation forte entre l'évolution des installations humaines et la proximité des équipements de transport. Il existe également une forte corrélation entre la qualité de la desserte des transports et le niveau de vie. Ceci peut s'expliquer par l'envergure des attentes liées au niveau d'équipement en transport. En d'autres termes, la solution aux problèmes du transport doit être rapide, garantir la sécurité des personnes et des biens transportés, être pratique, économique et écologique. (MATHEW, et al., 2006).

La mobilité est un concept qui peut se définir de différentes manières selon qu'elle soit observée par un géographe, un économiste, un sociologue, un opérateur de transport ou même un opérateur de télécommunications. La mobilité peut être individuelle, c'est-à-dire concernant un individu uniquement, ou collective en agrégeant l'ensemble des mobilités d'individus éventuellement regroupés en segment. Une telle agrégation permet notamment d'observer les rythmes d'un territoire et sera donc une base de travail pour les aménageurs. L'analyse de la mobilité à un niveau agrégé est souvent produite pour la gestion des flux de déplacements ou pour mesurer les impacts de leurs externalités. Néanmoins, afin de comprendre les phénomènes moteurs de la mobilité totale observée, commençons par une approche désagrégée. En effet, pour comprendre les dynamiques de la mobilité totale sur un territoire, il s'agit d'investiguer les mécanismes qui régissent les mobilités individuelles (CALABRESE, et al., 2006).

Nous décomposons cette section en deux parties. La première présente le concept de mobilité individuelle et la deuxième s'intéresser à la manière dont on peut évaluer la mobilité au travers d'indicateurs. Dans ce cadre nous préciserons la notion d'accessibilité comme mesure de l'offre de transport pour conclure sur les besoins d'observation de la demande.

1.1 **Concept de mobilité individuelle**

La mobilité individuelle est la possibilité et le fait, pour une personne, de se déplacer ou de déplacer une chose dans l'espace entre une origine et une destination, dans le temps avec une certaine vitesse, pour différents motifs de déplacement, avec différents modes et sur des réseaux adaptés à ces modes. On pourra parler de mobilité totale lorsque l'on considère la mobilité calculée sur l'ensemble des modes de déplacements pour l'ensemble des individus. Cependant, la réalisation d'activités, et donc la mobilité de chaque individu, est dépendante notamment de sa situation sociale, économique et démographique. Nous approfondirons ces points dans les paragraphes suivants.

Afin de comprendre le phénomène de mobilité dans son ensemble, nous aborderons brièvement l'aspect économique de la mobilité qui ne sera pas traité dans cette thèse orientée métrologie. Cependant cet aspect ne demeure pas moins sous-jacent à toute étude d'aménagement, elle-même basée sur une étude de la mobilité. En effet, lorsque les conditions générales de la mobilité s'améliorent, les personnes, les entreprises, les administrations peuvent reformuler leurs arbitrages spatiaux: des déplacements plus rapides permettront d'occuper un logement plus grand ou plus agréable, au prix d'un éloignement croissant des lieux d'activité, ou d'effectuer des activités sur des lieux plus éloignés du domicile. Certains commerces ou services peuvent réduire le maillage territorial de leur offre pour proposer en un même lieu une gamme plus étendue de produits (les multiplex) ou des produits moins chers (les hypermarchés). Les employeurs voient leurs bassins de recrutement potentiel étendus. De nombreux travaux d'économie géographique portent sur les liens entre conditions de la mobilité et évolution de l'attractivité des territoires au niveau du peuplement de celui-ci et des activités qu'il propose à différentes échelles, soit urbaine avec l'étalement urbain, soit nationale avec les liens entre tourisme et développement de territoires non métropolitains, soit à l'internationale avec le rôle des infrastructures pour l'attraction des investissements étrangers. Une branche de l'économie s'attache à mesurer les liens entre dotations en infrastructures et création de richesse. La branche de l'économie publique dédiée aux biens et aux services publics s'intéresse quant à elle à l'étude de la rentabilité socio-économique des infrastructures de transports, qui est différente de leur seule rentabilité financière pour l'opérateur, notamment du fait des gains de temps et des effets induits liés à l'usage de la nouvelle infrastructure ou du nouveau service. C'est le cas notamment lorsqu'on soulage une partie ancienne du réseau de la congestion qu'elle subissait, lorsqu'on désenclave un territoire que ce soient des quartiers déshérités en ville, des petites villes ou un milieu rural à l'écart des processus de métropolisation. On peut, à ce titre, citer l'exemple de l'impact sur

la ville de Reims de la Ligne Grande Vitesse (LGV) ouverte en 2007 qui dessert la gare de Champagnes-Ardennes TGV (BAZIN, et al., 2010).

Les conditions générales de la mobilité ne s'améliorent pas toujours, ou pas pour tous les moyens de transport. Elles peuvent aussi se dégrader. On pourra citer à titre d'exemple la baisse de moyens de subventionnement des réseaux de transports publics de la part des pouvoirs publics, ou encore des évolutions internes contradictoires du système (croissance de la congestion lorsque la demande croît plus vite que l'offre par exemple, croissance de l'insécurité). De plus, il arrive que des politiques de déplacements visent explicitement à restreindre l'usage de tel ou tel mode de transport, le plus souvent il s'agit de l'automobile pour des questions environnementales. Les économistes ont cherché à évaluer les coûts de tous ces effets. Ils parlent d'externalités lorsque ces coûts ne sont pas payés par les usagers des systèmes. Les coûts de ces effets externes sont internalisés sous forme de péages, de redevances ou des taxes pour que l'usager en supporte une partie. À une échelle plus locale, les politiques environnementales privilégient les modes considérés comme « doux » ou « vertueux » et cherchent à refaire de la rue un espace public convivial en décourageant l'usage de la voiture et des deux-roues motorisés. Elles peuvent chercher à influer directement sur la mobilité. Les leviers d'action sont en général un partage de la voirie, des subventions aux transports publics, une promotion de l'auto-partage, un contrôle du stationnement, des péages, des initiatives de journée sans voiture, etc. En résumé, on cherche à faire partager cette préoccupation directement avec des acteurs intermédiaires (plans de déplacements d'entreprise en France par exemple) ou plus indirectement, en cherchant à promouvoir la densité urbaine ou la « ville cohérente » pour éviter le développement de ces territoires à dépendance trop forte de l'automobile, effets de la périurbanisation. Les questions environnementales sont des sujets phares de la valorisation d'une mobilité durable.

1.2 **Evaluer la mobilité au travers d'indicateurs**

La mobilité est une notion observable au travers d'indicateurs. Il existe une quantité importante d'indicateurs constructibles selon les données d'observation disponibles et selon l'objet de l'observation, la précision, l'échelle et la périodicité de celles-ci. Ces indicateurs sont des outils permettant de représenter la mobilité et sur lesquels se basent les différents acteurs de l'offre de transport pour répondre à leurs problématiques respectives. Selon l'échelle temporelle, l'échelle spatiale, le caractère dynamique ou statique, la nature de la source de données et le degré d'information qu'elle contient, des indicateurs différents sont à construire. En effet, tous ont une fonctionnalité propre et font émerger certains phénomènes caractéristiques des déplacements de la population. Tout d'abord, les échelles spatiales et temporelles sont souvent corrélées. En effet, les observations sur une échelle temporelle large (plusieurs années) sont très souvent produites pour des échelles spatiales larges également. Citons par exemple, l'évolution de la fréquence des déplacements sur le territoire d'Ile-de-France depuis 10 ans. Les échelles spatiales reposent sur le découpage du territoire en zones jusqu'à l'unité d'individu. Le plus souvent, le découpage administratif (pays, région

département, etc.) est utilisé. Les échelles temporelles reposent sur le découpage du temps traditionnel.

On parle d'indicateurs statiques ou d'indicateurs dynamiques. Cette terminologie repose sur la méthode de collecte des données. Par exemple les enquêtes ménage-déplacement ou le recensement sont des méthodes de collectes statiques. Les méthodes de collecte dynamiques se font par le biais de capteurs technologiques car ils permettent une acquisition des mesures en temps réel. Le caractère dynamique des indicateurs est de plus en plus recherché pour des traitements en temps réel, pour augmenter la réactivé des opérateurs d'une part, et pour observer plus finement les mouvements de la population face à des événements inhabituels et ponctuels d'autre part. Une telle approche permet de mieux comprendre la dynamique des activités sur un territoire au travers de l'accès à la densité de population instantanée à différents moments de la journée, c'est-à-dire l'évolution journalière de l'effectif des territoires. Il est alors possible d'identifier des territoires prééminents. Un indicateur ressort pour décrire ces phénomènes : le taux de présence, calculé à chaque instant pour un territoire fixé comme le ratio entre le nombre de personnes présentes à cet instant sur ce territoire – sans tenir compte des personnes en déplacements - et le nombre de résidents. Ainsi, un territoire attractif aura un taux de présence globalement positif. Il est également possible et intéressant d'observer le taux de présence en un lieu en fonction du lieu d'origine, ainsi que la part du motif des déplacements selon les tranches horaires et le nombre de personnes en déplacement selon le moment de la journée.

Un indicateur permet une représentation de la mobilité sur un territoire, la visualisation des indicateurs est donc une partie primordiale. Cependant, ce travail de thèse est concentré sur la production d'indicateurs quantitatifs et non sur les différents procédés de géomatique qui constitueraient une poursuite de ce travail.

Dans ce paragraphe, nous présentons deux approches pour représenter la mobilité. Tout d'abord, avec pour seule connaissance l'offre de transport, la notion d'accessibilité potentielle permet d'évaluer le trafic d'une zone d'étude. Ensuite, nous nous interrogerons sur les inconvénients de cette approche par rapport à une mesure de la demande en transport. Quels indicateurs sont alors appropriés à une représentation de la mobilité ?

1.2.1 **La notion d'accessibilité**

Une première méthode pour représenter la mobilité sur un territoire est de mesurer le potentiel de mobilité offert par le réseau de transport. Tout comme la mobilité, l'accessibilité en transport est une notion complexe qui peut être vue sous différentes formes que l'on soit un économiste des transports, un géographe, un cartographe, ou encore un utilisateur du réseau de transport. Une première partie de la notion d'accessibilité se définit comme la possibilité pour tous, d'accéder aux systèmes de transport qui renvoie en partie à la question des personnes à mobilité réduite. La loi du 11 février 2005 impose que soit traitée l'intégralité de la chaîne du déplacement pour être effective d'ici 2015. Ainsi, la question de l'accessibilité est traitée de façon globale, en liant la question des transports avec celle de l'urbanisme et celle de la voirie. Il s'agit d'adapter l'espace et les lieux pour les rendre praticables par tous.

Le second sens que prend l'accessibilité renvoie aux conditions selon lesquelles les individus peuvent parcourir l'espace et atteindre les lieux. Nous traiterons ce point en s'appuyant sur l'ouvrage (BANOS, et al., 2010). L'accessibilité est alors un concept spatial qui vise à rendre compte de l'effort à consentir pour parcourir l'espace, afin d'atteindre un lieu qui abrite une ressource. C'est alors à la fois une notion de géographie et d'économie spatiale. La définition économique de l'accessibilité met l'accent sur la possibilité d'une interaction entre agents économiques dans les lieux que l'on cherche à atteindre (travail, achat, etc.).

Nous présentons donc la notion d'accessibilité selon l'angle de la distance à parcourir et selon le potentiel de déplacements réalisables qui découle de l'offre, afin de s'interroger sur la capacité de l'accessibilité à représenter la mobilité sur un territoire.

1.2.1.1 Une accessibilité « en distance »

Avant même de parler d'offre du réseau, l'accessibilité est une affaire de distance à parcourir entre le lieu d'origine et le lieu de destination. Cependant, quelle distance est à prendre en compte ? La distance euclidienne est la plus courte entre deux lieux mais elle ne tient pas compte de la topologie de la voirie. Cependant, la représentation de la distance topologique qui prend en compte la structure de la voirie avec ses attributs de longueurs, d'angle, de signalisation routière, etc., pose des problèmes de représentation cartographique.

Une accessibilité fonction de la qualité de la liaison et la distance entre un lieu i et un lieu j est à distinguer de l'efficacité d'un réseau de transport. En effet, l'efficacité mesure la durée du trajet réel10 effectué pour un mode donné, par rapport à la distance euclidienne entre l'origine et la destination. Une mesure des chemins de Delaunay permet de séparer dans la mesure de l'accessibilité des lieux ce qui relève de leur position géométrique de ce qui relève de l'inégale dotation en infrastructures de transport

Par ailleurs, certaines zones sont plus propices à attirer des déplacements que d'autres, on parle alors de centralités. Une représentation selon les centralités constitue une première approche intéressante car elle permet de rendre en compte des principaux pôles attracteurs d'une ville ou d'un territoire en se basant sur sa topologie et sa structure uniquement.

Néanmoins, la dimension capacitaire de l'accessibilité ne doit pas être exclue de l'étude, en effet, le fait de rejoindre un lieu rapidement doit être possible pour un grand nombre d'utilisateurs du réseau en même temps. Un exemple d'externalité liée à la forme et au fonctionnement des réseaux est l'étalement urbain. Celui-ci augmente la dépendance à la voiture, or l'efficacité du réseau augmente avec la portée, ainsi l'accessibilité n'est pas proportionnelle à la durée des trajets et l'automobile apparait comme une métrique accélérante.

1.2.1.2 L'accessibilité potentielle des lieux : une mesure de l'offre de transport

L'accessibilité peut également se définir comme un potentiel, celui de se rendre en un lieu, en un temps donné en utilisant un mode donné. Ainsi, le potentiel d'un lieu d'être accédé dépend avant tout de la manière dont ce lieu est desservi par le réseau de transport.

D'où la nécessité de connaitre l'offre de transport pour la mesure de la potentialité qu'un voyageur puisse atteindre son lieu de destination.

La mesure de l'accessibilité d'un lieu, à partir ou à destination d'un espace géographique considéré se fait principalement à l'aide de deux facteurs. Tout d'abord, un facteur lié à la géométrie de l'espace considéré, c'est à dire la position dans l'espace de référence qui fait qu'un lieu situé au centre sera toujours plus accessible qu'un lieu périphérique, indépendamment du réseau de transport. Deuxièmement, nous retrouvons la performance du réseau de transport qui dépend de la forme du réseau (création de directions privilégiées), et des performances selon la vitesse. Ainsi, dans le cas des milieux urbains, l'accessibilité potentielle au réseau de transport urbain repose sur l'hypothèse que la qualité de la desserte d'un territoire est variable en fonction du mode de déplacement, à une heure donnée. Elle permet de repérer les inégalités d'accès. Pour mettre ces disparités en évidence, on peut, par exemple, confronter l'accessibilité offerte par les transports en commun par rapport à celle offerte par l'automobile. Pour ce faire, le ratio des accessibilités globales des deux modes à comparer est produit puis tracé sur une carte afin de faire ressortir les distorsions pour les deux modes.

Par définition, l'accessibilité est la possibilité d'atteindre un lieu dans le but d'y effectuer une activité. Ainsi, il est possible de qualifier de coût, l'effort qui traduit la distance à parcourir. La limite du meilleur temps est l'un des facteurs principaux du choix des trajets. Ainsi, il est intéressant de parler de l'accessibilité horaire qui se définit de la manière suivante : c'est l'heure d'arrivée à tout lieu de l'espace à partir d'un lieu de départ pour une heure de départ fixée. Ainsi l'accessibilité se mesure différemment selon le mode utilisé. Dans le cas d'un déplacement en automobile, celle-ci se définit comme la minimisation des distances, la distance-temps, entre une localisation spécifique i et un lieu donné j au moyen d'un véhicule privé en empruntant un itinéraire libre. Dans le cas de l'accessibilité en transport en commun, l'itinéraire emprunté et imposé est celui qui permet la minimisation de la distance-temps dans le cadre d'un fonctionnement régulier des lignes du réseau. Il faut ensuite compléter ces définitions par l'aspect spatio-temporel. Sur un plan spatial, tout d'abord, il s'agit de prendre en compte tous les lieux susceptibles de générer du trafic ; ce sont les lieux attracteurs et générateurs. D'un point de vue temporel, toutes les échelles peuvent être considérées, bien que généralement l'échelle d'une journée soit retenue.

L'analyse de l'accessibilité nécessite de décomposer toute la chaîne de déplacement, comme on peut le au travers d'un exemple illustré sur la Figure 5.

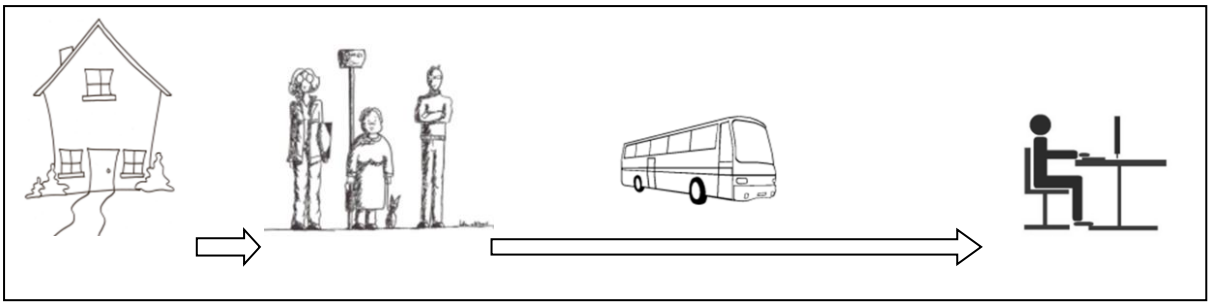


Figure 5: schéma des composantes d'un exemple d'une chaîne domicile-travail

Lorsque plusieurs modes sont empruntés lors d'un même trajet, on parle d'accessibilité intermodale. Le calcul du potentiel d'accessibilité pour cette chaîne s'exprime en temps et est la somme du temps nécessaire à chaque étape, en prenant en compte les temps d'attente. Dans notre exemple, c'est la somme du temps de marche jusqu'à l'arrêt, du temps d'attente à l'arrêt, du temps de voyage en bus et le temps de marche jusqu'au lieu de travail. Le potentiel d'accessibilité permet de synthétiser cette mesure à travers une opération d'agrégation. Celle-ci se fait au travers du calcul de l'accessibilité généralisée qui est le temps d'accès moyen d'un lieu à toutes les destinations potentielles du territoire étudié, ou plus particulièrement des stations de TC dans le cas d'utilisation des transports en commun. Ces calculs permettent de produire des cartes isolignes faisant apparaitre des zones de « bonne accessibilité ». Si l'automobile est le seul mode utilisé le long de la chaîne de déplacement, le potentiel d'accessibilité est alors le temps de trajet dans son véhicule, l'indicateur d'accessibilité globale est calculé en moyennant les temps de transport en automobile de chaque résidence à chaque lieu de destination dont on veut mesurer l'accessibilité. La Figure 6 est un exemple de carte isoligne de potentiel d'accessibilité réalisée par Cyrille Genre-Grandpierre pour déterminer la qualité de l'offre et usage du transport public en milieu urbain de la ville de Besançon (GENRE-GRANDPIERRE, 2010).

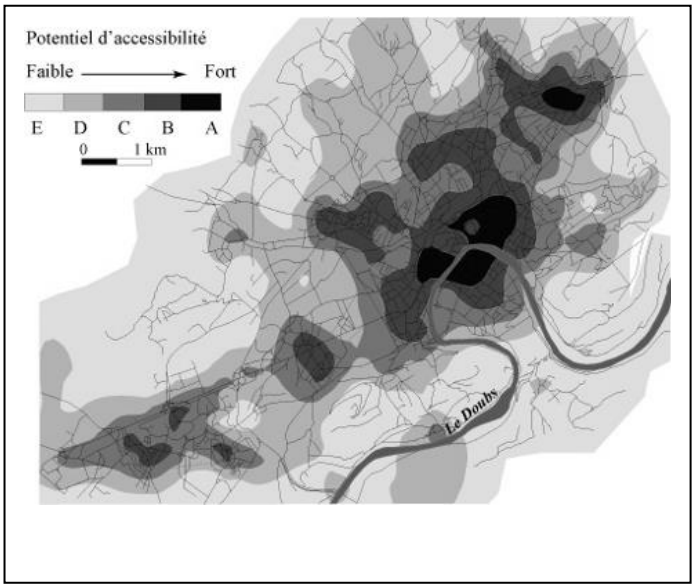


Figure 6 : carte du potentiel d'accessibilité de la ville de Besançon (BANOS, et al., 2010)

Cependant, cette notion d'accessibilité exprime surtout les possibilités de réception des lieux. Il parait alors intéressant de compléter cette mesure par celle d'un potentiel urbain qui tient compte du nombre d'établissements d'un centre i dans une catégorie de services j ainsi que du niveau de rareté du type d'établissement. L'accessibilité intermodale qui intervient lorsqu'au moins deux modes de transport sont utilisés pour un même trajet va soulever le problème des correspondances entre les différents modes de transport utilisés.

L'accessibilité est un outil privilégié pour la mesure de performance territoriale des réseaux de transport. Ainsi, en agissant sur les variables temporelles (fréquence régularité, vitesse) en fonction de la demande fondée sur les lieux attracteurs, les segments de clientèle et les contraintes de temporalité, il est possible de cerner les flux massifiés et les domaines de pertinence des transports en commun. Pour certaines études, notamment des études qui favorisent la multimodalité, par exemple l'implantation d'un tram-train, une connaissance de l'accessibilité multimodale peut se révéler intéressante car elle permet une comparaison entre des chaînes modales différentes et permet un report modal d'un type de chaîne.

1.2.1.3 Les mesures d'accessibilité représentent-elles la réalité du trafic ?

La mesure de l'accessibilité présentée dans ce paragraphe est une mesure statique, or l'accessibilité évolue au cours d'une journée. En effet, la vitesse commerciale n'est pas la même en heure de pointe ou en heure creuse à cause des phénomènes de congestion. D'autres événements sporadiques peuvent générer la congestion comme des accidents de circulation, des intempéries, des travaux de voirie ou encore des mouvements sociaux. Cela peut modifier l'accessibilité potentielle mesurée au préalable. Le caractère accidentogène d'une voie de circulation est une donnée quantifiable à l'aide de la topologie de la voie, cependant la vigilance des usagers ne l'est pas. De plus, la dimension capacitaire des réseaux n'est pas vraiment prise en compte dans ce type d'études sur l'accessibilité, ou alors juste de manière qualitative. Bien que des modèles d'écoulement de flux puissent aider à reproduire des conditions de circulation de trafic, une méthode basée sur une accessibilité statique ne prédit pas le nombre exact de véhicules qui seront présents sur une route à une heure donnée. Dès lors, l'accessibilité potentielle ne reflète pas toujours la réalité par son caractère statique. Les mesures d'accessibilité potentielle peuvent être validées par des mesures d'accessibilité sur le terrain. Ces dernières reposent sur une observation de la mobilité. Or, la vitesse de circulation est une grandeur observable. Il est donc possible d'évaluer le niveau de congestion et ainsi le temps de parcours en temps réel, pour un lieu précis. Alors, une approche dynamique permettrait une meilleure représentation de l'évolution de l'accessibilité d'un territoire au cours d'une journée et donc une gestion du trafic mieux adaptée car plus proche de la réalité.

1.2.2 Observer la demande : un besoin évident

Afin de proposer une offre adaptée à la demande présente et future, les différents acteurs des transports doivent qualifier cette offre. Les mesures d'accessibilité proposent une méthode de conceptualisation de la manière dont l'offre peut être perçue par différentes parties dont les usagers. Une mesure seule de l'offre suffit-elle pour rendre compte de la perception de l'offre par les usagers ?

Tout d'abord, le réseau de transport est un système dynamique et complexe auquel les usagers doivent s'adapter. En effet, de manière simplifiée un réseau de transport est diversifié par les aspects suivants :

- Multiples modes : tous les modes de transport dans les airs, sur terre et sur eaux pour les personnes et le fret

- Multiples secteurs : compromis entre les problématiques et les points de vue des institutions d'état, des industries publiques et privées.
- Multiples problématiques : politiques nationales et internationales, planification des systèmes régionaux, choix de l'emplacement et la conception d'équipements spécifiques, logistique de transports de biens, régulation, politiques institutionnelles et financières.
- Multiples objectifs : développement économique régional et national, développement urbain, préserver l'environnement, qualité social, service à l'usager et faisabilité financière et économique
- Multiples disciplines : théorie et méthodes d'ingénierie, économiques, de recherches opérationnelles, de science politiques, de psychologie, de sciences naturelles, de sciences sociales, et juridiques (MATHEW, et al., 2006).

Devant cette complexité, les usagers des systèmes de transport font face à des choix multiples. Les mécanismes de décisions seront différents d'un individu à l'autre. Dès lors, des indicateurs dérivés de l'offre seule ne semblent pas suffisants. En effet, des indicateurs basés sur la mesure de la demande actuelle montrent des rythmes d'évolution variés. On observe que certains indicateurs de mobilité ont une variation très faible depuis quelques années comme par exemple la part des personnes qui se déplacent un jour donné dans la population par tranche d'âge (LE JEANNIC, 2010). D'autres au contraire ont une forte variation à des échelles temporelles faibles. De plus, la stagnation de certains indicateurs, lorsqu'ils sont moyennés, peut cacher des fluctuations importantes à un niveau plus désagrégé. Par exemple, en milieu urbain, le nombre de déplacements quotidiens moyen évolue peu mais les caractéristiques de la mobilité évoluent rapidement (LE JEANNIC, 2010). On peut l'observer sur le Tableau 1.

Années	1982	1994	2008	Variation entre 1982 et 2008
Nombre de déplacements quotidiens par personne	3,34	3,16	3,15	-2,9%
Temps quotidien passé en déplacement par personne (en min)	54,8	54,7	56,3	+1,4%
Distance quotidienne parcourue par personne (en km)	17,4	23,1	25,2	+18,3%
Durée moyenne d'un déplacement (en min)	16,4	17,3	17,9	+4,4%

Tableau 1: évolution des déplacements locaux (moyenne jour ouvrable de semaine). Synthèse des Enquêtes Nationales Transport de 1982, 1994 et 2008 par (LE JEANNIC, 2010)

Pour illustrer la complexité de ces mécanismes et la nécessité d'accéder à d'indicateurs de nature différente, nous prendrons l'exemple des déplacements en véhicule privé. En effet, le nombre de déplacements en véhicule privé progresse de façon continue. Ceci résulte de multiples facteurs conjugués. Tout d'abord la motorisation a évolué de façon quasi linéaire entre 1950 et 1985. L'asymptote de la motorisation ne semble pas encore atteinte. Le lien entre la motorisation et la mobilité en véhicule privé semble indéniable. A supposer que le taux de motorisation soit le seul facteur explicatif de cette mobilité, l'estimation de la mobilité en véhicule privé devrait suivre la croissance de la motorisation. Ce qui induirait des besoins d'investissements considérables pour répondre à la demande en infrastructures routières. Or, comme le montre la figure, ce n'est pas le cas. En effet, la Figure 7 montre qu'entre 1994 et 2008 la part de la voiture particulière pour les déplacements locaux est stable à l'échelle de la France, or pendant cette même période le taux d'équipement en véhicule privé des ménages français est en croissance (Figure 8)

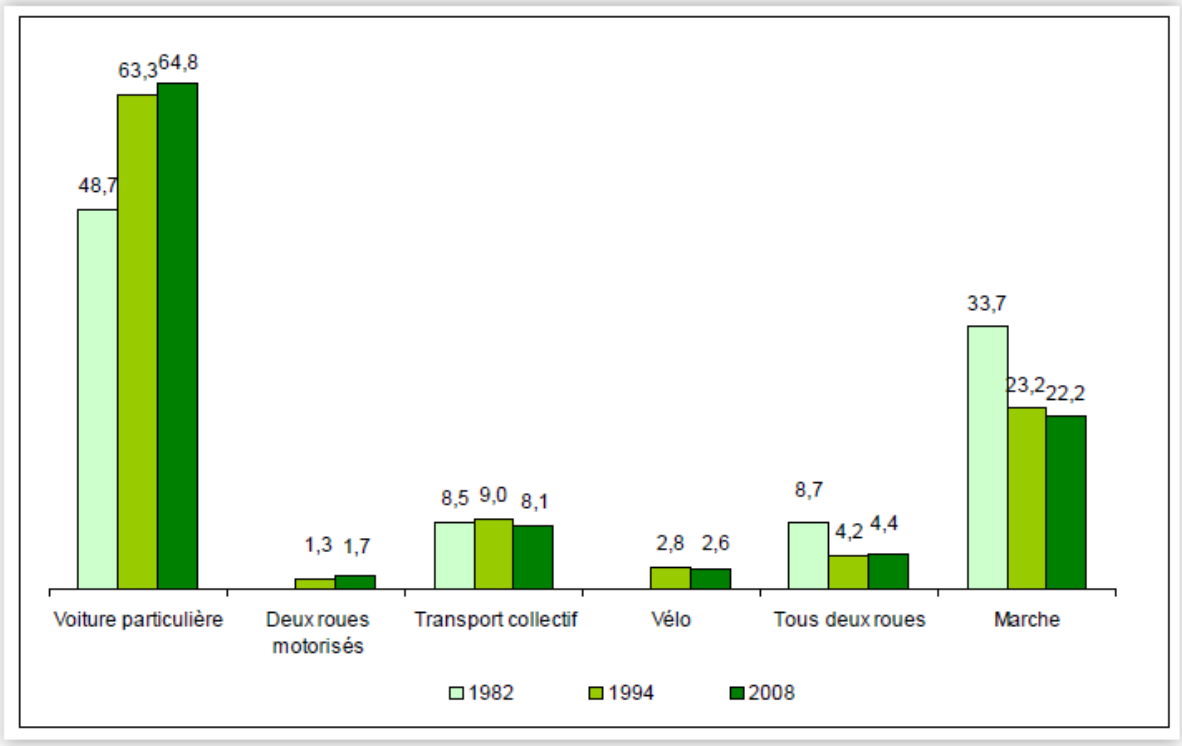


Figure 7: évolution de la répartition des déplacements locaux selon les modes de transport. Synthèse des Enquêtes Nationales Transport de 1982, 1994 et 2008 par (LE JEANNIC, 2010)

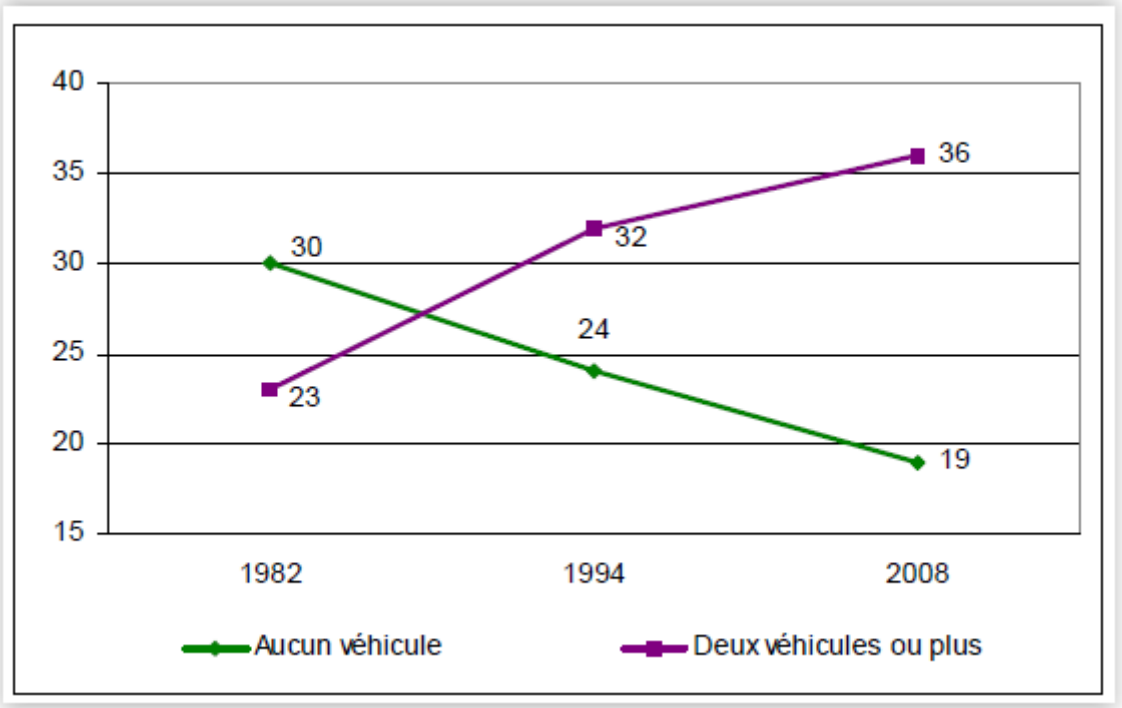


Figure 8: équipement automobile des ménages de 1982 à 2008. Synthèse des Enquêtes Nationales Transport de 1982, 1994 et 2008 par (LE JEANNIC, 2010)

Ainsi, d'autres facteurs explicatifs sont à prendre en compte dans l'analyse de la mobilité en véhicule privé et ce sont ces derniers qui permettront de mettre en lumière des inflexions de tendances qui sont susceptibles de modifier la demande à plus ou moins long terme (BONNEL, 2004). Donc, comprendre et agir sur la mobilité est à la fois compliqué pour les acteurs de l'offre et de la demande.

Un indicateur simple pour représenter la mobilité d'un territoire est le nombre de déplacements réalisés. Il s'agit d'une mesure de la demande. Selon les besoins d'étude ou de recherche, des définitions différentes des indicateurs sont adoptées. Le plus couramment dans les analyses de mobilité, elle est décrite par le nombre de déplacements réalisés par jour et par personne. Tous les déplacements sont considérés, y compris la marche et autre mode doux. Un déplacement individuel est considéré comme un ensemble d'attributs tels que le lieu d'origine, le lieu de destination, l'horaire de départ, le mode, etc. Cependant, l'objet « déplacement » n'est plus seulement un moyen de se déplacer, mais un moyen de réaliser des activités dans des lieux variés (BONNEL, 2004). Alors la mobilité peut-elle être analysée seulement au travers d'un nombre de déplacements ? La réalité de l'usage des réseaux de transport s'est complexifiée. En effet, un planificateur urbain peut-il considérer un déplacement à pied sur une courte distance comme étant le même objet qu'un déplacement entre un centre-ville et une banlieue réalisé en automobile ?

1.3 Conclusion

Le concept de mobilité est une notion complexe qui est approchée de manière différente selon les acteurs du transport. Néanmoins, le besoin de connaissance de la mobilité est le dénominateur commun à tous les acteurs de l'offre de transport. En effet, ces derniers ont pour vocation d'estimer les évolutions de la demande de transport afin de planifier l'offre future au travers d'une représentation de l'offre actuelle et de la manière dont elle pratiquée par les usagers qui créent la demande de mobilité. Selon les acteurs, les échelles temporelles et spatiales varient. Les exploitants vont se concentrer sur le mode qu'ils opèrent sur une zone du territoire donné, alors que des planificateurs doivent prendre en compte un ensemble de modes sur des territoires plus étendus ainsi que les impacts du transport sur ce territoire. Dans cette thèse, nous approchons la mobilité de manière quantitative sous forme de mesure de déplacements. Ces mesures sont construites afin de répondre aux besoins d'ordre quantitatifs des différents acteurs des transports. D'une part, les acteurs de l'offre se basent sur des modèles afin d'estimer la demande, d'analyser l'impact de certains facteurs sur les déplacements ou d'observer en temps réel l'écoulement des flux de voyageurs pour agir rapidement en cas de congestion localisée dans l'espace et dans le temps. Et d'autre part, pour optimiser leur schéma de déplacement, les usagers ont besoin d'information sur l'offre disponible ainsi que l'état du réseau à un moment donné. Ainsi, nous nous devons de définir ce qu'est un déplacement dans le domaine des transports et comprendre les facteurs qui l'influencent.

2 Qu'est-ce qu'un déplacement ?

Nous abordons ici la notion centrale de notre travail, puisque nous introduisons l'objet que nous cherchons à mesurer à partir d'une source de données collectée dans les réseaux de télécommunications : le déplacement des personnes. Nous construisons cette section en trois parties. L'entame se fait par la présentation des différentes facettes d'un déplacement que nous empruntons à (LEURENT, 2006). Ces facettes multiples rendent compte de la complexité de l'objet déplacement. Ensuite, nous exposerons la définition d'un déplacement que nous avons retenu, parmi celles disponibles dans la littérature. Cette définition comporte également celle des attributs que l'on associe à cet objet. Alors, la dernière section traite des influences exercées sur les attributs d'un déplacement.

2.1 Les différentes facettes d'un déplacement

Par nature, un déplacement est une action multi-facettes. La facette la plus importante est l'aspect **causal** d'un déplacement car elle permet au déplacement d'être généré. En effet, sans motivation à se déplacer, un individu reste immobile. Par nature, un déplacement est motivé par un besoin, celui d'effectuer une activité dans un autre lieu que celui où l'on se trouve. La nature de l'activité peut-être d'ordre « obligatoire » comme la nécessité de se rendre à son lieu de travail ou d'étude, ou alors de l'ordre du « loisir ».

Le besoin de se déplacer étant motivé, une demande de moyens est amorcée. Il s'agit de la facette **physique** d'un déplacement qui concerne une entité matérielle avec certaines propriétés physiques de dimensions (taille, extension, volume), de masse et de besoins spécifiques (confort pour les voyageurs), deux lieux: l'origine et la destination, ainsi que l'espace intermédiaire à franchir et enfin des circonstances temporelles : une date de disponibilité au départ, créneau cible pour l'arrivée, période de circulation.

Comme tout service à un demandeur par un offreur, un déplacement présente une facette **économique** sous forme de coût généralisé. La notion de « coût généralisé » est introduite pour prendre en compte les coûts du déplacement incluant le coût subi ou perçu par l'usager du transport (le temps passé à se déplacer et la pénibilité) au même titre que les coûts effectifs (prix du carburant, prix du titre de transport, …). Cette notion de coût peut s'exprimer dans différentes unités : monétaires, temporelles, etc. Elle représente un coût impacté à l'usager lors de son déplacement. Cette notion intervient dans les processus de choix d'itinéraires. On introduit alors la notion d'utilité d'un itinéraire par rapport à un autre. Un itinéraire ayant la plus grande utilité pour l'usager, c'est-à-dire le coût le plus bas, sera privilégié.

Enfin, une population vivant sur un territoire est porteuse d'une culture qui conditionne ses besoins, ses habitudes, ses perceptions et son comportement. Les aspects **sociaux** et les formes culturelles déterminent d'abord les activités humaines et donc les besoins de déplacement. L'organisation sociale influence aussi la répartition spatiale des activités, les formes d'habitat et d'établissements de diverses natures. Cela détermine les distances à franchir pour mener certaines activités et entretenir des relations. Les possibilités matérielles sont liées au développement économique et social, à la performance des réseaux ; ce niveau d'offre correspond à une capacité de financement par la collectivité et par les consommateurs, donc aux revenus des demandeurs. Par ailleurs, les revenus conditionnent l'équipement privé en moyens de transport. Les croyances sociales en certaines valeurs, le regard social porté par la société sur les pratiques d'un individu, déterminent également les possibilités « morales de choix ». En effet, dans une très grande agglomération, il est banal que les actifs travaillent loin de leur domicile avec des temps de transport élevé, en moyenne les franciliens font des trajets domicile-travail de 34 minutes (CAENEN, et al., 2001). De manière plus culturelle, certaines sociétés considèrent plus positivement les partages de moyens de transport par l'usage de transports collectifs, la mise en place de covoiturage ou la pratique de « modes doux » appelés aussi modes actifs. On remarquera par exemple un enthousiasme plus marqué des hollandais pour le vélo par rapport aux habitants de pays voisins, comme la Belgique, dont la géographie et les conditions météorologiques sont semblables. La part modale des vélos pour l'ensemble des déplacements mesurés dans les pays concernés est représentée sur la Figure 9.

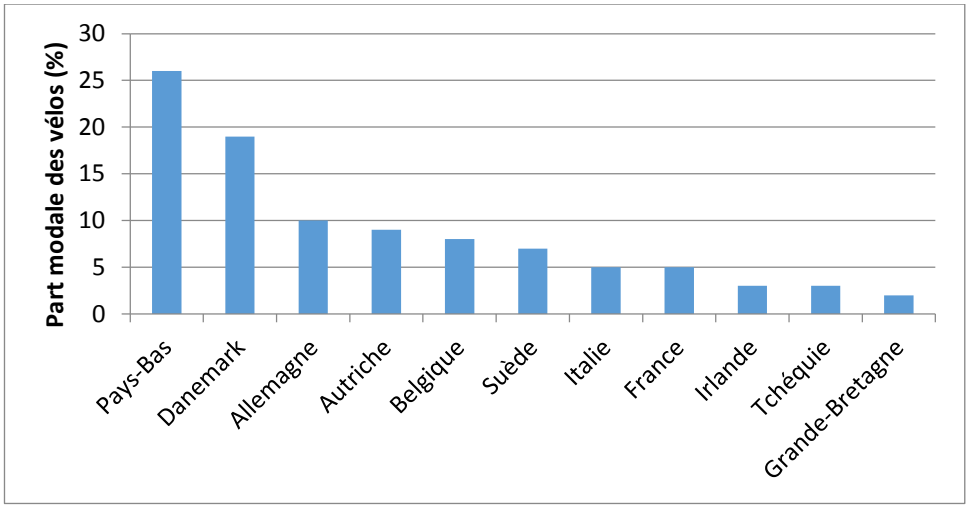


Figure 9: part des vélos dans les modes de déplacement dans plusieurs pays d'Europe (MINISTERIE VAN VERKEER, 2006)

Des phénomènes psychologiques sont également à l'œuvre dans le comportement de choix notamment en terme d'habitudes comportementales. En effet, un individu tend à reproduire des situations analogues, même si d'autres options sont accessibles.

2.2 Définition adoptée pour un déplacement

Dans la suite, nous poserons la définition d'un déplacement telle qu'elle apparait dans la méthodologie d'enquête des déplacements du CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) (ENQUETE MENAGES DEPLACEMENTS, mai 2008). Nous avons choisi cette définition car elle est standardisée et permettra alors d'une part d'alimenter des modèles existants basés sur cette définition et d'autre part de valider les résultats produits. Ainsi, un déplacement est une unité mesurable définie comme l'action de se rendre d'un lieu **d'origine** vers un lieu de **destination** dans le but d'y effectuer une activité (**motif**), en utilisant un ou plusieurs **modes de transport** sur un ou plusieurs axes de transport induisant **un temps de trajet** qui est la différence entre l'horaire d'arrivée à destination et l'horaire de départ. Cette définition constitue une grandeur quantifiable en temps et en distance.

Dès lors, les caractéristiques d'un déplacement sont définies par les paramètres suivants :

- ***Paramètre causal*** : un seul motif par déplacement.
- ***Paramètres spatiaux*** : un lieu d'origine et un lieu de destination
- ***Paramètres temporels*** : une heure de départ et une heure d'arrivée
- ***Paramètres d'offre de transport*** : l'itinéraire sous la forme du ou des modes de transports, le sens de parcours du ou des axes de transport

Ainsi, les différentes facettes d'un déplacement sont autant de facteurs de décision pour fixer les multiples **attributs d'un déplacement** (l'origine, la destination, l'heure de départ, le mode, l'itinéraire etc.). Nous nous interrogeons alors sur la nature des phénomènes qui influencent les différents paramètres d'un déplacement.

2.3 Fixer les attributs d'un déplacement

L'ensemble de choix des attributs d'un déplacement est un ensemble fini. Fixer ces attributs se décompose de manière simplifiée en deux étapes. Premièrement, des phénomènes extérieurs et/ou collectifs diminuent le cardinal des possibles pour chaque attribut. Deuxièmement, l'individu, en fonction de ses caractéristiques individuelles fixe les paramètres de son déplacement en choisissant parmi les possibilités restantes à l'issu de la première étape.

2.3.1 Influence des conditions externes au déplacement sur les attributs d'un déplacement

Le transport s'inscrit dans une réalité économique globale. En effet, la précarisation croissante ou le renchérissement du coût monétaire des déplacements fragilise le système des déplacements. Cette fragilité s'inscrit dans le territoire en renforçant les inégalités socio-spatiales, notamment à l'échelle des aires urbaines. De plus, la prise de conscience citoyenne relative aux considérations environnementales est en balance avec les arbitrages liés au pouvoir d'achat et aux modes de vie. On remarque dans la dernière décennie, un besoin de prise en compte individualisée des situations de la part des usagers envers l'action publique, alors même que les mobilités tendent à l'homogénéisation (CERTU, février 2012). En effet, l'évolution du système des déplacements est fortement liée aux variations de population, aux changements des modes de vie, des temporalités et aux transformations des formes urbaines. Le vieillissement de la population, par exemple, pourrait se traduire par une facilitation des conditions de déplacements, c'est-à-dire une atténuation des heures de pointe à cause de la moindre mobilité quotidienne des personnes âgées. Inversement, d'autres facteurs peuvent jouer en sens inverse comme la réduction du temps de travail et l'augmentation de la pratique d'une activité professionnelle par les femmes. Par ailleurs, les migrations résidentielles sont un puissant facteur de variation des distances quotidiennes. L'éloignement du centre et une faible densité en emplois dans les zones périphériques résidentielles impliquent un accroissement des distances de déplacements motivés par le travail. En effet, un individu est amené à se déplacer sur un territoire soumis à des conditions d'opérations. Ainsi, la localisation des lieux où se situent l'espace des activités qu'un individu pratique ainsi que la desserte de ses lieux réduit la taille de l'ensemble des itinéraires.

De plus, divers facteurs externes entrent en considération dans la dégradation des conditions de déplacements. Premièrement, les réseaux de transport sont sensibles aux conditions météorologiques. Cette sensibilité est nuancée selon le mode. D'une part, elles peuvent accroître la pénibilité de certains modes, comme les modes doux, et d'autre part, elles peuvent être responsables de perturbations plus ou moins fortes sur la desserte.

Néanmoins, les intempéries paralysant le réseau sont plutôt sporadiques. C'est également le cas d'un deuxième facteur de dégradation qui englobe les mouvements sociaux. Troisièmement, certaines procédures de maintenance viennent perturber le trafic à des fréquences diverses et sont plus ou moins impactantes selon les modes considérés. Des itinéraires de substitution sont souvent proposés. En résumé, ces facteurs extérieurs impactent les conditions de trafic. Néanmoins, les conditions du trafic dépendent au quotidien de l'équilibre entre l'offre et la demande. Ainsi, lors des « heures de pointe », la circulation sur le réseau de transport est ralentie en raison du nombre de déplacements demandés en simultané. Ce phénomène impacte le choix d'horaire de départ et/ou l'itinéraire. Tous ces facteurs peuvent être connus par l'usager au moment de son choix, soit par un apprentissage des conditions de trafic, soit par de l'information extérieure (par les opérateurs de transport, les médias, etc.). Elles peuvent également ne pas être connues par l'usager qui suivra alors soit un trajet habituel, soit les directives signalétiques, soit tout simplement les autres usagers. A tout instant de son déplacement, un usager va chercher à maximiser « l'utilité » de son trajet en optimisant chacun des paramètres du déplacement et leurs interrelations. Cependant, ce schéma d'optimisation se base sur des contraintes extérieures, mais surtout les contraintes individuelles. Nous verrons plus en détail la notion d'utilité dans le chapitre suivant.

2.3.2 **Impact des caractéristiques individuelles sur les attributs d'un déplacement**

Afin d'illustrer l'impact des caractéristiques individuelles sur les attributs d'un déplacement, nous emprunterons des exemples tirés des cahiers de l'Enquête Globale des Transports réalisées en Ile-de-France. Toutes les tendances et distributions ne sont pas transposables à d'autres agglomérations. Ces exemples n'ont pas vocation à généraliser les pratiques de mobilité, mais à montrer les facteurs qui influencent le choix des attributs.

Pour commencer, tout déplacement est contraint par le besoin de réaliser une activité qui dépend de caractéristiques et d'aspirations propres à l'individu. Ce besoin de réaliser une activité, fixe un cadre spatio-temporel au déplacement. Ainsi, le motif de déplacement est un élément central de la compréhension des mécanismes de mobilité. Il apparait alors primordial de mesurer l'importance d'une activité par rapport à une autre, afin de produire une classification adaptée à l'observation des déplacements puis à la modélisation des schémas de mobilité pour anticiper les mouvements futurs. A titre d'exemple, on peut juger de l'importance relative des différentes activités en observant trois angles d'approche (COUREL, et al., Avril 2005) :

- Le nombre de déplacements
- Le kilométrage total parcouru qui permet de mieux rendre compte de l'usage des infrastructures, de la consommation d'énergie ou de la pollution engendrées par les déplacements. Il sert alors d'indicateur de trafic. C'est également une manière d'approcher la dépense que les ménages ou la collectivité dans son ensemble doivent consacrer aux déplacements

- Le temps global passé à se déplacer qui est au plus proche de ce qu'appréhendent les individus qui raisonnent plus sur le temps qu'ils consacrent à se déplacer que sur le nombre de déplacements effectués.

Les trois indicateurs de nombre de déplacements quotidiens, de distance totale parcourus sur le total des déplacements effectués et de durée totale consacrée à ces déplacements, présentés sur la Figure 10 donnent une distribution nettement différente par type d'activité. Ceci illustre l'influence du motif de déplacement sur les paramètres de ce dernier.

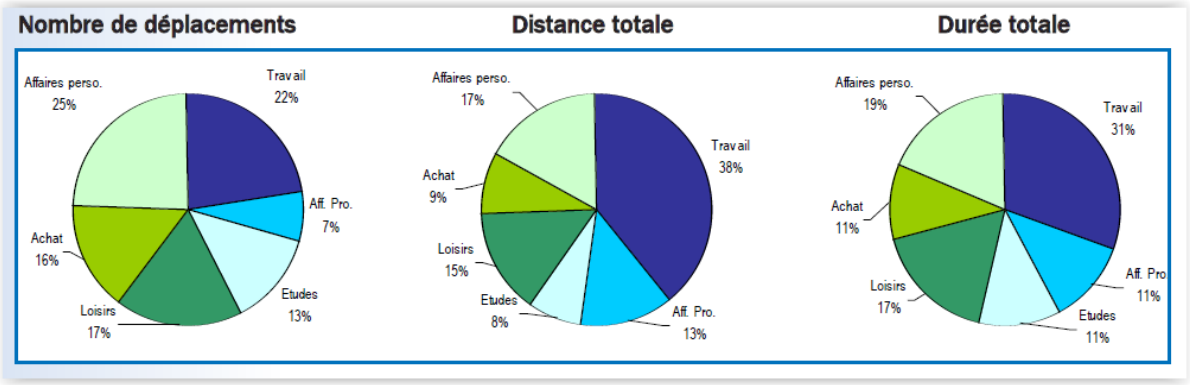


Figure 10: trois approches pour juger de l'importance relative des activités (COUREL, et al., Avril 2005)

Ensuite, des caractéristiques individuelles telles que l'âge, le sexe, la catégorie socioprofessionnelle, la structure du ménage, sont autant de facteurs qui contraignent le choix des attributs du déplacement. Chacune des caractéristiques individuelles influencent les attributs de déplacements à des degrés différents.

Premièrement, la mobilité des hommes a pendant longtemps été plus forte que celle des femmes mais cet écart s'est progressivement réduit, résultat de la participation accrue des femmes au marché du travail. Les femmes auraient tendance à faire légèrement plus de déplacements quotidiens. Les motifs travail et affaires professionnelles généreraient plus de déplacements chez les hommes que chez les femmes. Le phénomène inverse se produit pour les motifs achat et affaires personnelles. Cependant, pour les motifs études et loisirs, les hommes et les femmes génèrent un même nombre de déplacement. De manière générale, les hommes ont plus tendance à utiliser la voiture que les femmes, alors que ces dernières pratiquent plus la marche ou les transports en commun. Toutefois, ces dernières années, les femmes ont tendance à favoriser la voiture à la marche à pied. Il n'en demeure pas moins une tendance à l'uniformisation des pratiques de déplacement selon le sexe en Ile de France (COUREL, et al., Avril 2005) .

Deuxièmement, les couples avec enfants et les familles monoparentales effectuent en moyenne davantage de déplacements que les personnes seules ou les couples sans enfant. La présence d'enfants âgés de moins de 10 ans, et donc ne se déplaçant pas seuls, augmente le

nombre de déplacements. Les ménages monoparentaux effectuent plus de déplacement que les couples car le partage des déplacements pour motifs familiaux peut être envisagé avec plus de simplicité (COUREL, et al., Avril 2005).

Troisièmement, la mobilité individuelle reste étroitement liée au cycle de vie. Elle croît à l'adolescence, atteint un sommet vers l'âge de 30-39 ans et diminue progressivement avec le vieillissement. Bien que ce constat soit stable dans le temps, les comportements ont cependant évolué. La mobilité moyenne des jeunes a diminué en 25 ans. L'augmentation du nombre d'étudiants, du fait de l'allongement de la scolarité et de chômeurs à ces âges contribue également, mais de façon moindre, à réduire les déplacements. En effet, la mobilité individuelle de ces deux catégories est plus faible que celle des actifs ayant un emploi. En 2001, la classe d'âge qui effectue le plus grand nombre de déplacements en Ile de France est celle les 25-54 ans, suivie des 55-64 ans. Il est toutefois difficile au vu de ces seuls résultats de cerner qu'elle est la part respective des effets d'âge et des effets générationnels dans ces évolutions. De plus, les moments des déplacements et la fréquence varient avec la gamme d'âge. En effet, les séniors et les inactifs se déplacent majoritairement entre les pointes, a contrario des autres classes d'âge. De la même manière, la sortie de la vie active se traduit par un fort ralentissement de la mobilité : les déplacements liés au travail ne sont que partiellement compensés par d'autres activités. L'âge influe également sur le choix du mode de transport. En effet, en Ile-de-France, les 15-24 ans effectuent majoritairement leur déplacement en transport en commun, tandis que les 35-54 ans préfèrent la voiture particulière (COUREL, et al., Avril 2005).

Dernièrement, la proportion de personnes peu mobiles est plus forte pour celles n'ayant pas atteint un niveau d'études supérieures. Être travailleur indépendant ou femme au foyer prédispose également à moins se déplacer. Pour ces catégories, le constat peut paraître contradictoire avec la forte mobilité par ailleurs observée. La proportion de femmes sédentaires s'est considérablement réduite en 25 ans. Les personnes qui occupent un emploi se déplacent davantage, puisqu' aux mouvements de motif professionnel s'ajoutent les loisirs et les achats. En 2001, la mobilité individuelle moyenne était de 3,8 déplacements par jour pour un actif en emploi, 3,6 pour un chômeur, 2,9 pour un retraité. En 25 ans, elle est restée relativement stable pour ces différents statuts, hormis celle des retraités qui a augmenté significativement. Celle des cadres a légèrement augmenté en 25 ans pour devenir comparable à celle des ouvriers qui est restée stable sur la même période. La disponibilité de temps libre induite par le temps partiel favorise une plus grande mobilité. Ainsi, les personnes travaillant à temps partiel se déplacent en 2001 plus que celles exerçant à temps plein. De manière générale, les actifs se déplacent en majorité aux heures de pointe du matin et du soir. Le trafic de soirée s'est particulièrement accru chez les actifs. Mais d'autres catégories comme les étudiants ou les mères au foyer voyagent également durant ces tranches horaires de manière significative. Ceci a eu pour effet d'allonger les périodes dites « de pointe ». Pendant, les heures creuses, les inactifs sont la population la plus présente. Quant au temps de trajet domicile/travail, la catégorie des cadres est celle qui accepte un temps de trajet le plus long. Actifs et étudiants sont surreprésentés parmi les utilisateurs des transports collectifs. L'utilisation des transports collectifs est indépendante du niveau de l'emploi tenu. On peut

d'ailleurs noter que la proportion de Franciliens utilisateurs des transports collectifs est la même quelles que soient les classes de revenu des ménages. De la même manière que pour les mobilités par sexe et par âge, la tendance générale est à la convergence des mobilités par catégorie sociale vers la moyenne générale (COUREL, et al., Avril 2005).

Néanmoins, la catégorie socio-professionnelle influe sur le lieu de résidence et le taux de motorisation. Il s'agit alors d'une influence indirecte sur les paramètres du déplacement. En effet, habiter Paris intra-muros permet de bénéficier d'infrastructures de transport importantes réduisant ainsi la proportion de sédentaires. Il existe une nette différence entre les comportements de mobilité en Ile-de-France et en province, à l'exception de quelques grandes agglomérations françaises se comportant comme Paris. Le graphique ci-dessous montre les distributions du temps de trajet domicile-travail des actifs de plus de 15 ans selon les lieux de résidence (Figure 11).

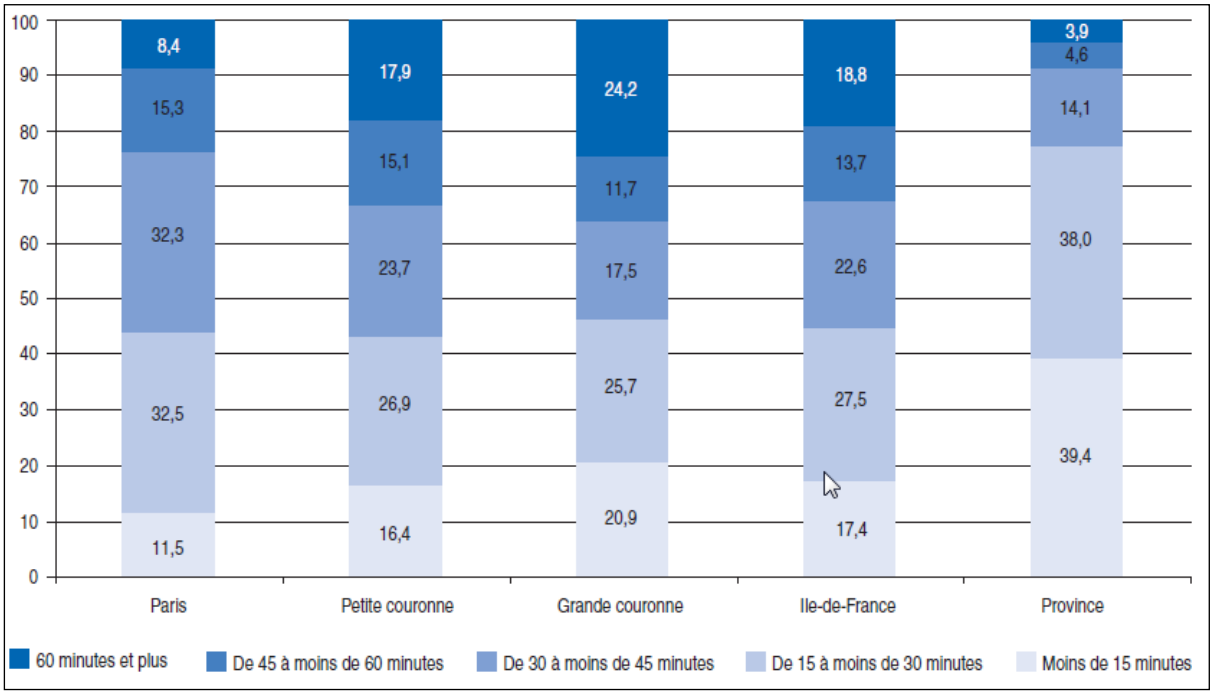


Figure 11: distribution du temps de trajet domicile-travail des actifs de plus de 15 ans selon les lieux de résidence (COUREL, et al., Avril 2005)

Le taux de motorisation dépend directement du lieu de résidence. La nécessité de la multi-motorisation s'amoindrit avec la proximité de nœuds du réseau de transport en commun. De la même manière, l'absence d'un réseau de transport en commun performant favorise la multi-motorisation. Les usagers des transports collectifs vivent majoritairement dans Paris et dans des ménages sans voiture et non multi-motorisés. A l'inverse, les habitants de la grande couronne viennent de ménage motorisés (COUREL, et al., Avril 2005).

3 Evolution des pratiques de mobilité

Le déplacement est un objet central pour décrire la mobilité. De plus, pour analyser la mobilité sur un territoire, il faut d'une part observer les évolutions de certains indicateurs en prenant garde à la taille des effectifs dans les enquêtes et à la comparabilité des paramètres du protocole de mesure (périmètre d'étude, …). D'autre part, il s'agit d'en dégager les principaux paramètres permettant d'interpréter les évolutions observées, et particulièrement quelles sont les tendances lourdes qui impactent les pratiques de mobilité. Une analyse plus fine, nécessiterait de compléter cette liste par tous les facteurs qui influencent les indicateurs étudiés.

Nous débuterons cette section par les facteurs influençant la mobilité de manière structurelle au travers de l'incidence des mutations sociétales et des mutations de l'assise spatiale. Nous verrons ces effets sur la mobilité et sur son analyse qui nous amènera vers deux exemples d'adaptation des schémas de déplacements réalisés par les individus dans le contexte actuel. En effet, la manière de pratiquer le réseau de transport, de se déplacer et donc la demande varient selon le segment d'individu. Ce constat résulte du fait que l'offre n'est pas perçue, et donc pratiquée de manière homogène sur une population. L'inégalité se creuse avec l'accès à de l'information sur l'état de l'offre au cours du processus de choix des paramètres du déplacement. En effet, la perception de l'offre passe par la connaissance de cette dernière. Ainsi, de nombreux facteurs hétérogènes influencent un déplacement. Cependant, on observe des évolutions dans la structure des déplacements. Ceci peut s'expliquer par des phénomènes simultanés. D'une part, des mutations sociétales redimensionnent le rapport aux territoires, aux activités, aux transports, à l'environnement, à l'espace et au temps. Et d'autre part, on observe le développement des moyens d'accès à une connaissance de l'offre en temps différé et en temps réel. Cette demande en systèmes d'aide à la navigation, en information trafic, informations des opérateurs de transport via différents média (écran, page web, etc.) et l'engouement pour des sites alimentés par des observations des usagers reflète d'une part l'importance des outils de communication dans notre société mais également les besoins des usagers face à une complexification avérée de l'offre de transport. En effet, la diversification de l'offre de transport prend sa source dans une desserte du territoire offrant un plus grand choix de mode (multi-modalité) et dans la possibilité de combiner différents modes lors d'un seul déplacement (inter-modalité). Le principe de chaînage sur lequel repose l'inter-modalité est repris par les usagers pour l'ensemble de leurs déplacements. Ainsi, des déplacements pour motifs différents sont chainés afin d'optimiser les activités de déplacements (VALIQUETTE, août 2010).

3.1 Incidences des mutations de la société sur les pratiques de déplacements

Depuis le milieu des années 2000, une rupture dans l'évolution de la mobilité s'opère. En effet, on constate une diminution du nombre de déplacements par jour et par personne. Ce phénomène d'abord observé dans les grandes agglomérations s'étend également aux villes de plus faible densité (CERTU, février 2012). Or, les changements des pratiques de la mobilité

sont un reflet des évolutions de la société, ainsi nous proposons dans ce paragraphe de citer quelques-unes des mutations de notre société qui ont une incidence directe ou indirecte sur les comportements de déplacements en France.

3.1.1 **Incidences des mutations sociétales**

Dans notre société, la principale motivation à se déplacer reste celle de se rendre sur son lieu de travail ou d'étude. Ainsi, les mutations des rythmes de travail influencent fortement les déplacements. Parmi les évolutions des rythmes de travail, on peut citer la féminisation des emplois, le travail intérimaire, la flexibilité des horaires, la possibilité de pratiquer le télétravail, une popularisation des journées de travail continues (sans retour au domicile pendant la pause déjeuner) et une mobilité professionnelle croissante (BANOS, et al., 2010).

La situation économique du pays et donc des ménages, favorise également une certaine segmentation des déplacements. En effet, les déplacements pour motifs achats et loisirs sont directement corrélés au pouvoir d'achat de la population. De plus, la répartition des déplacements par motif varie avec l'âge. Ainsi, le vieillissement de la population entraine, entre autre, une évolution de la distribution des déplacements selon les motifs. En effet, les jeunes retraités semblent plus mobiles que leurs ainés. Une motorisation plus accessible associée aux progrès de la médecine, permettent à nos ainés de se déplacer plus longtemps, bien que les motifs de déplacements soient différents. La classe des « retraités » est le segment d'usager qui a généré le plus grand nombre de déplacements quotidiens supplémentaires sur les 25 dernières années, soit plus de 2,1 millions de déplacements supplémentaires en Ile-de-France. Cette augmentation résulte de deux effets conjugués, la hausse de la mobilité d'une part et de la progression de l'effectif de la classe retraité de l'autre. A titre d'exemple d'impact sur la mobilité, demandons-nous si les générations « plus automobile » garderont leur habitude à l'âge de la retraite. Ainsi, augmenteront-elles le trafic automobile ? Se pose alors la question des échelles de ces déplacements. En effet, bien que le vieillissement d'une région soit inéluctable, il reste cependant freiné par les migrations des personnes âgées hors des grandes villes et/ou vers des régions méridionales. Ces départs trouvent une compensation par l'arrivée de jeunes adultes dans les bassins d'emploi. Il est donc intéressant de regarder l'impact du vieillissement sur des échelles spatiales différentes. Le vieillissement des habitudes de déplacement est un phénomène d'intérêt notable dans les études de déplacement car la mobilité est de plus en plus acceptée par les générations. Ainsi, les distances moyennes parcourues lors des déplacements tendent à s'accroître. L'étalement urbain, l'amélioration et la diversification de l'offre de transport tant routière que ferroviaire favorisent ce phénomène. Ces évolutions sont toutefois très contrastées selon le mode et surtout selon le type d'activité. En moyenne, les résidents de l'Ile de France ont un temps de trajet domicile-travail d'un peu moins de 40 minutes, et la limite maximum acceptable pour se rendre à son lieu de travail depuis le domicile est de 90 minutes. Il apparait que pour les actifs de plus de 15 ans ayant un lieu d'emploi dans un rayon de 80km autour de leur domicile, la distance moyenne entre le domicile et le lieu de travail est autour de 10km, en

province comme en Ile-de-France. Néanmoins un tel trajet correspond à une durée d'en moyenne 34 minutes en Ile-de-France pour 19 minutes en province (HUBERT, 2009). La Figure 12 fait ressortir le besoin de regrouper les notions de distance et de durée en une unité appelée « distance-temps ». Cette unité représente le temps nécessaire pour parcourir une certaine distance via un certain mode de transport. En effet, cette unité sera centrale pour l'usager dans le choix des paramètres de ses déplacements. Généralement, l'unité de distance kilométrique va dimensionner le choix mode.

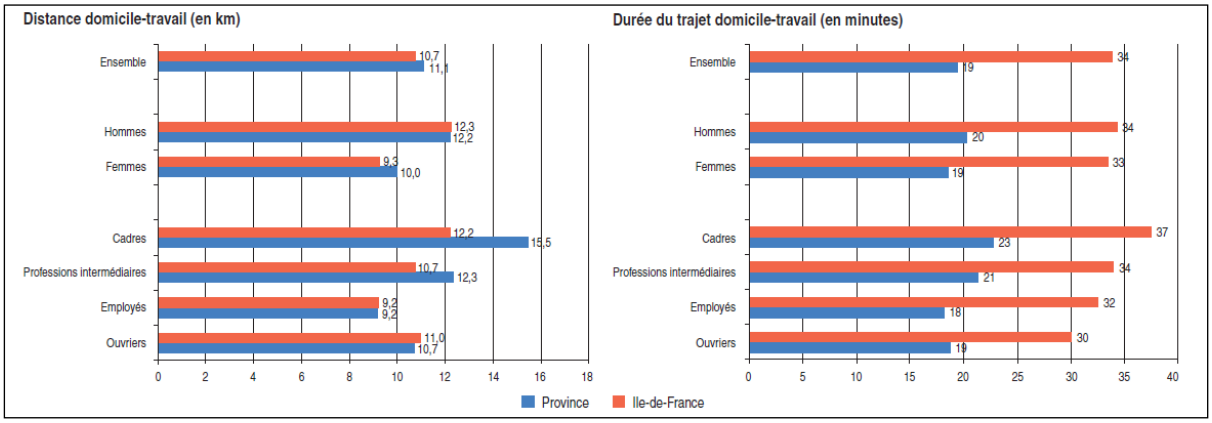


Figure 12: confrontation de la distance domicile-travail et le temps de trajet domicile-travail (HUBERT, 2009)

A cela s'ajoute, des tendances d'amélioration du confort dans les transports en commun ainsi qu'une optimisation des choix d'heure de voyage. Ces conditions de déplacement permettent à l'usager de minimiser sa perception de « perte de temps transport » par la possibilité de réaliser d'autres activités pendant la durée du trajet. Le développement d'outils numériques transportables tels que les smartphones ou les tablettes ont répondu aux besoins des utilisateurs en mobilité. Grace à de tels outils, les usagers ont la possibilité d'optimiser leur temps de voyage, à la fois par de l'accès à de l'information transport, mais également à un usage professionnel ou récréatif car ces outils se comportent tel un proxy d'ordinateur. Les terminaux numériques portatifs sont un exemple parmi d'autres d'un consumérisme de masse individualisé qui s'accroit dans notre société. Associé à l'éclatement des ménages et à l'autonomisation des individus, il fixe les tendances de mobilité (BANOS, et al., 2010).

Les évolutions de la société sont également portées par les pouvoir publics. En effet, depuis 1996, les PDU (Plan de Déplacement Urbain) sont obligatoires pour guider les évolutions des mobilités dans les aires urbaines (voir chapitre précédent). Un des objectifs majeurs commun est la diminution de la circulation automobile en ville. Ainsi, les pouvoirs publics mettent en place des actions d'investissement dans les transports en commun et dans l'aménagement de la voirie pour un partage entre les transports en commun, les modes doux et l'automobile. Le contexte économique et environnemental de ces dernières années, pousse à la valorisation d'une mobilité durable. La mobilité durable fût mentionnée en 1987 comme

« *le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins* » (LAMALICE, et al., Avril 2009). Souvent les notions de transport durable et de mobilité durable sont utilisées sans distinction car elles sont basées sur des concepts communs, mais présentent néanmoins des particularités. La notion de transport durable suggère une préoccupation accrue pour les infrastructures et les moyens de transport. A l'opposé la mobilité durable est plus axée sur la demande et le comportement des individus. Nous pouvons donner à titre d'exemple la préconisation des modifications des habitudes des usagers, telle que l'utilisation plus fréquente du vélo à la place d'un véhicule motorisé. Ainsi, les efforts de la mobilité durable s'appliqueront d'avantage sur les déplacements et sur les comportements individuels. Un exemple de politique en faveur de la mobilité durable est la mise en place de gare à vélos en libre-service pour favoriser les mobilités dites « douces ». Un mode « doux » se définit comme un mode non-motorisé.

3.1.2 **Incidence des mutations de l'assise spatiale de la société**

Les PDU portent sur les améliorations des infrastructures de transport et une modification des schémas de déplacement pour une architecture urbaine déjà en place. Or, les villes actuelles peuvent être qualifiées de discontinues, hétérogènes, multi-polarisées avec des zones de faibles densité (BANOS, et al., 2010). Ainsi, on observe un desserrement des emplois à l'intérieur des pôles urbains en direction des banlieues. Cela implique un maintien de l'attractivité des pôles urbains pour les résidents des couronnes périurbaines. Outre la déconcentration de la population, dont le démarrage se situe au milieu des années 70, l'espace de localisation des activités économiques s'est lui aussi progressivement élargi, témoignant de logiques diverses. Si certains secteurs, comme les commerces de produits de la grande distribution ont suivi la population, d'autres, comme la plupart des industries ont surtout cherché à quitter la zone centrale, pour des raisons de coûts fonciers mais aussi pour profiter d'opportunités en terme de disponibilité et d'aménagement de l'espace. Ce double mouvement qui affecte les localisations induit des conséquences significatives sur les déplacements dans la mesure où il implique un bouleversement de la géographie des lieux d'emploi, d'achats et de loisirs, et donc de nouvelles relations entre les espaces de la ville. Si la zone centrale reste prépondérante, le mouvement de déconcentration des activités du centre de la région, notamment de Paris, vers des zones plus éloignées se poursuit. Cela résulte d'un effet conjugué de la crise économique et des délocalisations d'activités au profit de la périphérie immédiate. Ainsi se posent les questions : comment répondre aux besoins croissants de déplacements de banlieue à banlieue ? La création de nouvelles infrastructures est-elle la seule alternative ? Un besoin d'analyse fine des déplacements internes à la banlieue se fait sentir. En effet, la proposition de solutions optimisées nécessite une compréhension des mécanismes de déplacements.

3.1.3 **Quels effets sur la mobilité ?**

Les mutations sociétales, économiques et organisationnelles impactent les pratiques de mobilités de diverses manières. Les volumétries moyennes de déplacements fluctuent globalement à l'intérieur des segmentations (par motifs, par mode, par caractéristiques individuelles, etc.). Nous proposons une énumération non exhaustive de conséquences sur les déplacements. Afin d'illustrer notre propos, nous emprunterons des valeurs tirées du document (CERTU, février 2012) et des cahiers de l'Enquête Globale des Transports réalisées en Ile-de-France. Les éléments extraits des EGT ne sont pas nécessairement transposables à d'autres agglomérations, et ne servent que l'intérêt illustratif et ne sont pas à prendre comme valeurs de références universelles.

Tout d'abord, le nombre moyen de déplacements, tous modes et tous motifs confondus, effectués quotidiennement par les franciliens, qui avait sensiblement progressé jusqu'en 2005, connait une stabilisation, voire un recul dans la deuxième partie de la décennie. De plus, on constate une augmentation de la portée des déplacements. En effet, tous modes confondus, les distances pour les déplacements liés au travail ont beaucoup progressé ces dernières décennies. Les distances parcourues lors des autres déplacements professionnels et des déplacements scolaires se sont également accrues mais dans une proportion moindre. Au sein des déplacements pour activités privées, seuls les déplacements pour achat ont vu leur distance moyenne croître de manière importante passant de deux à trois kilomètres environ. On notera également que les déplacements professionnels sont deux à trois fois plus longs en moyenne que les autres déplacements. Ces évolutions globales peuvent masquer des tendances spécifiques, par exemple selon le mode de transport. En effet, cette augmentation de la distance aux activités, a favorisé le recul de la marche. Dans le cadre de la mobilité durable, une alternative reste à trouver pour favoriser les modes doux dont la pratique en baisse a souvent pour seule cause la portée. En moyenne, ce sont les déplacements les plus longs qui sont effectués en transports en commun avec 8,7 kilomètres en 2001 contre 6,4 pour la voiture par exemple. Non seulement l'usage de la voiture progresse constamment depuis 1976 mais les distances parcourues à l'occasion des déplacements utilisant ce mode se sont également accrues entre chaque EGT quel que soit le type d'activité motivant le déplacement. En raison d'une vitesse de circulation plus réduite dans les zones urbaines que dans le périurbain ou l'espace rural, les écarts de temps de trajet, d'un type d'espace à l'autre, sont plus faibles que ne le sont les écarts de distance. Ainsi, en heure pleine, la durée des trajets pour les salariés domiciliés dans l'espace rural est en moyenne inférieure à celle des résidents des pôles urbains (COUREL, et al., Avril 2005). De plus, une stabilisation du nombre de déplacements selon un mode de transport à l'échelle spatiale du territoire national ne reflète pas forcement la réalité à des échelles inférieures. En effet, on constate un recul de l'usage de la voiture en milieu urbain. Il s'opère alors un report vers les transports en communs et/ou les modes doux. Ainsi, au niveau national, la circulation automobile s'est stabilisée. Cependant, la voiture privée est toujours utilisée pour 80% à 85% des déplacements dans les couronnes périurbaines. De plus, on observe une augmentation marquée dans les couronnes périurbaines (+44% entre 1994 et 2008). Dès lors, les banlieues

pèsent plus d'un quart des déplacements réalisés quotidiennement. Il y a donc un besoin de solutions innovantes à imaginer pour desservir des territoires tels que les banlieues des grandes agglomérations, les villes de taille moyenne et les territoires moins denses.

Les évolutions des rythmes des activités et leur répartition géographique sur le territoire a entrainé une redistribution de la part du nombre des déplacements selon chaque motif. On constate que la baisse du temps au travail n'a pas minimisé pour autant les enjeux liés à cette activité. Les déplacements pour motif travail représentent 20 à 25% des déplacements (CERTU, février 2012). Ainsi, les déplacements pour motif travail ou étude sont toujours aussi structurants pour le dimensionnement de l'offre de transport. D'autant que les caractéristiques de ce type de déplacements, ont un impact lourd sur le réseau. En effet, les déplacements pour motif travail sont souvent plus longs que les autres, majoritairement réalisés en voiture et surtout sont centrés aux heures de pointe. Les évolutions des rythmes de travail n'ont eu pour incidence qu'un étalement des heures de pointe et non une réduction de la congestion lors des trajets vers ou depuis les bassins d'emploi. Parallèlement, la part des déplacements pour motifs loisir croît de manière significative depuis quelques années. En effet, en France, d'après un recensement de l'INSEE 2007-2008, la moyenne du nombre de déplacements selon le motif est distribuée dans les grandes agglomérations de la manière suivante : 21% pour motif travail, 11% pour motif études, 21% pour motif achats et 47% pour les autres activités dont le loisir est la principal composante. La répartition est semblable en milieu rural et faiblement urbanisé (HUBERT, 2009). Néanmoins, contrairement aux déplacements pour motif travail qui sont réguliers et localisés temporellement, les déplacements pour motifs loisirs peuvent être réguliers à des fréquences variées ou sporadiques. Ceci entraine une répartition hétérogène du nombre de déplacements à l'échelle de la semaine. En effet, en moyenne, les déplacements réalisés par les Franciliens ont lieu pour 79% en semaine, pour 12,5% le samedi et pour 8.5% le dimanche. De plus, en semaine le nombre de déplacements moyen par personne est de 3,5 par jour ouvré et inférieur en fin de semaine (COUREL, et al., Avril 2005). Cette différence entre semaine et week-end s'étend à d'autres segmentations des déplacements. En effet, en fin de semaine, les citadins sont plus mobiles que les résidents des aires périurbaines. De même, en fin de semaine, les hommes semblent se déplacer un peu plus que les femmes. En effet, les motifs des déplacements de fin de semaine sont majoritairement des motifs de loisirs ou d'achat. Néanmoins, la fin de semaine tend à atténuer les différences de mobilité entre classes d'âges avec un resserrement autour de la moyenne. Enfin, la fin de semaine révèle une réelle sur-mobilité des cadres par rapport aux autres catégories sociales. Ces déplacements pour motifs autres que travail ou étude, se produisent majoritairement les week-ends, mais peuvent survenir en semaine selon les rythmes de travail (temps partiel, ARTT, etc.). Ils entrainent une hétérogénéisation des schémas de déplacements dépendant du jour de la semaine considéré et de la saisonnalité.

3.1.4 **Quels effets sur la l'analyse de la mobilité ?**

On montre ici que l'accès à des indicateurs pertinents est nécessaire pour comprendre le phénomène sous-jacent expliquant les observations. Afin, d'illustrer l'importance de l'angle d'analyse, nous commencerons par une tentative de description de la mobilité à partir d'un indicateur global (le nombre de déplacements par jour par individus), puis d'indicateurs par mode.

Tout d'abord, il apparait qu'en exploitant diverses sources de données de mobilité sur des grandes agglomérations françaises (ANDAN, et al., 1988), (INRETS, 1989), (SYTRAL COURLY, 1990), (DREIF, 1995), (DREIF, 2001), (INSEE INRETS, 1997), le nombre moyen de déplacements par jour et par individu est compris en moyenne entre 3 et 4 sur la période de temps comprise entre 1975 et 1997. Il conforte donc une tendance de stabilité sur ces 20 années. Néanmoins, toutes les sources de données prenaient-elles en compte des déplacements courts en mode doux ? Ces tendances d'évolution peuvent être contradictoires d'une agglomération à l'autre. (BONNEL, 2004) explique cette « stabilité apparente» par la combinaison de tendances contradictoires. Nous citerons les principaux effets qui en se combinant, produisent un résultat de stagnation du nombre de déplacements quotidiens en milieu urbain. D'une part le développement de la journée continue, a supprimé les déplacements de déjeuner à domicile. D'autre part, le vieillissement de la population a entrainé une diminution des déplacements car les personnes les plus âgées ont une tendance moins mobile que les jeunes. Néanmoins, s'agit-il d'un effet d'âge ou de génération ? Citons également l'effet de la motorisation qui offre des facilité de déplacement et qui favorise une tendance à la hausse du nombre de déplacements. De plus, la prolifération des grandes surfaces a réduit la fréquentation des commerces de proximité. Toutefois, les enquêtes traditionnelles ne prennent pas toujours correctement en compte les déplacements de fin de semaine qui peut induire un biais pour la mesure de déplacements de fin de semaine réalisés pour motif achats. A cela s'ajoute, l'accroissement des déplacements des femmes qui sont de plus en plus nombreuses à occuper un emploi. Le recul de l'âge de la retraite va également dans le sens d'une croissance du nombre de déplacements, les actifs apparaissant comme plus mobiles que les inactifs. Quels sont alors les effets de l'accroissement du chômage sur cette tendance ? Le passage aux 35 heures, peut également apparaitre comme impactant sur les évolutions de la demande de mobilité. En effet, ce dégagement de temps libre rend possible l'accès à plus d'activités. Ensuite, la spécialisation des espaces pourrait conduire à augmenter le nombre de déplacements pour la réalisation d'activités dédiées. Enfin, les progrès en terme de télécommunication qui ont permis le télétravail ou le télé-achat semble propice à une réduction des déplacements pour les motifs correspondants (travail et achat). Cependant, il faut prendre garde à la substitution des déplacements par les télécommunications qui n'impacte pas nécessairement la mobilité totale, seulement par motif (CLAISSE, 1997). Cet indicateur de nombre de déplacements tout mode confondu peut être expliqué par des tendances externes au système de transport. Cela signifie que ce dernier n'influence par le nombre moyen de déplacements réalisés quotidiennement par les individus. Les principaux

facteurs explicatifs de la mobilité globale sont à chercher dans l'organisation sociale et dans le processus de réalisation d'activités.

Ce n'est plus le cas lorsque l'on observe la mobilité par mode. Les facteurs qui vont expliquer la mobilité sur un mode appartiennent à la fois au système de transport, au système de localisation des activités et au système des relations sociales. Commençons par rechercher des déterminants à la forte croissance de l'usage de l'automobile ces 20 dernières années. En premier lieu, la croissance de la motorisation et le développement des infrastructures routières et de stationnements ont agi dans le sens de l'accroissement. De même, l'étalement urbain a favorisé l'usage de ce mode. L'organisation du travail avec des horaires variables et les schémas d'activité tendus, invite à préférer ce mode plus flexible sur les transports en commun. Toutefois, un effort de développement de l'offre de transport en commun pourrait agir dans le sens d'une diminution du nombre de déplacement en véhicule privé, sans pour autant être suffisant pour assurer le remplacement du mode routier (BONNEL, et al., 2000). Dans le cas des transports en commun, la croissance en terme de nombre de déplacements quotidiens semble plus modérée. Elle s'explique par la taille de la ville et l'offre proposée, mais également par les conditions de trafic routier (congestion). Il semblerait que la marche et le vélo aient subi un effondrement du nombre de déplacements, en raison du succès des techniques motorisées et d'une vie urbaine moins centrée sur les quartiers qui limite notamment les achats à proximité, mais qui tend à remonter dans les très grandes villes.

Bien que les explications de tendances soient toujours d'actualité, les évolutions en nombre de déplacement présentées ici vont jusqu'à 1997. Les politiques de volonté de limitation de l'usage de véhicules privés en ville pour limiter la congestion et les nuisances ont-elles influencé ces tendances? Ce paragraphe illustre l'importance du choix de l'indicateur pour expliquer les tendances de la mobilité. Dans la mesure où les préoccupations environnementales se placent de plus en plus dans les procédures de planification, on peut se demander si le nombre de kilomètres parcourus ne serait pas plus pertinent. Une autre image de la mobilité via cet indicateur en distance renverrait-elle également à une stabilité des kilomètres parcourus ? Les indicateurs sont en effet des révélateurs de réalités différentes qui dépendent des objectifs de l'analyse de la mobilité.

Pour la suite de ce paragraphe consacré aux évolutions de la mobilité, nous présentons des réalités d'évolution de pratiques de mobilité relatives à la gestion par l'individu de son schéma de déplacement.

3.2 **Complexification des schémas de déplacement : le chaînage**

Afin d'optimiser chacun des déplacements à réaliser dans une journée, il s'agit d'organiser le panel activités à réaliser afin de consolider la chaîne des déplacements qui relie les différents lieux d'activité. Il y a donc deux échelles dans le processus des choix des paramètres d'un déplacement : l'échelle du déplacement unitaire et l'échelle de la chaîne de déplacement dans laquelle il s'inscrit. Le but recherché étant la maximisation de l'utilité d'un déplacement et d'un ensemble de déplacements. Ainsi, pour comprendre les mobilités

individuelles, il est important de regarder l'ensemble des déplacements effectués par une personne lors d'une journée, ainsi que la manière donc ceux-ci s'entre-influencent. En effet, un déplacement motivé par une activité a de fortes chances d'impacter les autres déplacements à l'échelle de la journée. Nous montrerons ainsi la corrélation entre le chaînage des déplacements et les modèles d'activités.

Commençons tout d'abord par définir ce qu'est une chaîne de déplacements. Une chaîne de déplacements consiste en une série de déplacements inter-reliés et effectués par des individus dans le but de consolider leurs activités (VALIQUETTE, 12 juillet 2010). Cette consolidation d'activités apporte certains avantages, comme une économie de temps de déplacement. En effet, une activité peut avoir une certaine influence au niveau spatio-temporel et même modal sur une autre activité effectuée par la même personne dans la journée. L'ajout d'une activité dans une chaîne engendre souvent des modifications sur les autres activités, comme l'illustre la Figure 13.

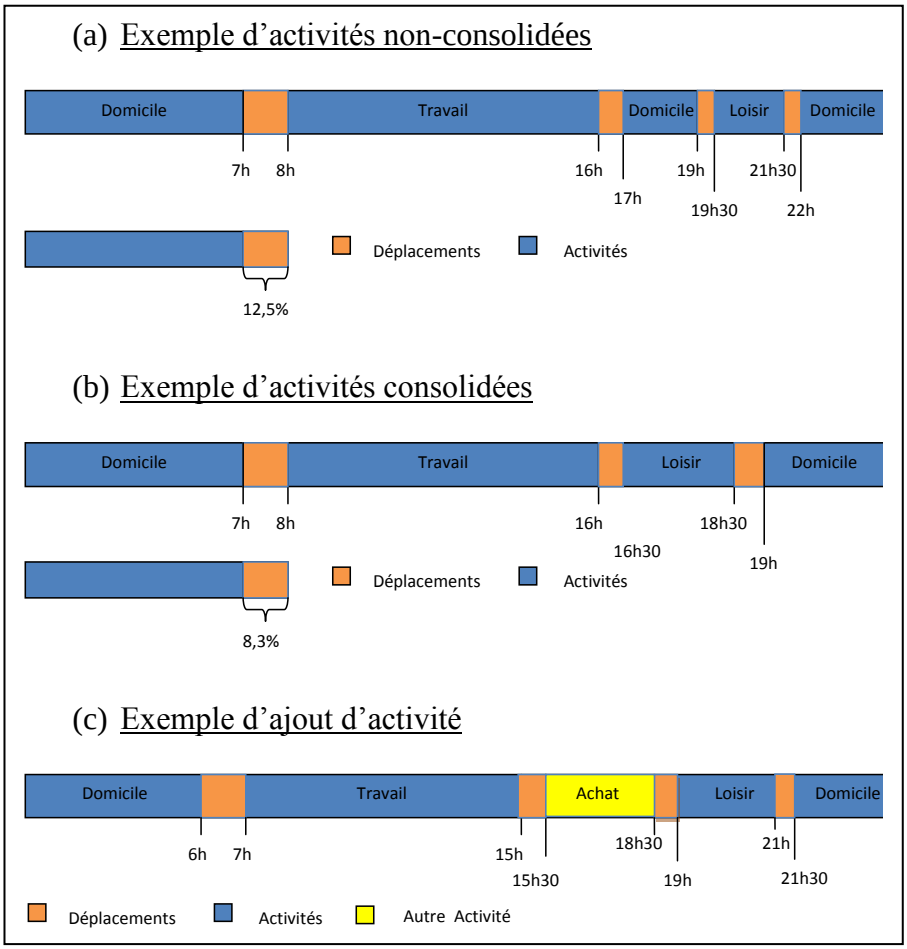


Figure 13 **:** L'impact de la consolidation des activités pour l'optimisation des déplacements

Ces exemples montrent que, lors de l'étude de la mobilité quotidienne, il devient important de considérer l'ensemble des déplacements effectués pour ce regroupement d'activités puisqu'ils perdent tout leur sens pris séparément. Le chaînage permet d'expliquer

un itinéraire privilégié, un temps de parcours entre une origine et une destination principale mais également le choix d'un mode. A titre d'exemple, considérerons un déplacement effectué en voiture entre le domicile et le dentiste situé à 200 mètres qui peut paraître à première vue anormal puisque ce déplacement peut s'effectuer facilement à pied. Par contre, étudier la chaîne dans son ensemble permet de conclure que ce déplacement est le premier de la chaîne pour une personne allant travailler à 20km de son domicile, par exemple, expliquant ainsi l'automobile comme choix modal. C'est pourquoi l'analyse des chaînes permet d'obtenir une meilleure compréhension comportementale que l'étude de déplacements isolés les uns des autres.

3.2.1 **Concepts d'une chaîne de déplacement**

Ce paragraphe présente les différents concepts liés aux chaînes de déplacement décrit par (VALIQUETTE, août 2010).

Activités primaires et secondaires

Les activités primaires sont les activités principales, c'est-à-dire celles dont le motif a justifié ou causé le déplacement originel. La plupart du temps, il s'agit du travail ou des études. Toutefois, d'autres motifs de déplacements peuvent être considérés comme primaires, en considérant comme primaire l'activité qui consomme le plus de temps.

Point d'ancrage

Un point d'ancrage est généralement le lieu de l'activité primaire. Les lieux de résidence, de travail et d'étude sont les points d'ancrage les plus fréquents. Le lieu de domicile est considéré comme le point de départ d'une chaîne de déplacements puisqu'il s'agit du lieu où réside une personne, ce qui justifie sa classification en tant que point d'ancrage.

Boucle

Il s'agit d'un ensemble de déplacements compris entre le moment du départ et d'arrivée à un **même point d'ancrage**. Ce concept est différent de celui d'une chaîne de déplacements. En effet, une chaîne de déplacements comprend l'ensemble des déplacements entre le départ et l'arrivée au **lieu de résidence**, alors que la boucle se base sur les points d'ancrage. Ainsi, une chaîne de déplacements peut comprendre plus d'une boucle. Par exemple, une personne qui effectue un déplacement de son lieu de domicile au travail le matin et le chemin inverse en après-midi tout en s'arrêtant au supermarché, effectue une boucle puisqu'elle est partie d'un point d'ancrage, le domicile, pour y revenir en fin de journée. Toutefois, si cette même personne quitte le bureau à l'heure du déjeuner pour aller manger et y revient ensuite, une autre boucle est créée à partir du lieu de travail, ce dernier devenant le point d'ancrage de cette boucle. Néanmoins, il s'agit toujours de la même chaîne de déplacements.

3.2.2 **Paramètres influençant la structure d'une chaîne**

Dans un souci d'optimisation de la chaîne de déplacement, les paramètres suivants vont influencer la structure de la chaîne :

1. Nombre d'activités
2. Horaire de départ
3. Longueur du déplacement (variation significative de longueur entre les milieux urbains et ruraux)
4. Durée des déplacements et activités
5. Motif de déplacement
6. Facteurs socio-économiques individuels
7. Accessibilité aux activités

L'accessibilité aux activités influence grandement les chaînes de déplacements à effectuer, car elle permet de déterminer le nombre d'endroits qui peuvent être visités et en combien de temps. Il a été démontré que les ménages vivant dans des quartiers où l'accessibilité aux activités est meilleure ont moins tendance à effectuer des chaînes de déplacements. L'accessibilité est souvent liée au moyen de transport disponible pour atteindre cette activité (VALIQUETTE, août 2010).

3.2.3 **Incidence de la structure d'une chaîne de déplacements sur la structure des déplacements**

L'intérêt du chaînage est de consolider les activités, c'est-à-dire de minimiser la longueur, le temps, la pénibilité des déplacements. Une chaîne représente la succession de déplacements motivés par un déplacement principal agrémenté d'un ou plusieurs déplacements secondaires. Nous avons vu que la structure d'une chaîne de déplacements est influencée par divers paramètres. L'optimisation même de la structure de la chaîne passe par une adaptation des déplacements unitaires de la chaîne. Ainsi, la structure d'une chaîne donnée influence la structure des déplacements unitaires qui la composent.

La composition des chaînes de déplacements a une incidence importante sur la structure spatio-temporelle des déplacements. Le lieu où les activités vont être effectuées dépend de plusieurs facteurs dont le moment du déplacement ainsi que le motif. Les activités effectuées dans une chaîne sont généralement localisés près du lieu d'ancrage (domicile ou lieu de travail). Certains motifs de déplacement ont toutefois des caractéristiques précises. Ainsi, les activités liées au dépôt d'une personne sont situées plus près du lieu de résidence que du lieu de travail pour une chaîne entre le domicile et le travail. Par ailleurs, la notion du temps change également selon les chaînes d'activités. Cette notion de temps contient à la fois le moment de la journée privilégié pour exécuter les activités, et la durée des activités. Les déplacements effectués lors d'une chaîne de déplacements ne dépendent pas de l'heure de pointe, mais bien du type d'activité car certaines activités ont des moments plus propices. De plus, le moment de déplacement permet également de déterminer si une activité est secondaire par rapport aux autres activités dans une chaîne de déplacements.

Le mode de transport a une incidence sur la localisation des activités. Les personnes se déplaçant en transport en commun ont plus tendance à privilégier les endroits où la mixité des modes est plus grande puisque les activités sont plus variées et surtout plus accessibles. Pour les déplacements effectués en automobile, les personnes peuvent davantage choisir des activités qui ne sont pas nécessairement situées à proximité l'une de l'autre grâce à la flexibilité offerte par l'automobile. Il apparaitrait que plus les chaînes de déplacement sont complexes, plus l'automobile est privilégiée (VALIQUETTE, août 2010). Le temps de déplacement est d'ailleurs un des critères les plus importants, car c'est celui qui, généralement, a le plus de poids lors de la planification des chaînes. La distance pèse beaucoup moins dans le choix de transport que le temps. Ainsi, pour pallier à cette augmentation de la distance au lieu de résidence sans pour autant augmenter le temps de déplacement, il est nécessaire d'utiliser des modes de transport plus rapides. Dans ce cas-là, le temps d'accès, le temps d'attente, le temps de transfert et le temps en véhicule entrent en ligne de compte ; d'autant plus que ces éléments ont un plus grand impact sur les chaînes que sur les déplacements « isolés ». L'automobile est souvent le mode utilisé lorsque le transport en commun ne peut répondre au besoin de déplacement en termes d'éloignement ou d'accessibilité, ou que des plateformes intermodales ne soient pas suffisamment équipées en place de parking pour permettre la transition entre véhicule personnel et transport en commun. De plus, le nombre d'activités est un facteur discriminant pour le choix des transports en commun. Cette hypothèse dépend évidemment du niveau de service des transports en commun et le niveau de congestion routière de l'agglomération étudiée. Ainsi, les combinaisons multimodales ne cessent d'augmenter car le niveau de congestion dans les grandes agglomérations entraine dans bien des cas, un temps de déplacement plus long en véhicule privé uniquement (VALIQUETTE, août 2010). Toutefois, la causalité peut être dans l'autre sens. En effet, la complexité des chaînes de déplacements peut justifier le choix du mode de transport et le mode de transport peut également avoir un impact sur le type de chaîne. Par exemple, une personne se déplaçant en transport en commun, aura tendance à effectuer moins d'activités lors de ses chaînes à cause de la flexibilité plus limitée du mode.

3.3 **L'accès à l'information transport pour l'usager**

Les volontés de produire une information aux voyageurs de qualité reflètent d'une part la complexité pour un usager d'appréhender le réseau de transport et d'autre part les besoins d'exigence et de souhait d'optimisation des déplacements pour les usagers. Dans le domaine des transports, on constate un accroissement des sollicitations en matière de qualité de l'information dédiée aux usagers. Les sources d'informations se multipliant et les technologies évoluant sont garantes théoriquement de l'accès à de l'information en tout lieu. Ainsi, un Système d'Information Voyageur (SIV) doit répondre à ces exigences (PREDIT, 2001). Afin de fournir à un usager des réseaux de transport, une aide dans son choix modal et lui faciliter l'usage des réseaux, un SIV doit proposer des informations à différents moments du déplacement. Avant un déplacement, l'usager a besoin de connaitre l'offre globale, c'est-à-dire concernant tous les modes, pour ce déplacement. Pendant le déplacement, le SIV doit

proposer de l'information pertinente permettant à l'usager d'être accompagné. La conception d'un SIV remplissant ces objectifs aura pour avantage d'accroître la confiance de l'usager dans son usage des réseaux et constitue un facteur de fidélisation (BALBO, et al., 2004). Ainsi, l'information du voyageur est un enjeu important pour les exploitants dans la relation avec leur clientèle. L'information multimodale est l'une des composantes à prendre en considération pour simplifier l'usage des transports (PREDIT, 2001). Ainsi, les opérateurs de transport ont constitué des offres d'information aux voyageurs. Une information est dite passive, si elle est donnée sans possibilité de compléments, c'est par exemple le cas d'un panneau à messages variables, d'information sur papier ou de tableau d'affichage. A contrario, une information est dite interactive si elle est obtenue à l'initiative du voyageur et contient des informations personnalisées, c'est par exemple le cas d'un serveur Web ou de l'utilisation d'un assistant personnel. Cependant, l'information fournie par un opérateur est généralement monomodale. Chaque opérateur présente son offre en information pour répondre aux besoins de sa clientèle et se limite à son territoire de compétence. Par exemple, dans le cas des transports en commun, l'information fournie aux voyageurs correspond à des données utilisées par le Système d'Aide à l'Exploitation (SAE). Ces données ne sont pas conçues pour être intégrées au sein d'un système d'information concevant une offre globale pour le voyageur. Par conséquent, l'utilisation du système d'information suppose une adaptation de l'utilisateur aux choix de l'opérateur et, si le besoin est multi opérateurs, alors il y aura autant d'adaptations que de sources d'information. Cette hétérogénéité des sources rend difficile une gestion conjointe des informations et suppose une intervention importante de l'utilisateur. C'est pourquoi la conception d'un voyage demeure une tâche complexe (O'BRIEN, et al., Juillet 1998). Cette tâche s'avère fastidieuse pour un être humain. Pourtant, certains traitements pourraient être automatisés comme l'optimisation des combinaisons horaires entre les différentes parties d'un trajet ou l'évaluation des offres tarifaires. C'est dans cet objectif d'automatisation et de conception de services avancés que le paradigme multi-agent offre des solutions. Le domaine du transport est propice à l'utilisation des modèles développés dans le domaine multi-agent (voir brièvement dans le chapitre suivant). Les propriétés d'autonomie, d'aptitudes sociales et de réactivité qui sont usuellement associées aux agents intelligents sont fréquemment mises à contribution pour développer des systèmes adaptés au domaine du transport (SCHLEIFFER, 2002). En effet, l'utilisateur doit pouvoir formuler son besoin sans connaître les sources d'information pouvant y répondre. Afin de constituer une réponse personnalisée, la seconde fonction consiste à intégrer les données obtenues. Le voyageur doit pouvoir spécifier ses préférences et obtenir une (des) réponse(s) en conséquence. Enfin, la dernière fonction consiste à assurer le suivi des informations afin de surveiller le bon déroulement du déplacement. Le voyageur doit pouvoir être averti de tout évènement susceptible d'interférer avec son déplacement.

Ainsi, on peut définir la fonction principale de l'information multimodale comme « l*a fonction essentielle d'un système d'information multimodale est de fournir à l'usager des transports toute l'information nécessaire à la réalisation de son voyage. Cette information vise à réduire l'incertitude des usagers sur les itinéraires, les modes de déplacement envisageables, la durée et le coût de ces déplacements selon le mode utilisé, les ruptures de*

charge éventuelles, et si possible, à orienter le comportement des usagers au bénéfice d'une utilisation optimale des infrastructures et d'une priorité aux transports collectifs. » (ATEC, 1997). Il s'agit d'une notion importante dans un contexte de mobilité durable car elle pourrait favoriser l'usage des modes collectifs souvent délaissés au profit des transports individuels en raison des difficultés à organiser un déplacement via ces modes. En effet, une offre multimodale appropriée et agrégée sur l'ensemble des modes et des opérateurs participerait à proposer une continuité du service de transport pour un déplacement sur un territoire. A une offre de base qui contiendrait des informations d'heure de départ et d'arrivée, de durée de trajet et de coût de ticket pour chaque mode, une couche supplémentaire d'informations annexes telles que des conditions météorologiques ou encore des points d'intérêts de proximité semblerait très utile à l'utilisateur pour mieux orienter son choix dans l'ensemble de l'offre de mobilité (KAMOUN, 2007). De plus, la qualité de l'information multimodale en terme de disponibilité et de pertinence semble devenir, aujourd'hui, un critère essentiel pour l'évaluation de la qualité de service des opérateurs de transport. D'après (GUDE-CATALAN, et al., 2000), l'information au voyageur peut être définie aux travers de ses trois objectifs. Le premier est bien entendu de faciliter le choix des modes dans l'ensemble de l'offre disponible et d'assurer la continuité du service de transport. Le second est de simplifier l'usage des réseaux de transport en commun pour améliorer leur attractivité. Enfin, elle permet d'orienter si possible le comportement du voyageur vers une utilisation « optimisée » des infrastructures pour diminuer les congestions. Prenons l'exemple du mode routier. Dans celui-ci, un usager connecté, c'est-à-dire ayant accès et accédant à de l'information voyageur se trouve dans un système dynamique dans lequel il génère et consomme des informations et se trouve alors dans une situation de recherche de l'usage optimum du réseau coté usager et coté réseau routier. Evidemment, avec les évolutions techniques dans le domaine des systèmes multi-agents, la difficulté principale de la construction d'une information aux voyageurs multimodale et multi-opérateurs est l'accès aux différentes sources de données des différents acteurs. Le Royaume-Uni a tenté une expérience, Transport Direct, qui proposait un SIV à l'échelle du pays. Il regroupait les fonctions suivantes : la planification du déplacement et la recherche d'itinéraire sur tous les modes et toutes les combinaisons de modes, la réservation et le paiement du voyage sélectionné, des informations à tout moment du déplacement, notamment pour accéder à la connaissance des conditions de déroulement du déplacement (perturbation, etc.) (DANFLOUS, 2003). Cela n'aurait pu être réalisé sans la collaboration des différents acteurs britannique du transport.

Ainsi, un usager en mobilité sur un réseau de transport peut accéder à de l'information concernant son déplacement en cours ou des déplacements à venir via différents moyens. Tout d'abord, des informations sont diffusées en interne par les opérateurs des réseaux sous forme de signalisation statique ou évolutive (panneau/écran d'affichage), de communication orale ou via leurs espaces Internet. Une communication extérieure via différents médias (télévision, radio, Internet) peut être dédiée partiellement ou entièrement à des informations transport. Des sites spécifiques d'échanges entre usagers sont aussi disponibles. Des outils d'aide à la navigation embarqués dans les voitures permettent des optimisations d'itinéraires

de manière statique ou dynamique en prenant en compte la réalité du trafic. On constate un important développement de sites proposant de l'information trafic et/ou des informations relatives aux points d'intérêt à proximité d'une position. La croissance des terminaux portatifs permettant l'accès à Internet en mobilité et le développement d'applications adaptées ont favorisé l'accessibilité aux informations transport. En effet, l'émergence des smartphones et des tablettes permet une convergence en un même terminal des différentes sources d'informations transport et systèmes d'aide au déplacement destinés à l'usager.

Le service d'information voyageur est un exemple représentatif du besoin de collaboration entre le domaine du transport et le domaine des télécommunications. D'une part, les télécommunications permettent la diffusion de cette information, et les sources numériques viennent de plus en plus enrichir l'information. Nous sommes entrés dans l'ère des véhiculés connectés, du transport intelligent, du transport digital.

3.4 **Conclusion**

Le schéma dressé par ces nouvelles manières de se déplacer, avec des déplacements chainés, une volonté et une possibilité pour chaque usager d'optimiser ses déplacements dans un réseau de transport interconnecté et multimodal complique significativement la tâche des acteurs de l'offre. En effet, les questions suivantes se posent : Comment mesurer l'impact des différents facteurs globaux et individuels sur les paramètres d'un déplacement ? Comment l'usager perçoit-il l'offre de transport et donc comment va-t-il s'y adapter ? Comment évoluera sa demande ?

L'évolution des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) permettent aux usagers une adaptation quotidienne à l'état du réseau de transport et donc d'opter pour une distance-temps réduite par un changement de mode ou une modification de l'horaire de départ. De même, des paramètres imprévisibles ou exceptionnels peuvent venir modifier un itinéraire habituel de déplacement. Par exemple, des prévisions météorologiques défavorables peuvent favoriser un report modal des modes doux vers un mode motorisé. Les adaptations à la dynamique de l'offre de transport varient d'un individu à l'autre, selon sa volonté de briser une habitude, sa connaissance du réseau de transport et de son accès à l'information de solutions alternatives. Ainsi, l'observation des déplacements ne peut être statique car les flux de déplacements s'adaptent à l'offre, aux états à différentes échelles du réseau de transport et aux besoins personnels de chacun des usagers.

4 Les déplacements : un objet complexe à mesurer

Le CERTU a publié une revue des mobilités sur les années 2000 (DE SOLERE, et al., février 2012) qui indique un nombre de déplacements quotidiens moyen des habitants des agglomérations de 3,6. En France, 1 déplacement sur 4 est réalisé au sein des banlieues, plaçant ce type de territoire comme celui supportant le plus de déplacements quotidiens. Une augmentation du nombre des déplacements stabilisée mais toujours croissante a pour conséquence directe une congestion des réseaux de transport localisée dans le temps et dans

l'espace. Il faut alors trouver des solutions pour réduire cette externalité augmentant les durées de déplacements. Particulièrement, en milieu urbain, les infrastructures ne peuvent pas aisément accroître leur capacité pour des raisons de densité mais surtout de coûts d'investissement. Le CERTU a constaté une baisse de la part modale de la voiture individuelle en agglomération avec en parallèle une augmentation de 30% de la part modale des transports collectifs pour les agglomérations de plus de 250 000 habitants. Cependant, malgré des campagnes de sensibilisation aux modes doux accompagnées d'un équipement en systèmes de vélo en libre-service en plein essor – 34 systèmes de vélo en libre-service opérationnels en France en septembre 2011 - un français sur 5 seulement considère ce mode comme un mode d'avenir. Des solutions se portent alors vers des stratégies d'optimisation des réseaux existants au travers de l'encouragement à la multi-modalité, d'informations vers les usagers pour l'orientation vers des itinéraires de délestage et pour aider les usagers dans leur optimisation de chaînes de déplacements. En effet, l'information vers les usagers de transports permettrait une affectation dynamique sur le réseau facilitant une uniformisation spatiale et temporelle sur les différents axes et les différents modes. Des outils de mesures adéquats sont alors nécessaires.

Des évolutions selon les motifs sont observées. D'une part, la distance moyenne des déplacements pour motif domicile-travail s'est accrue de 20% entre 1994 et 2008. D'autre part, on constate une nouvelle distribution du nombre de déplacements selon les motifs. En effet, le motif loisir génère de plus en plus de déplacements. Or ces derniers ont un caractère sporadique et sont influencés par des conditions extérieures comme la météo, les conditions de trafic, etc. (SCHLICH, et al., 2004). De plus, les déplacements pour motifs loisirs sont généralement déclenchés en réponse à des incitations sociales telles que rendre visite à des proches ou les rejoindre pour des activités. Ainsi la composante sociale ne semble pas pouvoir être exclue de l'étude des déplacements pour ce motif contrairement aux migrations pendulaires qui ne dépendent que de la localisation des lieux de travail et de résidence. Alors, comment étudier une chaîne composée d'un déplacement principal domicile-travail et d'un mouvement secondaire de motif loisir ? Ainsi, des outils statiques adaptés à la modélisation des migrations pendulaires ne suffisent plus pour modéliser les déplacements sur les réseaux actuels.

Des questions sont alors posées pour les années 2010, dans le cadre d'une mobilité durable. Quelle sera l'ampleur du co-voiturage et de l'auto-partage, encouragés par les pouvoirs publics ? Le développement des transports collectifs est nécessaire, mais il est limité par des capacités de financement. Comment proposer la « bonne offre » au bon endroit ? Quelle sera leur complémentarité avec les modes doux ? Une place pour les modes doux existera-t-elle en dehors des centres villes ? Ceci amène des questionnements d'aménagement du territoire telles que : Limiter la mobilité en terme de kilomètres parcourus est-il envisageable sans restreindre les activités ? Une meilleure maitrise de la localisation des lieux d'habitat et les lieux d'activité sera-t-elle trouvée ?

Cependant, lorsqu'on s'interroge sur les baisses des mobilités individuelles (en nombre de déplacements quotidiens) observées dans les années 2000, plusieurs hypothèses sont à considérer. S'agit-il d'un choix assumé des usagers ou le résultat de contraintes ?

L'optimisation des déplacements peut-elle expliquer cette diminution du nombre de déplacements quotidiens ? Ainsi, quand est-il de la demande ? Les schémas de déplacements ont en effet tendance à se complexifier ces dernières années. Cette complexité repose principalement sur la multiplication des variables entrant dans le processus de choix des paramètres des déplacements. Cet effet est dû d'une part, à l'évolution des rythmes individuels, et d'autre part aux mutations globales de la société et des réseaux de transport. Ainsi, les caractéristiques individuelles sont de plus en plus présentes dans la modélisation des déplacements. Il s'agit de modéliser des comportements de mobilité. Ceci implique une segmentation qui doit être de plus en fine et donc des données permettant une observation adaptée (désagrégée et en temps réel) pour répondre à des questions telles que : Comment discerner le degré de priorité d'un déplacement dans une chaîne pour un segment d'individus?

En résumé, afin de répondre à la demande en transport, les acteurs de l'offre s'activent à optimiser le réseau de transport. Le bilan actuel de l'offre de transport est synonyme de complexité avec un réseau à la fois vaste et dense proposant différents modes interconnectés. Pour proposer les évolutions du réseau qui répondront à la demande future des usagers, ou exploiter des réseaux chargés, ces acteurs de l'offre passent par l'observation de la demande à l'état actuel. Ainsi, il s'agit de mesurer les déplacements et de comprendre les mécanismes sous-jacents aux comportements de mobilité observés sur un réseau de transport. A l'image du réseau, ces derniers sont complexes et variés. De plus, les usagers, quant à eux optimisent leur utilisation de l'espace des activités et donc du réseau de transport. Il apparait donc nécessaire, dans le but d'une appréhension plus fine des mécanismes qui animent les déplacements observés, que les études sont à approfondir au niveau des facteurs qui entrent en compte dans les procédés d'optimisation individuels. Dès lors, acteurs de l'offre, comme acteurs de la demande, ont des besoins de mesures de déplacements fines, spatialement et temporellement, qui permettent la quantification selon de multiples critères sur les attributs des déplacements. Le chapitre suivant présente les outils actuels à disposition des acteurs de l'offre pour une représentation de l'usage des réseaux. Ils ont, pour la plupart, été développés pour être alimentés par des sources de données « traditionnelles ». Pourrait-on envisager une autre source de mesure de déplacements qui compléterait ces données classiquement produites ? Quel sera le rôle des NTIC dans la mobilité de demain pour les acteurs de l'offre, mais aussi pour les acteurs de la demande ?

Chapitre 3 : Etat des lieux des outils pour traiter des problématiques rencontrées en transport

Une évolution des outils qui suit celle des problématiques ?

Ce chapitre présente les outils et modèles utilisés dans le domaine des transports pour, à différentes échelles spatiales et temporelles, décrire ou prédire la mobilité sur un territoire. Si le lecteur expert en transports pourra trouver la synthèse sommaire, le souhait de l'auteure est que le lecteur novice en modélisation transport puisse y trouver un exposé clair et utile à sa compréhension des chapitres suivants.

Le chapitre propose en premier lieu une chronologie des évolutions de la modélisation de la demande de déplacements, puis donne l'état actuel des outils de modélisation à disposition des acteurs de l'offre de transport.

En effet, on observe un glissement progressif de la problématique de planification d'un axe isolé vers un réseau de transport, des véhicules aux individus et de la charge de nouvelles infrastructures vers la régulation des déplacements sur un territoire. De plus, l'évaluation socio-économique des investissements est devenue une préoccupation permanente des pouvoirs publics (QUINET, 2013). Le contexte actuel est le suivant : l'économie a subit des mutations telles que l'intensification de la mondialisation, l'émergence de nouveaux acteurs économiques, la nécessité de s'engager dans la transition écologique et énergétique et les questionnements sur les formes et sur les outils de l'intervention publique dans un contexte où la régulation par la concurrence prend une place prédominante. De plus, les budgets publics subissent de fortes contraintes. Or, il apparait qu'en France, le recours aux calculs socio-économiques dans l'évaluation des projets d'investissement transport est loin

d'être systématique. Nous avons également sélectionné quelques problématiques de planification et d'exploitation rencontrées actuellement pour apporter aux lecteurs des exemples d'utilité de la modélisation pour les acteurs de l'offre.

Ce chapitre comprend deux sections. La première partie contient une revue des besoins des acteurs de l'offre au travers d'une chronologie des évolutions des besoins d'outils avec la mutation des enjeux des transports basée sur (CHATZIS, 2013). Ensuite, nous présentons quelques recommandations actuelles en matière d'outils de prévision que l'on peut retrouver dans le rapport Quinet (QUINET, 2013) et certaines problématiques actuelles des acteurs au travers d'exemples concrets. Ainsi, cette première partie pose les questions auxquelles doivent répondre les acteurs. Alors, la deuxième partie décrit sommairement les outils, en termes de modèles et de simulations, dont ces acteurs disposent pour répondre à ces problématiques. Ceci permettra de faire ressortir les caractéristiques que devraient posséder une source complémentaire de mesures de déplacements afin d'alimenter, voire d'enrichir ces modèles descriptifs ou prédictifs, mais aussi de fournir une aide à l'exploitation des réseaux tout en facilitant la validation des scenarii mis en œuvre.

Il est à noter que nous avons favorisé le cadre urbain car il s'agit de l'environnement le plus complexe et le plus impacté par les externalités des transports en raison des fortes densités.

1 Les besoins d'analyse socio-économique

L'évaluation socio-économique des investissements est une préoccupation permanente des pouvoirs publics. En effet, l'investissement public est considéré comme un facteur clé de croissance et de compétitivité et est garant d'une offre de service public de qualité. De ce fait, il doit être choisi avec une attention particulière pour concilier développement et maîtrise des finances publiques. Un constat actuel montre que les choix d'investissements publiques sont insuffisamment étayés (QUINET, 2013). En effet, les procédures d'évaluation préalable et le processus de décisions ne permettent pas toujours de hiérarchiser les projets et de faire prévaloir ceux qui seront les plus utiles pour la collectivité. Pourtant, dès 1994, il est précisé que « le calcul économique, malgré ses insuffisances, est encore ce qu'il y a de mieux pour évaluer des projets d'investissement » (RAPPORT BOITEAUX, I., 1994).

L'enrichissement des évaluations socio-économiques des investissements publics dans le transport est devenu possible grâce aux avancées de la science économique dans ces domaines. Ainsi, des axes sont à privilégier dans les recherches en cours. Ils portent sur une amélioration de l'analyse spatiale par la mise à jour des valeurs numériques qui vieillissent et la prise en compte des évolutions et des attentes de la société, une meilleure gestion des problèmes de gouvernance de l'évaluation dans un contexte d'acteurs multiples, de complexification de la prise de décision et de pluralité des financements ainsi que sur l'extension du calcul socio-économique au-delà de ses champs d'applications traditionnels que sont le transport et l'énergie. L'objectif global est d'assurer la qualité technique des estimations pour optimiser les outils dont se servent les décideurs.

1.1 Un constat fait par les acteurs

1.1.1 Importance de la modélisation des déplacements

La modélisation permet une «représentation simplifié de la réalité, destinée à mieux la comparer et à agir sur elle » (GUITTON, 1964). Ainsi, les modèles de mobilité sont utilisés en tant qu'outils de représentation des mouvements individuels ou globaux dans un contexte spatio-temporel donné. La connaissance de la mobilité actuelle et l'estimation de la mobilité à venir est un enjeu majeur pour le déploiement des réseaux de transport, de télécommunication, mais également pour se prévenir de conséquences environnementales, sociales, économiques ou encore sanitaires (management des pandémies). Ils existent alors des modèles de mobilité pour des domaines extrêmement diversifiés. Selon les domaines, les questions que se posent ne portent pas sur les mêmes objectifs. Ainsi, nous diviserons la famille des modèles de mobilité en deux branches principales: les modèles de mobilité qui visent à répondre à des problématiques concernant la composante physique des déplacements uniquement, et les modèles dits « transports » qui permettent aux acteurs de transport de valider la performance de nouvelles infrastructures de transport, réglementation, plan de déplacement, etc. Le premier groupe de modèle physique de mobilité a pour objectif de répondre à la question « Quelles sont les mouvements (individuels ou flux de personne) sur un zonage spatial en s'affranchissant de toute dimension économique ? ». A l'inverse, les modèles de transports tiennent compte des phénomènes économiques au travers de l'offre et de la demande dans un contexte économique, social, démographique global afin de répondre aux questionnements « L'offre à dimensionner sera-t-elle adaptée aux prévisions de la demande en déplacements ? » et « De quelle manière ce réseau de transport futur impactera son environnement (économique, social, pollution, etc.) ? ». C'est sur cette deuxième famille que nous nous concentrerons car elle permet de répondre aux questionnements posés par les acteurs de l'offre de transport.

Ceci amène à la question suivante : pourquoi doit-on prévoir la demande afin de planifier les transports? Selon (BONNEL, 2004), il est nécessaire de prévoir la demande de déplacements afin de s'adapter le plus finement possible aux besoins d'une part, et pour répondre aux exigences sociales d'autre part.

Tout d'abord, la qualité des modèles de prévision de trafic est un enjeu fondamental afin de financer des infrastructures qui seront les plus rentables d'un point de vue économique et social. Dans le cas de partenariats entre le public et le privé, cette rentabilité repose entièrement sur le trafic prévu, et donc attendu, et celui qui sera effectif au terme de la fin de la période d'estimation. Les investissements en infrastructures de transport doivent être méticuleusement réfléchis en raison de leurs coûts. En 1997, la puissance publique a consacré près de 20% des dépenses d'investissements au domaine de transport (BONNEL, et al., 2000). Cela peut s'expliquer par le coût unitaire des infrastructures. En effet, en 2002 l'investissement d'une ligne LGV est supérieur à 3 milliards d'euros ; le tunnel sous la Manche coûta environ 15 milliards d'euros ; le montant d'implantation d'une autoroute est d'environ 7 millions/km en rase campagne, plus de 100 millions/km en milieu urbain dense et

d'environ 150 millions/km pour une infrastructure souterraine ; enfin une ligne de métro revient à un coût de construction compris entre 50 et 80 millions du kilomètre.

Ensuite, la construction d'infrastructures est un projet qui porte sur du long terme. En effet, en raison des coûts très élevés, la durée d'amortissement est comprise entre 15 et 25 ans. Il est intéressant que l'infrastructure ne soit pas complément saturée ou désertée à cette échéance. De même, la durée de construction est étirée sur quelques années. Les méthodes de prévisions à disposition se doivent d'être suffisamment précises pour que l'infrastructure projetée ne soit pas sous-utilisée, voire déjà saturée à son ouverture. De plus, les déplacements, et notamment les déplacements urbains, sont des systèmes complexes qui nécessitent une simulation évoluée pour faire ressortir leurs évolutions ou leurs dysfonctionnements. Néanmoins, lors de la prise de décision de modification de l'offre de transport, afin de résoudre une certaine problématique même locale, il est essentiel de prévenir des effets négatifs de cette nouvelle offre sur le périmètre d'étude, mais également sur d'autres portions du réseau qui pourraient se voir impactées défavorablement. Un des rôles des modèles de prévision est d'être en mesure de prévoir les effets d'évolution des caractéristiques d'un maillon sur l'ensemble d'un réseau. Effectivement, dans certains cas, des reports, même faibles peuvent fortement détériorer une situation fluide, y compris sur des zones à priori non concernées par l'aménagement envisagé. Par exemple, dans les années 1980, le modèle QuinQuin de simulation des besoins de financement en TC, a permis d'attirer l'attention des Autorités Organisatrices des Transports sur les dérives financières des réseaux TC (BOUF, 1989) (TABOURIN, 1989).

Mais, il est également important de se prévenir d'externalités, telles que la pollution atmosphérique ou sonore. De nombreux facteurs sont à prendre en compte pour le calcul des émissions polluantes (NICOLAS, 1996). L'interaction entre les différents facteurs accroit la complexité de la simulation. La prise en compte du résultat d'une telle simulation permet d'éclairer les décideurs sur la dynamiques des différents polluants et particulièrement ceux participants à l'effet de serre. De tels outils sont indispensables aux pays européens afin que ces derniers agissent dans le respect de leurs engagements internationaux, spécialement ceux de Kyoto.

Après, les indicateurs macro-économiques mettent en évidence la forte contribution des transports à l'économie nationale et l'indéniable interdépendance entre les transports et de nombreux secteurs économiques. En effet, les transports ne sont pas une fin en soi, mais ils permettent de réaliser des activités et de relier des points de production à des points de distribution. Les infrastructures de transports ont participé à façonner la répartition des activités sur un territoire. Evidemment, l'effet structurant des transports n'amène pas à lui seul l'essor économique, mais il joue un rôle d'accompagnement des mutations économiques et sociales (OFFNER, 1985) (PLASSARD, 1988).

Enfin, il apparait qu'en milieu urbain, le nombre de déplacements évolue peu. Cependant, les caractéristiques de la mobilité se transforment rapidement. La question de la définition de l'indicateur qui sera le plus pertinent pour décrire la réalité à observer se pose. Reprenons l'exemple proposé par (BONNEL, 2004) pour illustrer les enjeux de la prévision. Le nombre de déplacements en véhicule privé progresse de manière continue sous l'effet de

divers facteurs dont l'augmentation de la motorisation. La croissance va-t-elle garder le même rythme ? L'asymptote est-elle atteinte ? Sachant que la mobilité en véhicule privé et la motorisation sont reliés, doit-on en conclure que la mobilité en véhicule privé va croître inexorablement ? Une prolongation mécanique de ces tendances indiquerait un besoin gigantesque en infrastructure pour absorber la demande de déplacements en véhicules privés. Toutefois, une analyse des facteurs explicatifs du phénomène peut mettre en avant des inflexions de tendances. Ces derniers agissent sur la demande à plus ou moins long terme. (voir chapitre 2). En conclusion, l'organisation et le développement des transports doivent être planifiés. Cette planification doit s'appuyer sur des prévisions aussi fines que possible compte tenu des incertitudes pesant sur l'évolution de l'environnement économique et social et du rôle des transports dans notre société.

Afin de mieux comprendre l'évolution des objectifs de la planification des transports, nous consacrons le paragraphe suivant à un bref historique de la modélisation des déplacements qui met en relief les mutations significatives de la modélisation des transports.

1.1.2 **Evolution de la modélisation avec les objectifs de planification des déplacements**

Le but de ce paragraphe n'est pas de présenter la chronologie des différents modèles de transport, mais d'aborder les changements décisifs des outils de modélisation pour s'adapter aux problématiques de planification. Cette sous-section est une synthèse d'éléments tirés principalement des mémoires d'Habilitation à Diriger des Recherches de Patrick Bonnel (BONNEL, 2004) et de Konstantinos Chatzis (CHATZIS, 2013).

Les prémices de la modélisation des transports remontent à la fin du XIXème siècle grâce à une transposition de la loi d'attraction de Newton. Ce modèle gravitaire était employé pour estimer la demande de déplacement entre agglomérations. Le développement des modèles urbains sont plus récents et datent des années 1950 aux Etats-Unis. Par la suite, plusieurs développements ont vu le jour pour répondre aux différentes problématiques de besoin de modélisation des déplacements que ce soit sur le plan théorique ou sur les outils mis à disposition des modélisateurs. En effet, les modèles présentent deux aspects, celui de l'opérabilité et celui de la contribution sur le plan de formalisation des fondements théoriques de modélisation de la demande des déplacements. Les modèles désagrégés constituent une des avancées majeures du champ de la modélisation des déplacements. Les outils mis en place en France dès les années 1970 n'ont globalement pas été réformés, hormis l'étape d'affectation. Ces outils ont été conçus afin de répondre aux problématiques de cette époque en étant centrés sur le dimensionnement et l'évaluation de nouvelles infrastructures de transports. Ils apparaissent moins bien adaptés aux problématiques rencontrées aujourd'hui, car celles-ci privilégient une meilleure gestion des infrastructures existantes dans une perspective de développement durable (BONNEL, 2004).

Afin de mieux comprendre les phénomènes de modélisation, plaçons-nous dans une perspective qui envisage la modélisation comme « un processus de production ». Le produit est une modélisation basée sur des formalismes informatiques, les « matières premières » sont les enquêtes et les mesures de déplacements et les « moyens de production », c'est-à-dire les

logiciels et les moyens informatiques nécessaires à la production et à la mise en œuvre de la modélisation des déplacements urbains. Ces différentes composantes du processus de production incluent des acteurs institutionnelles et individuelles tels que des agences de planification des transports, des administrations, des bureaux d'étude privés, des compagnies de production de logiciels ou encore des universitaires, et des supports tels que des revues, des manuels ou des webinaires (CHATZIS, 2013).

Le processus de production de modèles de déplacements a évolué au fil des années. Aux Etats-Unis, les prémices de modélisation des déplacements urbains émergent pendant l'entre-deux guerres en raison de la popularité croissante de l'automobile qui concurrence de plus en plus les transports en commun (ABBOT, 2007). De 1910 à 1940, on assiste à la « proto-modélisation des déplacements urbains ». Ces modèles permettaient d'évaluer une largeur de voies optimale en fonction du trafic avec des pondérations selon le nombre de véhicules présents. En effet, pour faire face à la congestion, les questions suivantes se posent : faut-il élargir cette rue congestionnée ? De combien de mètres? Quelles dimensions donner à cette nouvelle infrastructure ? Les premiers à commanditer des enquêtes sont les sociétés de transport en commun afin de connaitre les origines et les destinations de leurs clients, sous forme de stations d'observation et d'enquêtes dans la rue. Les investissements se limitaient souvent à des élargissements ou des travaux d'amélioration pour renforcer la sécurité de la qualité de service. L'objectif était de « résoudre des problèmes en cours par des réalisations à court terme » (DUPUY, 1975).

Aux Etats-Unis, à la sortie de la deuxième guerre mondiale, face à la forte croissance de l'industrie automobile qui a entrainé une congestion, il est apparu qu'un investissement massif en infrastructures de transports était nécessaire. Ainsi, il a fallu évaluer et concevoir la pertinence de nouvelles infrastructures de façon rationnelle, par exemple le développement de nouvelles voies urbaines ou de métro, tout en gérant le volume important de crédit d'investissement mis à disposition. Pour ce faire, il est nécessaire d'accéder à une connaissance, même approximative, du nombre de déplacements qui vont transiter via cette nouvelle infrastructure. La rationalisation des choix d'investissement est illustrée par cette citation : « Seule la connaissance quantitative de ces grandeurs peut permettre, non seulement de trancher dans les choix d'investissement, mais de justifier de façon rationnelle les choix effectués. Puisqu'il s'agit de justifier l'emploi de fonds, la rationalité dominant sera de type économique. Elle permettra de mettre en regard des dépenses, des réalisations ayant une efficacité contestable » (DUPUY, 1975). Ainsi, nait un nouvel outil révolutionnaire, les enquêtes ménages déplacements ou EMD (home interview). Elles sont alors massivement déployées et permettent une cartographie extrêmement détaillée des pratiques de déplacement dans l'Amérique urbaine. Le comptage ne répondait plus aux besoins car il correspondait à des besoins à court terme en permettant une observation des comptages existants sur des infrastructures déjà déployées. Le comptage alimentait des méthodes de facteurs de croissance, qui extrapolent le trafic futur à partir du trafic existant. Cela ne semble pas idéal pour simuler un trafic d'échanges avec des zones dont l'urbanisation est en forte croissance, et n'était pas adapté au dimensionnement de nouvelles infrastructures. Une nouvelle problématique apparait, celle d'extrapoler le trafic entre deux zones à partir de leurs

caractéristiques sans passer par le trafic existant. Les premiers modèles de modélisation de déplacements, des extensions des modèles gravitaires ou de régression linéaire, sont développés dans les années 1950. Les phases de génération de distributions seront complétées par la suite par celle de répartition et d'affectation pour former le modèle à quatre étapes. La modélisation des déplacements urbains des personnes devient une activité centrale pour ingénieurs et décideurs politiques. Alors, les modèles sont exportés peu à peu vers la France. Après une phase d'acclimatation à cette nouvelle problématique de prévision décontextualisée et sur des objectifs à long terme, un virement sur le plan politique s'opère dans les années 1960. L'accentuation de la réflexion sur l'urbanisme couplée aux problèmes importants de congestion rencontrés par les grandes agglomérations de province, les difficultés de stationnement et la situation financière délicate des transports en commun amène une nouvelle ère de réflexion sur les modèles de trafic (DUPUY, 1975).

Ainsi, à partir des années 1970, on généralise l'utilisation des modèles dont la place est codifiée par la mise en place de nouvelles procédures de planification urbaine avec le vote de la Loi d'Orientation Foncière (LOF) en 1967. Elle a institué notamment les Schéma Directeurs d'Aménagement et d'Urbanisme (SDAU) (MARGAIL, 1989). De plus, un programme de recherche sur la socio-économie des transports est lancé et va déboucher sur une profusion d'approches et d'analyses sur la mobilité urbaine. Cependant, la crise énergétique et le renversement de la croissance économique induisent une nouvelle problématique. En effet, d'une part, l'attention est tournée vers les problèmes d'ordre social, psychologique, économique et écologique entrainant un glissement des recherches techniques pour répondre au problématiques techniques vers une recherche de réponses aux préoccupations concernant la qualité de vie (MARGAIL, 1989). D'autre part, l'Etat français se voit obligé de se désengager financièrement. Alors, bien que la lecture des prévisions indique des besoins d'infrastructure, ces dernières sont difficiles à réaliser en raison des montants financiers à mobiliser et de la défiguration des villes qu'ils engendrent. Dans ce contexte, les pouvoirs publics abandonnent la planification à long terme pour se concentrer sur la gestion du présent. Les politiques générales dérivent vers un objectif qui est de tirer le meilleur parti des infrastructures existantes. Ainsi, il faut prédire les nouveaux flux pour évaluer justement les différentes politiques d'aménagement du territoire en se basant sur le fonctionnement du réseau en place ainsi que sur l'environnement (émission, consommation d'énergies) et la société (avantages et désavantages pour des groupes sociaux spécifiques). Apparaissent alors dans les laboratoires de recherche américains des modélisations désagrégées et l'affectation à l'équilibre. Les modèles désagrégés tentent d'estimer des flux de déplacements à partir du comportement de l'individu qui souhaite « maximiser l'utilité de son déplacement ». Les recherches ont montré la multiplicité des facteurs influençant la mobilité. Néanmoins, la pertinence de cette nouvelle vague de modèles n'est pas convaincante et l'utilisation des modèles à 4 étapes demeure chez les praticiens. Ceci augmente le décalage entre les chercheurs et les praticiens.

A partir de 1980, l'Administration se retire de plus en plus du champ de la modélisation en se contentant d'actualiser les enquêtes ménages et en les adaptant aux nouveaux outils informatiques. Ce retrait du secteur public entraine la montée en puissance

du secteur privé. Les acteurs privés seront le vecteur principal du changement dans les pratiques de modélisation en France après 1980. La loi LOTI de 1982 renforce les effets de la décentralisation en matière de transports urbains par la promotion des PDU (obligatoires dès 1996). Ils montrent la volonté d'une approche globale des problématiques de déplacement dans une ville et non plus une focalisation sur l'automobile ou les transports en commun. Cela exprime la nécessité de connaitre les besoins de déplacements en fonction de l'organisation de la ville. Ces années marquent une situation de crise portée par trois effets. Tout d'abord, la crise des finances publiques limite les possibilités d'investissement en infrastructures. Ensuite, la congestion s'accroît et augmente le nombre d'heures « perdues » pour les usagers, entrainant une baisse de l'efficacité des systèmes de transport. Enfin, les nuisances environnementales s'accroissent et engendrent des besoins de réflexion sur la réduction des pollutions automobiles et la place des différents modes de transports dans le cadre du développement durable (BANISTER, 1998). Une nouvelle problématique de modélisation apparait. En effet l'objectif n'est plus tant d'assurer seulement l'écoulement des flux, mais d'assurer la gestion des déplacements à court/moyen terme (PDU) en tenant compte des orientations long terme (Schémas Directeurs) et des contraintes de développement durable. De plus, la notion de droit au transport entraine une attention orientée vers les besoins en déplacements à l'échelle des individus. Enfin, les actions apportées sont de moins en moins centrées sur la construction de nouvelles infrastructures mais sur la mise en place de politiques de déplacements qui doivent être mises en œuvre pour assurer une meilleure complémentarité et gestion des modes ainsi qu'une régulation de la demande de déplacements. Ainsi, on comprend la limite des modèles basés sur la succession des étapes suivantes : décision de se déplacer, choix de la destination, choix du mode et choix de l'itinéraire. De ce fait, les modèles ne peuvent restés monomodaux, ni négliger les phénomènes de réduction des modes motorisés et permettre de simuler des actions d'orientation de la demande comme des régulations tarifaires (BONNEL, et al., 6-8 décembre 1998). L'évolution des modèles implique celle des sources de données. A partir de 1990, l'arrivée des « Systèmes Intelligents de Transport » (ITS) va enrichir la famille de modèles en proposant de nouvelles techniques de prédiction qui tiennent compte de la dimension temporelle des phénomènes de trafic.

En conclusion, il apparait que le besoin actuel d'évaluation repose bien plus sur les politiques de déplacements que sur les infrastructures à proprement parler. Ainsi, les prochaines évolutions majeures de ces modèles reposeront-elles sur la disponibilité d'un nouveau référentiel de données? Les évolutions des problématiques induisent les évolutions des outils d'aide à la décision, et donc des outils de modélisations. La description de l'évolution des problématiques transports dans le chapitre 1 avait pour but de présenter les différents acteurs du domaine des transports pour les lecteurs les moins initiés d'une part mais également de favoriser une compréhension globale de ces dernières d'autre part. En effet, les outils de modélisations ont servi à mieux répondre aux problématiques posées à différentes époques. Ils ont évolué parallèlement à la compréhension de ces dernières. Les dernières recommandations par les acteurs de l'offre de transport en terme de besoin de modélisation de la demande de déplacements sont présentées dans le paragraphe suivant.

1.1.3 **Recommandations actuelles pour l'aide à la décision d'investissement**

Nous tirerons ces recommandations du rapport Quinet de 2013 (QUINET, 2013). Il propose une plaidoirie pour inclure des analyses socio-économiques pour les investissements publics et notamment dans le transport. En effet, l'évaluation socio-économique des investissements est une préoccupation permanente des pouvoirs publics car l'investissement public est un présenté comme facteur de croissance et de compétitivité. Il est garant d'une offre de service public de qualité, et doit ainsi être choisi avec une attention particulière pour concilier le développement et la maitrise des finances publiques. Les choix des investissements apparaissent aujourd'hui comme insuffisamment étayés, car les procédures d'évaluation et les processus de décision n'assurent pas toujours une hiérarchisation des projets et la mise en lumière de ceux qui seront les plus bénéfiques à la collectivité. Ce rapport reprend des recommandations des rapports précédents tels que le rapport Boiteux de 1994. Celui-ci appelait à favoriser le calcul économique pour mieux évaluer les projets d'investissement (DOCUMENTATION FRANCAISE, 1994). Il appelle à l'enrichissement devenu possible grâce aux avancées de la science économique dans les domaines tels que l'analyse spatiale les problèmes de gouvernance de l'évaluation et l'extension du calcul socio-économique au-delà de ses champs d'application traditionnels que sont le transport et l'énergie.

Les raisons d'une attention renouvelée à l'évaluation des investissements, dans le contexte économique actuel proviennent de plusieurs constats. Tout d'abord, notre économie connait des mutations importantes dans un contexte d'intensification de la mondialisation, d'émergence de nouveaux acteurs économiques, de nécessité de s'engager dans la transition écologique et énergétique et d'interrogations sur les formes et les outils de l'intervention publique dans un cadre où la régulation par la concurrence prend une place croissante. Dans ce contexte, la contrainte qui pèse sur les budgets publics s'alourdit. Les nombreux projets candidats à la réalisation dépassent de beaucoup les disponibilités financières, ce qui incite à scruter leur évaluation socio-économique. Les erreurs étant moins facilement « rattrapables », leurs conséquences sont plus graves. Il est impératif de pouvoir justifier les gains attendus de l'usage des ressources publiques et les pertes supportées, tous ces facteurs que le calcul économique est particulièrement apte à évaluer. De plus, cela entraine une baisse de compétitivité de notre appareil productif. De ce point de vue, le calcul socio-économique est un outil irremplaçable. Par essence, il évalue les gains de productivité permis par le projet pour l'ensemble du pays. Particulièrement, dans le secteur des transports, il permet une réduction des coûts généralisés pour les déplacements professionnels et pour les transports de marchandises. Néanmoins, en France, l'usage des analyses socio-économiques dans l'évaluation des projets est limité et non systématique dans le secteur des transports.

Tout d'abord, il faut assurer la qualité technique des estimations socio-économiques. Pour cela, il faut mettre à jour les valeurs numériques utilisées, dont beaucoup datent de près d'une dizaine d'années, afin de prendre en compte les évolutions et attentes de la société. Il est nécessaire aussi de préciser les modalités de leur utilisation pour les rendre plus homogènes et pour les adapter aux nouvelles situations. Il convient par la suite d'enrichir le

calcul socio-économique traditionnel en le faisant bénéficier des progrès de la connaissance économique dans plusieurs domaines où les attentes des décideurs sont fortes. Ensuite, des propositions d'améliorations portent sur la gouvernance des projets. Celle-ci a considérablement changé et se place dans un contexte de multiplication des acteurs dans le processus d'élaboration des projets, de complexification de la prise de décision à travers les débats publics et de pluralité des financements. Les procédures du calcul socio-économique n'ont pas totalement suivi ces évolutions auxquelles elles doivent maintenant s'adapter. Enfin, ces propositions doivent s'inscrire dans la perspective de la double transition énergétique et écologique. Celle-ci rend à la fois plus délicate et plus nécessaire l'élaboration d'une stratégie de long terme qui s'avère indispensable à l'évaluation des projets et qui en oriente les modalités de mise en œuvre.

Nous présenterons dans la suite de ce paragraphe deux axes majeurs d'amélioration proposés par le rapport en ce qui concerne les évolutions souhaitables des outils d'aide à la décision d'investissement en transport. Tout d'abord il s'agit d'assurer la qualité technique des estimations socio-économiques. Nous développerons quelques-uns des points techniques à actualiser comme les processus de détermination de trafic et certaines valeurs unitaires. Ensuite, l'évaluation des investissements doit en mise à jour en intégrant la contrainte pesant sur le budget public et la baisse de compétitivité de l'appareil productif.

1.1.3.1 Assurer la solidité des modèles pour l'aide à la décision d'investissements

Les modèles de trafic se placent au cœur de l'évaluation socio-économique. En effet, ces derniers fournissent la fréquentation de la nouvelle infrastructure. Par leur capacité de représentation de la fonction de demande et son interaction avec l'offre de transport, ils sont le socle de la détermination d'une large part des avantages apportés par le projet à évaluer, à la base du calcul socio-économique. Ainsi, il est nécessaire qu'ils soient fiables, robustes et emportent l'adhésion des décideurs. Or, avec le temps ces modèles sont devenus plus nombreux, de plus en plus complexes et de moins en moins lisibles, multipliant les variables utilisées, les paramètres et segmentant toujours davantage la demande, donnant de plus en plus aux utilisateurs de ces modèles le sentiment de « boîte noire ». Cependant, la vitalité des études dans ce domaine où la diversité et la complexité des modèles est inéluctable, permet une meilleure représentation du comportement. Les mises à jour peuvent se diviser en deux parties, d'une part elles concernent les processus de détermination des trafics et d'autre part des valeurs unitaires comme le temps et les nuisances. Nous consacrerons un troisième sous-paragraphe à des réflexions complémentaires au traitement des valeurs unitaires.

1.1.3.1.1 Améliorer les modèles de trafic

Nous commencerons par les suggestions d'amélioration des modèles de trafic concernant la modélisation de l'interaction entre l'offre et la demande. Tout d'abord, la modélisation ne prend pas toujours en compte la problématique du choix d'horaire de manière dynamique. Or, en situation de forte congestion, une des premières réactions d'adaptation d'un usager est de décaler son heure de départ ou de modifier son agenda

d'activités. Ensuite, les modèles de trafic devraient inclure des représentations de l'étalement aux heures de pointe mieux documentées, analysées et prises en compte dans les hypothèses de projections utilisées dans les modèles. Enfin, il semble intéressant de coupler des modèles de trafic et des modèles d'activité pour prendre en compte l'induction du trafic. L'induction du trafic, dans le sens de ce qui va créer le trafic, semble la partie la moins bien modélisée du processus. Pourtant, cette notion recouvre des phénomènes fondamentaux sur le plan de l'analyse économique, tel que le changement de localisations ou d'activités. Une solution théoriquement satisfaisante est accomplie dans les modèles représentant la relation entre le transport et les usages du sol (voir paragraphe 2.3).

De ce fait, la robustesse doit aussi être améliorée par de « meilleures » données, c'est-à-dire des données adaptées aux besoins de la modélisation. La représentation de la demande élève ses exigences, tant dans le détail géographique que dans la description des comportements. Ceci induit une contrainte forte sur la qualité des bases de données. Le progrès des bases géolocalisées est une réponse qui est déjà exploitée et devra l'être encore plus dans le futur. En revanche, le recensement des caractéristiques des flux n'évolue pas aussi favorablement, bien que le rapport du Conseil national de l'information statistique réalisé en 2007 sur les besoins en information sur les transports ait impulsé de nombreuses actions positives (BERNADET, et al., 2007). On constate depuis une vingtaine d'années une tendance à la diminution de la connaissance statistique en ce domaine, due partiellement, mais pas uniquement, aux contraintes de secret commercial. La question de la disponibilité de données de qualité minimale demeure particulièrement impactante pour les trafics de marchandises et pour les transports ferroviaires de voyageurs, y compris sur la connaissance des prix. Il conviendrait d'engager des actions fortes pour remédier à cette situation. Un état de l'art sur les sources de données disponibles est proposé dans le chapitre 4.

Enfin, la modélisation socio-économique des transports est fondée sur des fonctions d'utilité, ou des coûts généralisés (3.2.1). Ces fonctions d'utilité devraient tendre à inclure les variables reconnues comme représentatives des comportements. Tour d'abord, il apparait que les déplacements pour motifs touristiques et personnels, pourtant majoritaires, ne soient pas modélisés explicitement pour les projets urbains. De plus, les chaînages de déplacements, une pratique courante, mériteraient d'être introduits dans la modélisation. Cependant, des progrès réalisés par de nombreux modélisateurs dans la prise en compte de variables telles que le confort ou la fiabilité montrent les avancées de la recherche dans ces thématiques. Leur intégration dans le calcul est conditionnée par la disponibilité de statistiques capables de nourrir les modèles en niveau de confort et en connaissance des changements de la fiabilité. Le paragraphe suivant apporte des précisions sur certaines valeurs unitaires utiles pour décrire les comportements individuels des usagers.

1.1.3.1.2 Traitement des valeurs unitaires

Les non-linéarités dans les valeurs unitaires, les évolutions des valeurs du temps avec la distance de trajet sont des acquis récents de la recherche. Citons, le cas particulier des « constantes modales ». Elles représentent le différentiel d'utilité résiduel révélé par

l'étalonnage des modèles. Les constantes modales jouent souvent un rôle important dans la représentation des choix des usagers. Une de leurs fonctions est de traduire l'effet des variables non prises en compte actuellement par la plupart des modèles. Parmi ces variables, on peut évoquer par exemple le confort, la fiabilité ou la sécurité. Ces variables illustrent une connaissance imparfaite de certains phénomènes qui devraient donc se réduire au fur et à mesure de la prise en compte de ces phénomènes. Nous axerons la discussion autour des variables unitaires suivantes : la valeur du temps, le confort et la fiabilité.

La valeur du temps

La « valeur du temps » est une variable qui représente le coût, la pénibilité associée à un déplacement par un usager. Des valeurs de temps de « référence » sont utilisées dans la modélisation. Elles doivent dont refléter au mieux les comportements observés et donc être le plus proche possible des dispositions « à payer » des usagers. Ces valeurs de temps de référence pour les usagers correspondent aux valeurs moyennes observées au sein d'une clientèle, pour chaque segment de la demande, c'est-à-dire pour chaque motif de déplacement, chaque mode de transport et chaque classe de distance. Ainsi, elles permettent d'apprécier à priori des valeurs de temps moyennes d'usagers qui emprunteront *in fine* un mode en particulier (BOITEUX, juin 2001). Or, on remarquera que les valeurs du temps augmentent avec les contraintes et les modes de transport. Par exemple, la valeur du temps pour motif professionnel est globalement plus élevée que pour motif loisir. De même la valeur du temps augmente entre le mode routier, ferré et aérien. Ces deux augmentations sont issues de phénomènes différents. Tout d'abord, plus l'activité à l'arrivée est considérée comme importante pour l'usager, plus l'ajout d'une minute de transport supplémentaire est préjudiciable de son point de vue. La hiérarchisation des valeurs de temps par mode repose sur une différence de la clientèle de chaque mode. Ainsi, on remarque l'importance du caractère individuel dans l'estimation de la valeur du temps (LEURENT, Jul 1996).

Un tableau de valeurs recommandées pour la valeur du temps en milieu urbain est issu d'une synthèse de la littérature sur le sujet. Bien que les segmentations par modes et par motifs soient différentes d'une étude à l'autre, elles se recouvrent. Néanmoins, il existe une variabilité entre les différentes sources au cours des ans. En effet, les données issues de modèles de trafic ont tendance à s'avérer plus faibles que les valeurs observées au travers d'enquêtes car les modèles contiennent de plus en plus de variables explicatives des choix de mobilité. Typiquement, la multiplicité des variables explicatives a pour but de modéliser des effets fixes propres à chaque mode ou des effets de fréquence, de rupture de charge etc. Ceci peut entrainer une diminution des temps estimés via des modèles. D'un point de vue microéconomique, il est vraisemblable que la décroissance des valeurs du temps soient le témoignage d'une part, d'une diminution de la pénibilité du temps de parcours (grâce à une amélioration du confort par exemple) et d'autre part d'une augmentation de la productivité du déplacement lorsqu'il est possible d'effectuer une autre activité lors du déplacement grâce à la démocratisation de l'usage de terminaux mobiles (consultation de courriels, accès à des divertissements, etc.). Les valeurs de référence en milieu interurbain sont à prendre avec

précaution car d'une part la faiblesse de l'offre actuelle ne permet pas de disposer de modèles de trafic représentant les comportements observés à cette échelle, et d'autre part la rapide libéralisation de l'offre de transport devrait conduire à des modifications de celle actuellement proposée. Notamment, la libéralisation pourrait entrainer un confort plus important et donc des changements de segments de clientèle.

Enfin, on remarque sur la Figure 14 que les valeurs du temps varient selon les auteurs de la mesure.

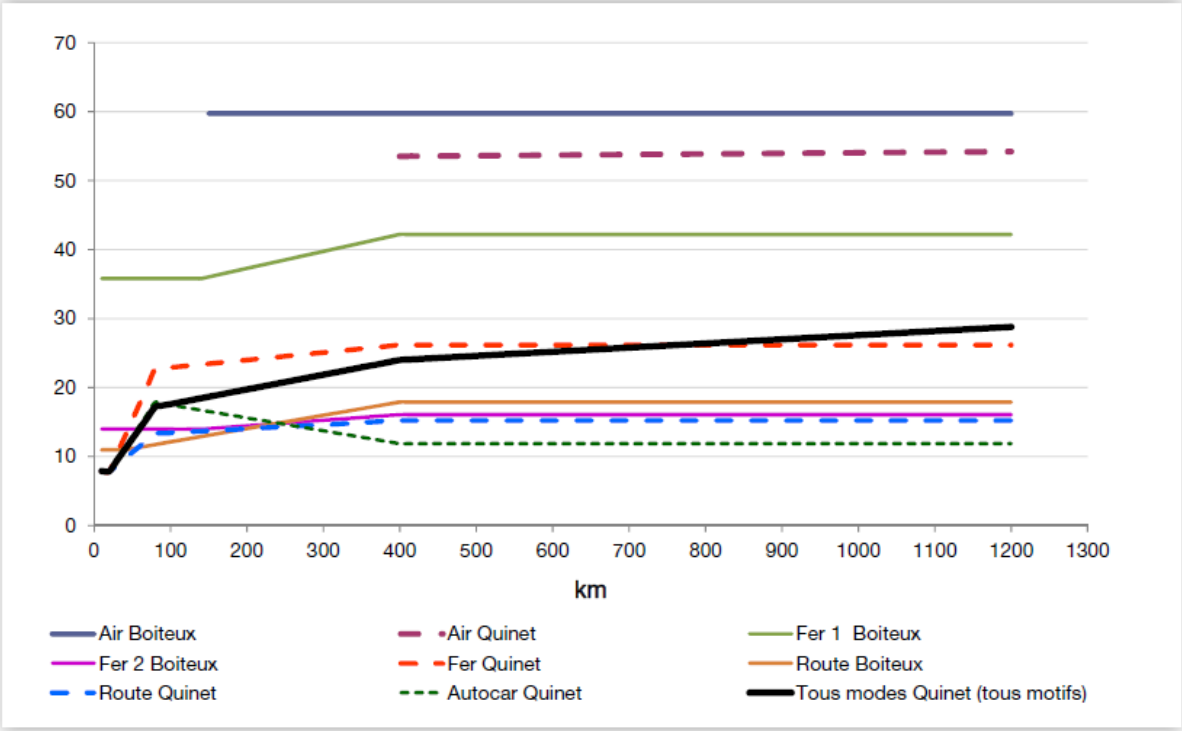


Figure 14 : valeurs du temps par mode selon la distance pour tous motifs (en euros/h) (QUINET, 2013)

Des travaux engagés pour l'actualisation de ces valeurs ont permis l'identification d'un point d'amélioration principal à prendre en compte pour de futures mises à jour : dans de nombreux travaux, la valeur du temps est une fonction croissante de la distance. On peut toutefois douter que cette relation fasse apparaître la causalité réelle et ne traduise pas autre chose qu'une corrélation. Il semble plausible que le facteur causal d'augmentation de la valeur du temps soit la durée du déplacement; la corrélation observée entre la valeur du temps et la longueur du déplacement proviendrait alors de ce que, pour un mode et une gamme de services donnés, la vitesse de déplacement est approximativement constante, mais cela fait partie des hypothèses à tester. En effet, une explication possible de constats tels qu' une perception d'un usager pour qui un trajet en train de 4 heures peut sembler plus « coûteux » que deux trajets de 2 heures, repose sur le fait que pour un mode donné circulant à une vitesse donnée la seule utilisation d'une « valeur du temps » revient à intégrer des éléments d'inconfort perçue individuellement.

Le confort et la fiabilité

Le confort et la fiabilité du temps de transport sont des variables importantes dans la fonction d'utilité des usagers des modes de transport. Une modélisation spécifique des variations de confort n'est pas nécessairement incluse dans tous les modèles. Des calculs de surplus sont parfois réalisés à l'aide de valeurs du temps de référence.

Le confort

La question de la valorisation du confort est un point nécessaire pour une analyse socioéconomique. En effet, l'amélioration du confort dans les modes de transport diminue la pénibilité, voire, lorsque d'autres activités sont possibles pendant le trajet, augmente la productivité du temps passé dans les transports. Pour un individu donné, le coût du temps de transport sera donc diminué avec l'augmentation du confort du mode emprunté et il devient possible de pondérer les caractéristiques du voyage en « équivalent temps de parcours » (LEURENT, 2008). Si un individu est indifférent au choix entre voyager une minute debout et prolonger à 5 minutes son temps de parcours, s'il lui est donné la garantie de voyager assis, alors en « équivalant temps de parcours » une minute debout vaut 5 minutes assises. La difficulté de l'estimation de l'influence du confort réside principalement dans son caractère multidimensionnel. En effet, des niveaux de confort peuvent être différents pour un même mode. Parmi la multiplicité des dimensions du confort, on peut citer le taux de remplissage des véhicules, la température, le bruit, l'ergonomie des sièges, la sécurité, la sûreté, etc. C'est ainsi que le confort ne varie pas seulement d'un mode à l'autre, mais il peut varier également selon le taux d'occupation et présenter des niveaux différents pour un même mode (par exemple entre les autocars de luxe et les autocars low-cost). Aujourd'hui, les enjeux en terme de confort sont les plus marqués dans les transports en commun. Par ailleurs, l'aspect le plus documenté dans la littérature académique est le confort comme faible taux de charge des véhicules. La grandeur majoritairement prise en compte pour qualifier le confort, tant que de plus amples recherches aient été effectuées sur les autres dimensions, est celle du nombre de passagers debout par mètre carré dans les transports en commun. En particulier, de nombreuses études proposent des valeurs monétaires pour la présence ou l'absence de grandes quantités de services (télévision, musique, surveillance, nourriture et boisson, etc.). Néanmoins, la robustesse de ces estimations pose question tout comme l'indépendance statistique des valeurs estimées pour chaque service et il est suggéré de laisser ce champ à des recherches ultérieures. Comme pour les temps de marche/attente/correspondance, il est d'usage d'appliquer des multiplicateurs du temps de parcours selon la pénibilité du trajet : plus le nombre de personnes debout par mètre carré est élevé, plus la minute de trajet est affectée d'une pondération élevée. En termes de procédé, l'utilisation de ces multiplicateurs d'inconfort dans les calculs coûts-avantages de projets devrait suivre la méthode suivante. Si sur une origine-destination-horaire (ODH), le projet envisagé n'impacte pas le niveau de confort moyen de chacun des modes de transport, alors les variations d'utilité mesurées à partir des variations de temps de parcours et de prix suffisent. Si sur une origine-destination-

horaire (OHD), le projet envisagé impacte le niveau moyen de confort d'un ou plusieurs modes de transport. Alors, le porteur de projet doit tout d'abord être en mesure de présenter de manière robuste quel sera l'impact du projet sur le niveau de confort du mode étudié (exemple: passage de 4 personnes par m^2 dans le métro). Ensuite, sur la base du trafic prévu par le modèle, les temps de parcours pourront être bonussés/malussés pour prendre en compte le confort, en suivant des valeurs de référence. On obtient ainsi des « temps ressentis », des équivalents « gains de temps » pour les passagers déjà sur le mode de transport et les trafics induits et reportés grâce à l'augmentation du confort. Néanmoins, cette méthode ne tient pas compte de deux phénomènes. D'une part, le nouveau trafic induit et reporté pourra conduire à dégrader le confort ressenti par les usagers, de sorte que le modèle parfait devrait « boucler ». D'autre part, le nouveau trafic induit et reporté permettra à l'exploitant du mode de transport de dégager davantage de revenus d'exploitation et donc d'améliorer la qualité de service, qu'il s'agisse de confort ou de fiabilité.

La fiabilité

La fiabilité du temps de transport est une autre valeur unitaire qui ne devrait pas faire défaut aux analyses socioéconomiques. La pénibilité des déplacements a tendance à augmenter avec le caractère aléatoire accompagnant l'heure d'arrivée des déplacements, qu'il s'agisse d'arriver en avance ou en retard. En effet, s'il est relativement intuitif que les individus sont plus défavorables au risque d'arriver en retard qu'à celui d'arriver en avance, arriver en avance peut aussi produire une désutilité : l'arrivée en avance se fait au détriment de l'activité qui était réalisée avant le départ, de même que le temps d'avance à destination n'est pas aisément convertible en temps productif. D'abord, le fait que la désutilité provienne du caractère imprévisible de la variation du temps de transport, la valeur de la fiabilité du temps de transport exclut donc l'ensemble des facteurs anticipés (traversée d'un bassin d'emplois congestionné, retards réputés « presque certains », etc.) et comprend uniquement les variations du temps de transport dues à des facteurs inattendus (accident, incidents matériels et d'exploitation, etc.). Par ailleurs, on devine intuitivement que la désutilité engendrée par le manque de fiabilité est d'autant plus importante que le motif du trajet requiert de respecter des horaires précis (trajets professionnels, trajets domicile-travail, livraison de marchandises périssables, etc.). Enfin, à niveau de fiabilité donné, les coûts associés à ce phénomène peuvent d'autant plus augmenter que la fréquence des services de transport est faible. Ces aspects demeuraient jusqu'à présent absents des évaluations socioéconomiques. Nous nous intéressons donc à la manière dont ils peuvent être valorisés. Les approches sont différentes selon que l'on considère des déplacements en véhicule particulier ou en transports collectifs. Dans le cas du transport en véhicule particulier, l'usager est capable de choisir l'horaire de départ qu'il souhaite. L'incertitude réside donc sur le temps de trajet. Les nombreuses études et recherches sur le sujet conduisent à proposer une prise en compte de l'irrégularité du temps de transport qui repose sur une mesure simple de la largeur de la queue de distribution des temps de trajet. Dans cette approche, on considère donc que les automobilistes n'anticipent les retards que par une connaissance de la médiane

des temps de trajet sur l'origine-destination-horaire et l'on fait l'hypothèse forte que les arrivées en avance ne sont pas dommageables. Dans le cas des transports collectifs, les services proposés à l'usager sont de deux types : les services basés sur le respect d'un horaire de départ et d'un horaire d'arrivée (comme l'avion ou le train interurbain) et les services basés sur le respect d'une fréquence de départ (comme le bus en milieu urbain). Pour une première approche, la commission estime qu'il semble suffisamment général de considérer que les services basés sur la fréquence sont aussi des services basés sur des horaires. Même si les usagers ne les consultent pas systématiquement. En effet, l'étude du STIF de 2006 (ROQUIGNY, 2013) montre qu'une approche « horaires » est utilisable sur l'intégralité des lignes de métro. Cette étude estime qu'à partir d'une offre d'un train toutes les 8 minutes, plus de 50 % des voyageurs arrivent à la gare sans référence à l'horaire des trains. Il est donc recommandé, pour les transports collectifs, de retenir une mesure reposant sur les écarts à l'horaire prévu d'arrivée.

1.1.3.1.3 Réflexions complémentaires

Dans ce paragraphe nous traiterons succinctement trois notions complémentaires à la prise en compte du comportement individuel : la notion d'habitude des usagers à un système de transport, la valeur de l'information au voyageur et le deshorage.

Premièrement, les valeurs du temps étant relatives à des comportements individuels, la notion d'usagers habituels ou inhabituels est importante pour la représentativité des mesures. Par ailleurs, soulignons que dans la pratique, il est difficile de savoir si les usagers d'un mode de transport anticipent ou non certains retards : le groupe des usagers étant composé d'habitués (que l'on peut supposer être au fait des perturbations récurrentes) et d'usagers occasionnels, la réalité est certainement entre les deux. De plus, il s'avère aussi compliqué de savoir quelle est la durée exacte des retards que les usagers habitués anticipent. Une hypothèse couramment posée est qu'en l'absence d'éléments précis sur ces sujets, une solution opérationnelle est de considérer que dans le cas des transports collectifs urbains (respectivement interurbains), les retards inférieurs à 5 minutes (respectivement 10 minutes) sont anticipés par les usagers et ne doivent donc pas être pris en compte.

Deuxièmement, de plus en plus d'études cherchent à déterminer la valeur donnée par les usagers à différents niveaux d'information en parallèle des exercices de valorisation du confort ou de la fiabilité du temps de parcours. En termes pratiques, on comprend bien que les situations d'inconfort ou de manque de fiabilité sont d'autant mieux surmontables par les usagers que le niveau d'information est élevé. En effet, dans les situations de pic de trafic, obtenir l'information sur le niveau de fréquentation du prochain véhicule arrivant en station ainsi que sur le suivant permet aux usagers d'adapter leur comportement en arbitrant au mieux entre temps d'attente et inconfort évité. De même, lors de perturbations du trafic, diffuser l'information sur la cause et la durée des retards génère l'empathie des usagers mais leur permet aussi d'adapter leur itinéraire, de prévenir leurs proches ou leurs collaborateurs, etc. Proposer des valeurs « de référence » associées à différents niveaux d'information est toutefois délicat car ces études proposent une valorisation de l'information qu'elle soit

correcte ou non, et supposent que les situations de retard ou de forte affluence ne sont pas chroniques. Dans l'attente des conclusions plus opérationnelles à partir de ces recherches, la commission, qui n'a pas souhaité proposer de valeur « de référence » associée à l'information, recommande néanmoins de favoriser la bonne information des usagers. Mettre en place des systèmes d'information apparaît effectivement comme un moyen efficace d'augmenter la satisfaction des usagers et l'optimisation des choix d'itinéraires à moindre coût.

Enfin, il apparait qu'approfondir la notion de « déshorage » faciliterait la compréhension des mécanismes de choix individuel des déplacements. Le concept de déshorage réside dans un ajustement (coûteux) des choix d'horaires des individus dont l'objectif est de prévenir de l'inconfort (par exemple en période de pointe dans les transports en commun), s'abstenir d'un retard, voire d'éviter une arrivée en avance. En pratique, l'existence du phénomène de déshorage explique notamment l'étalement des pointes de trafic : si l'on n'observe pas autant de congestion, c'est que certains individus s'adaptent en partant un peu plus tôt ou un peu plus tard…mais cela leur est coûteux (DE PALMA, et al., 2005). La principale difficulté pour prendre en compte le déshorage dans les analyses coûts-avantages est que l'on ne connaît pas, sauf enquête spécifiquement dédiée, les horaires d'arrivée préférés des individus.

1.1.3.2 Les recommandations d'enrichissement du calcul traditionnel

L'enrichissement du calcul traditionnel permet de mieux représenter la réalité économique et de répondre à certaines interrogations des parties prenantes au processus de décision. Pour ce faire, différents éléments seraient à intégrer dans le calcul socioéconomique. Parmi ceux-ci, on compte les effets spatiaux et les conséquences des pouvoirs de marché, fréquents dans les transports. Ces derniers permettraient de détailler certains effets que le calcul socioéconomique usuel résume en un seul chiffre et d'apprécier les effets distributifs des investissements à travers des modèles macroéconomiques (BRETEAU, 2011). C'est l'objet de l'analyse des mécanismes susceptibles d'altérer la propagation des effets sur les marchés du transport dans l'économie, que ce soit en les amplifiant ou en les atténuant, qui vont être déclinés par thèmes : concurrence imparfaite, effets spatiaux, effets macroéconomiques.

Les effets spatiaux des infrastructures ne sont pas représentés par le calcul économique usuel. Hors, dans certains cas de projets très importants, ils peuvent s'avérer significatifs et leur description est un sujet d'intérêt pour les décideurs pour tous les projets. Pour les appréhender, il faut donc faire appel à d'autres champs de connaissances. La suite s'appuie principalement sur les récents développements de l'économie géographique relativement aux externalités d'agglomération (COMBES, et al., 2012) et sur ceux des modèles LUTI (voir paragraphe 2.3). Ces effets intéressent non seulement l'évaluation du projet, mais aussi le dimensionnement de l'offre de transport (DE LAPPARENT, Avril 2013) (PRAGER, Avril 2013). On reprend deux grands piliers de l'économie géographique que sont d'une part les facteurs de localisation des activités liées à l'arbitrage entre rendements croissants et coût de transports, et d'autre part les effets d'agglomération résultant des

externalités positives de la proximité des activités. On prendra en exemple le cas des infrastructures urbaines.

En agglomération, les changements de localisation liés aux investissements urbains peuvent être appréciés soit de manière qualitative à travers des dires d'experts en économie géographique, soit en utilisant des modèles LUTI. Compte tenu du coût et des délais nécessaires à leur mise en œuvre, ceci ne peut être envisagé que pour de grands investissements urbains ou pour le test de programmes d'ensembles à l'échelle d'une grande agglomération. Il conviendrait alors de préférence de mettre en œuvre plusieurs de ces modèles, compte tenu de leur caractère encore expérimental. On pourrait ainsi comparer les conclusions de ces modèles et en tirer des fourchettes de résultats utilisées ensuite dans les évaluations socioéconomiques. Lorsque les modèles LUTI sont utilisés, il convient donc d'assurer leur cohérence avec le modèle de trafic, les principales sorties de chacun d'eux étant de même nature que les principales données d'entrées de l'autre. Les modifications d'implantation spatiale des populations et des activités conditionnent en effet l'ampleur et la distribution spatiale des trafics, et cette implantation spatiale peut, à moyen et long terme, être influencée par la réalisation du projet à évaluer. Le modèle LUTI peut en outre, quand sa conception le permet, fournir des informations non seulement sur la répartition spatiale mais aussi sur la répartition des effets selon les catégories socioprofessionnelles. La variété des architectures des modèles LUTI (Land-use Transport Interaction), chacune possédant ses avantages et ses limites, ne permet pas de préconiser tel ou tel modèle comme étant « plus adéquat » ou « meilleur » qu'un autre et conduit à prévoir des précautions d'emploi.

1.2 **Exemples de problématiques actuelles**

Ce paragraphe a pour but d'illustrer les propos tenus jusqu'alors dans ce chapitre au travers d'exemples sélectionnés de problématiques rencontrées par les acteurs du transport. Les exemples sont centrés autour de la transition écologique pour la ville durable car c'est une problématique majeure des recommandations actuelles à la fois pour le transport et l'urbanisme. De plus, on constate que malgré des progrès techniques et de savoir-faire, les outils et les référentiels simples et accessibles nécessaires pour traiter de tels sujets font défaut. La part des transports dans « l'éco-conception » des villes se place sur l'analyse du cycle de vie des infrastructures de transport et leur impact, sur l'agencement des bâtiments et des transports et la régulation de leur usage pour une protection optimisée de l'environnement. Ainsi, une partie des exemples présentés dans ce paragraphe ne portent pas sur la création d'infrastructures, mais sur des politiques de régulation pour cadrer avec les évolutions des problématiques actuelles. Nous avons choisi des exemples sur des thématiques de réduction des pollutions environnementales et l'amélioration des « pertes » en temps de transport sans relocalisation des zones d'activités. De plus, nous avons vu qu'une des évolutions principales dans le domaine des transports est la prépondérance des efforts d'exploitation par rapport aux efforts de construction. Il demeure cependant un manque de stabilité des modèles économiques pour accompagner cette translation en raison de la complexité des systèmes de transport et d'occupation des sols. Apparait alors le besoin

d'outils d'aide à la compréhension des mécaniques de leurs fonctionnements et de stratégie de gestion allant dans le sens du développement durable. Ces outils doivent tenir compte aussi bien des impacts sociaux et environnementaux que des impacts économiques.

Nous séparerons ces exemples en deux parties. Nous débuterons par des exemples de planification où les paramètres de la mesure de régulation, ainsi que les impacts de cette dernière sont estimés. Ensuite, nous traiterons d'une deuxième série d'exemples appartenant à l'exploitation.

1.2.1 **Exemples de problématiques de planification**

Nous présenterons trois exemples de problématiques relatives à la planification. Les deux premiers sont la mise en place de filtres de régulation d'usage d'une zone. Le premier porte sur la réduction des impacts environnementaux en filtrant l'accès de certaines zones aux véhicules les moins polluants. Le deuxième exemple traite des péages urbains. Enfin, dans le but de réduire la saturation en heures de pointe, il est proposé d'étaler les horaires de départ des déplacements pendant cette période en modifiant la temporalité des activités, notamment des activités professionnelles. Chacun des exemples introduit le contexte ayant abouti au besoin d'une telle mesure, la description de l'action de régulation en elle-même et un recensement non-exhaustif des données requises pour planifier la mesure.

1.2.1.1 Les ZAPA

La loi Grenelle 2 offre aux communes ou regroupement de communes de plus de 100 000 habitants la possibilité d'expérimenter des Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air (ZAPA) lorsqu'une mauvaise qualité de l'air est constatée. L'Ile de France est particulièrement concernée par des dépassements des valeurs de pollutions atmosphériques. Un projet lancé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) en 2010 s'est appuyé sur une modélisation des impacts sur les émissions de polluants atmosphériques et la qualité de l'air. Les bras de leviers principaux pour réduire la pollution sont le trafic routier et la mise en place d'un périmètre d'interdiction de circulation aux véhicules les plus polluants (ZAPA, novembre 2012).

Ce projet était composé de plusieurs étapes. Premièrement, il s'agissait de faire un état des lieux des émissions qui servira de référence. Ensuite, il fallait trouver les configurations les plus intéressantes. Les « bénéfices », en terme de réduction de polluant, étaient maximisés tout en minimisant le coût (réduction de véhicules et kilomètres impactés). Il s'agissait d'une étude de sensibilité. Pour évaluer ces scenarii, une modélisation des concentrations de polluants était nécessaire, mais également du trafic en raison du rapport cause à effet qui les relie. L'impact selon différents scenarii a été estimé à l'horizon 2015. Et elle a permis de hiérarchiser les scenarii selon le rapport coût/bénéfice. Troisièmement, il s'agissait d'étudier l'impact sur les émissions et la qualité de l'air des scenarii obtenus dans l'étape précédente.

Certains paramètres, tels que la connaissance du parc de véhicules, le trafic, les reports modaux et les reports d'itinéraires, ont dû être affinés. Une connaissance fine du parc de véhicules est nécessaire car le taux d'émissions dépend du type de véhicule. Ainsi, des

bases de données établies à l'échelle nationale ne reflètent pas nécessairement les particularités du parc francilien. Une modélisation fine du trafic est imposée par les multiples évolutions de comportement possibles dans une zone réglementée « ZAPA ». En effet, les automobilistes qui effectuent un transit à travers une ZAPA présentent des variabilités de possibilités de comportement. Les automobilistes en transit par une zone ZAPA peuvent choisir de maintenir leur déplacement et leur itinéraire sous réserve de renouveler leur véhicule si celui-ci est interdit par la ZAPA. Sinon ils peuvent conserver leur véhicule et doivent alors adapter leur itinéraire pour éviter le périmètre ZAPA ou encore effectuer un report modal. Comment modéliser l'impact des différents scenarii sur le trafic routier ? Les paramètres individuels du modèle, comme le taux de renouvellement d'équipements, doivent être suffisamment fins dans le temps et dans l'espace pour accéder aux impacts environnementaux.

1.2.1.2 Les péages urbains

Un péage urbain impose à l'automobiliste le paiement d'une taxe pour accéder ou circuler dans certaines zones urbaines. Ainsi, les péages urbains permettent soit de financer une infrastructure routière, soit de fluidifier le trafic, soit de réduire les nuisances environnementales. A la différence des zones à faibles émissions européennes (Low Emission Zones (LEZ)), où sont interdits de circuler les véhicules les plus polluants, le péage urbain, quant à lui, taxe tous les véhicules circulant sur un axe ou dans un périmètre donné sans critère sur leurs émissions polluantes (sauf expérimentation à Milan).

Pour toutes villes, la mise en place d'un péage de cordon ou de zone réduit le trafic de 15 à 85%. Pour la majorité des villes qui ont mis en place des péages de cordon ou de zone, l'offre et la demande de transports en commun a augmenté. Ceci ne s'applique pas pour les péages d'infrastructure. Pour les péages d'infrastructure, l'impact sur le trafic est variable selon le cas.

Les impacts environnementaux sont rarement étudiés, d'une part parce que la réduction des nuisances environnementales n'est généralement pas l'objectif principal des péages urbains, et d'autre part en raison de l'importance des moyens à mettre en place pour les évaluer. L'étude montre qu'il reste aussi à déterminer les bons indicateurs d'évaluation, éventuellement différents des polluants traditionnellement suivis dans le cadre de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air [Etat de l'art sur les péages urbains: Objectifs recherchés, dispositifs mis en œuvre et impact sur la qualité de l'air, ADEME, Service Evaluation de la Qualité de l'air, juin 2014]

1.2.1.3 La désynchronisation des déplacements

Ces dernières années ont montré une effervescence autour des projets tentant de coordonner les horaires de travail à l'échelle des territoires. Cette désynchronisation des déplacements a pour but de réduire la congestion aux heures de pointe. Une théorie encourageante qui pourtant ne se tient pas à la hauteur de ses promesses sur le terrain. Une explication viendrait de l'individualisation accrue des schémas d'activités quotidiennes. La

congestion observée dans les grandes agglomérations provient de la simultanéité des mobilités domicile–travail (ORFEUIL, 2005). Les heures de pointe dans les grandes agglomérations françaises suivent une tendance d'intensification au moment de l' « hyperpointe » (approximativement 8h45 / 18h30 en région parisienne et 7h45/17h30 dans les autres agglomérations) (LAVIELLE, 2008) malgré une dispersion plus importante des horaires de travail (SAUTORY, 2013). Ceci entraine un mécontentement accru des usagers des réseaux de transport dans cette ère numérique où l'usage des technologies d'information et de communication alimente le besoin de l'optimisation du temps (ROSA, 2012), (LIPOVETSKY, 2006). Le plus souvent, la problématique de saturation est gérée via un aménagement de l'espace. Même si la dimension temporelle est prise en compte dans la planification, c'est principalement au travers d'un accroissement de la vitesse. La notion de chronologie des déplacements n'est que rarement considérée, ou alors sur des périmètres particuliers et limités. Des décalages des horaires de travail à l'échelle d'une métropole ont été tentés dans les années 1950-1960 à Paris, Dijon et Strasbourg, mais sans aboutir au succès escompté (PATURLE, et al., 1977). Aujourd'hui, des opérateurs de transport ramènent à nouveau dans le débat public une proposition d'aménagement des horaires de travail. Celle-ci se veut collaborative et à l'échelle urbaine dans un contexte multi-objectifs (sociaux, économiques et environnementaux). Un exemple de réflexion avec les entreprises de la Plaine Saint-Denis est initié par la SNCF (LE PARISIEN, 28 mars 2013) (LE FIGARO, 28 mars 2013) (L'HUMANITE, 29 avril 2013). Ce projet préconise des horaires de travail moins concentrées afin d'harmoniser l'usage du réseau ferré.

En accord avec les transporteurs et les présidents d'universités, les villes de Grenoble, Poitiers, Montpellier et Rennes ont instauré depuis 2000, un décalage du début des cours compris entre 15 et 30 minutes. Les résultats pour les deux parties sont encourageants. En effet, l'offre de transport étant stabilisée, des investissements pour dé-saturer le réseau à l'heure de pointe sont économisés (3 rames épargnées à Rennes). De plus, la diminution du taux de charge aux heures de pointe améliore le confort des usagers sans qu'ils ne semblent rencontrer de désagréments par les modifications des horaires (NANGERONI, 23 avril 2013). Une réorganisation des dynamiques horaires des déplacements domicile-travail serait-elle une politique de régulation adaptée ? Cependant, les bases théoriques de la gestion des temporalités n'ont pas encore été posées (BOULIN, 2008). Quels sont les outils nécessaires pour planifier une organisation efficace des horaires de travail ? Quel en sera l'impact pour les différents acteurs ?

Basé sur différentes investigations dans le domaine des activités de production, (MUNCH, 2014) propose des conditions assurant l'efficacité des politiques d'aménagement des horaires de travail au sein des entreprises. Tout d'abord, les décalages par rapport aux horaires initiaux ne doivent pas être trop importants, afin ne de pas impacter le schéma horaire des activités économiques et sociales. Des écarts compris entre 15 et 30 minutes sont recommandés et semblent garantir un impact significatif sur les réseaux de transport. Ensuite, il apparaitrait que la planification des nouveaux horaires devrait provenir de réflexions auxquelles salariés et employeurs prennent part. De plus, la probabilité pour une entreprise d'adopter ces mesures est proportionnelle à sa masse salariale. Enfin, agir sur la variable

temporelle avec le maximum de liberté implique une réduction des complexités des interactions et de l'environnement dans lequel s'opèrent les horaires.

L'ensemble des acteurs (employés et salariés) ne sont pas impactés de manière homogène par de telles mesures. Ainsi, l'harmonisation des flux aux heures de pointes est bénéfique aux opérateurs de transport. Sera-t-il possible de trouver des rythmes horaires de travail dont l'objectif collectif d'étalement des heures de pointe rejoint les objectifs individuels de l'ensemble des actifs ? Il n'en demeure pas moins que la question de la dimension temporelle, en termes de chronologie des activités et aménagement des horaires de départ semblent être devenue la nouvelle dimension d'action, l'espace en milieu urbain se faisant de plus en plus rare.

1.2.2 **Exemples de problématiques d'exploitation**

Le dernier exemple de désynchronisation des déplacements domicile-travail montre bien que les opérateurs sont à l'initiative de divers projets pour désengorger leurs réseaux. Certaines de ces actions se situent dans le domaine de la planification, mais souvent des actions sont à mener dans le cadre de la gestion de l'exploitation. Les opérateurs ont alors besoin de connaitre l'impact quantifié de ces mesures pour qualifier les estimations et/ou ajuster les prochaines planifications, ou encore constituer des bases de données pour qualifier les comportements des usagers dans certaines situations. Cette notion de validation des estimations des modèles s'applique également pour les autres acteurs de l'offre. Dans le cadre de la gestion du trafic routier, les opérateurs peuvent agir sur différentes variables d'action pour limiter les impacts sur le trafic. Nous donnerons des exemples tirés de (AGUILERA, 2013). Cs derniers proposent des solutions pour limiter les impacts des phénomènes récurrents de congestion, car ces derniers sont prévisibles. Nous donnerons trois exemples leviers de régulation que sont la modulation de la vitesse, la modulation de la capacité et la modification de la structure temporelle de la demande et des choix d'itinéraires des usagers. Ces mesures permettent des translations dans le diagramme fondamental. Le diagramme fondamental traduit les relations qui existent entre les variables décrivant le flot des véhicules à savoir le taux d'occupation, la vitesse et le débit. Des précisions sur ce diagramme et son usage seront développées dans le paragraphe 2.4.1. La tarification de la congestion semble également une variable d'action bien qu'elle ne soit que très rarement appliquée en France en milieu interurbain. Nous ne traiterons donc pas cet exemple.

1.2.2.1 **Régulation du trafic par modulation de la vitesse**

Parmi les éléments de contrôle à disposition des exploitants des réseaux routier, la vitesse maximale autorisée semble une variable intéressante car elle permet de translater le taux d'occupation critique sur le diagramme fondamental et d'adoucir la dynamique des ondes de freinage. L'abaissement de la vitesse pour une application à la régulation du trafic est une idée récente. Elle permet d'étaler la congestion sur les parties amont d'un corridor principal. Particulièrement, pendant les périodes estivales, ce type de mesures est appliqué sur les

autoroutes françaises A7 et A9. En effet, en été des pics allant jusqu'à 165 000 veh/j sont observés sur ces autoroutes qui accueillent en moyenne 75 000 veh/j. Ce système de régulation conçu par l'ASF (Autoroutes du Sud de la France) repose sur un modèle d'écoulement de trafic de sorte à anticiper le risque de bouchon 30 minutes à l'avance. L'ajustement de la limite de vitesse se fait dynamiquement par paliers successifs (110km/h, 90km/h, voire 70km/h). Les usagers sont informés en temps réel de la nouvelle limite de vitesse via les panneaux à messages variables (PMV) et/ou par la radio autoroutière. L'opérateur reporte des résultats prometteurs. Les conducteurs respectent à 90% la limitation à 110km/h, les débits en heure de pointe sont accrus de 15 à 20% et les volumes d'encombrement et le nombre d'accidents sont réduits de 20 à 30% (AGUILERA, 2013). Il s'avère que modifier dynamiquement la vitesse autorisée selon les conditions de circulation n'est pas une mesure récente. En effet, le code de la route impose des limites différentes selon les conditions météorologiques et des mesures d'abaissement de vitesse sont souvent pratiquées dans les aires urbaines en cas de pollution de l'air.

Afin de réduire les émissions polluantes des véhicules, diverses mesures de réduction de la vitesse maximum autorisée sur les axes routiers sont proposées (COHEN, et al., 1998). Cependant, plusieurs aspects comme l'accélération ou la décélération et le type de véhicule, sont à prendre en compte en plus de la vitesse moyenne pour quantifier les émissions (BROEKX, et al.). De plus, les données statistiques de vitesse ne sont pas, dans la plupart des cas, segmentées selon des facteurs influençant les émissions tels que le moment de la journée, la taille de la ville ou de la zone d'étude, les origines et destinations des déplacements et le type de véhicule. Or, la dispersion autour d'une valeur moyenne de vitesse selon ces paramètres est très importante. En moyenne, sur les modèles couramment employés, la qualité de l'estimation des émissions peut être impactée de 30% (ANDRE, et al.). Comment alors qualifier l'efficacité des politiques de réduction de vitesse au regard des émissions polluantes. Des mesures de la qualité de l'air peuvent être déployées. Mais, comment obtenir la corrélation avec le trafic, et sa typologie, au moment de ces mesures ?

1.2.2.2 Régulation du trafic par modulation de la capacité

La congestion est un phénomène ponctuel à l'échelle du réseau. Elle se produit lorsqu'à un instant donné, sur un tronçon ou une intersection donné, la demande excède la capacité. L'usage des intersections peut être régulé par différentes stratégies de gestion des intersections. La gestion des tronçons peut passer soit par une régulation de l'accès soit par une allocation dynamique des voies. Tout d'abord, la régulation d'accès d'un axe principal est mise en place pour que le taux d'occupation de ce dernier n'atteigne pas le seuil critique et continue de fonctionner dans un régime stable. Les bretelles sont alors utilisées comme zones de stockage temporaires. Une régulation multi-accès assure une égalité entre les usagers. Dans la pratique, la réalisation se fait via des feux de circulation aux bretelles d'accès. L'alimentation du système doit se faire idéalement en temps réel, à partir le plus souvent des boucles de comptage implantées dans la chaussées. Lorsque ce type de données est

indisponible, une régulation statique à partir de données historiques est mise en place (AGUILERA, 2013).

Ensuite, l'allocation dynamique des voies se base sur l'idée d'adapter localement l'offre à la demande par le biais de voies réversibles, en utilisant les bandes d'arrêt d'urgence ou en réservant certaines voies à des types de véhicules (véhicules à taux d'occupation élevé, taxis, etc.). Le principe des voies réversibles est d'affecter dynamiquement à l'aide de signaux d'affectation de voies la/les voies centrales dans un sens ou dans un autre. Ce dispositif équipe différents ponts et tunnels (WOLSHON, et al., 2006). Lors de forts trafic, et si les conditions de sécurité le permettent, la Bande d'Arrêt d'Urgence (BAU) est transformée en voie auxiliaire. Comme pour les voies réversibles, l'ouverture et la fermeture de la voie sont indiquées par des systèmes de portiques et de signaux lumineux. La question de l'encombrement potentiel de la BAU par un véhicule en panne pose problème et nécessiterait une télésurveillance par caméra-vidéo, afin de garantir la sécurité du trafic. Des systèmes de détection d'infraction le plus fréquemment déployés sont des radars dédiés. Une solution différente a été implantée sur le tronçon commun A4-A86 en Ile-de-France. Les sections de l'A86 sur 2 voies et de l'A4 sur 3 voies se rejoignent sur une section commune à 4 voies entrainant des saturations ponctuelles avec une impossibilité d'élargir la voie en raison d'un coût de 20 millions d'euros pour 2km. L'ouverture de la BAU propose une solution alternative à un aménagement lourd de l'infrastructure. La BAU retrouve sa fonction en dehors des heures de pointe. Une solution de barrière amovible pour prévenir du non-respect des heures de fonctionnement en BAU a été mise en place. Jusqu'alors le système n'a pas démontré de qualités opérationnelles en raison de la fragilité des barrières qui impose de longues périodes d'indisponibilités.

Lorsqu'un opérateur actionne des mesures de désengorgement sur une portion de son réseau, il peut apprécier son efficacité sur cette portion. Néanmoins, quant est-il de sa quantification ? Y-a-t-il des solutions plus efficaces en terme de trafic écoulé ? Ce dégorgement local impacte-t-il d'autres portions de son réseau, voire d'autres modes ? La nécessité d'une vision globale et quantifiable en termes de flux écoulés semble nécessaire pour répondre à de telles problématiques.

1.2.2.3 Régulation du trafic par de l'information dynamique aux usagers

Le but *in fine* de la mise à disposition d'une information dynamique aux usagers par les exploitants est d'agir sur les choix des caractéristiques de déplacements de ces derniers. En particulier, les exploitants cherchent à inciter les usagers à décaler leurs horaires de départ ou à modifier leur itinéraire. En premier lieu, les informations aux usagers sont restituées via la signalisation fixe. Il s'agit d'une information statique. Cette signalisation directionnelle a pour but le guidage des usagers dans de bonnes conditions de confort et de sécurité depuis leur lieu de départ jusqu'à leur destination. Cette signalisation qui repose sur le principe "sans ambiguïté" privilégie par construction l'unicité d'un itinéraire entre une origine et une destination. Ce dernier est appelé itinéraire exploitant. En situation de congestion, ce dernier

n'est pas forcement optimal pour l'usager. Les opérateurs proposent, par exemple pendant les grandes migrations saisonnières ou en cas de travaux, des alternatives à cet itinéraire. Cette alternative est appelé itinéraire Bis. Les usagers sont invités à emprunter cet itinéraire Bis via de la signalisation temporaire, les Panneaux à Messages Variables (PMV) ou la radio. La signalisation dynamique ne peut s'appliquer que pour les réseaux suffisamment maillés, instrumentés et congestionnés. Il s'agit de manière largement majoritaire des réseaux urbains. Par exemple, cette mesure de régulation est en application sur les voies rapides d'Ile-de-France. Le système de gestion de trafic en temps réel qui permet cette résiliation s'appelle SIRIUS. La première source d'information dynamique aux usagers fût la radio (AGUILERA, 2013).

Jusqu'aux années 2000, l'information provenait quasi-essentiellement des opérateurs. L'avènement des communications sans fil a modifié cette tendance. De plus en plus d'usagers ont accès à un ensemble de sources d'informations trafic réduisant de plus en plus la part de l'opérateur en tant que source.

La modification des tarifications des péages en fonction des heures de pointe est également une action qui tend à modifier le choix des caractéristiques du déplacement d'un usager.

1.3 **Conclusion**

Les problématiques d'aménagement, de planification et d'exploitation des systèmes de transport ont muté au cours des années. Ce paragraphe a montré que cela a entrainé une évolution des objectifs de la planification des déplacements. En effet, une des tendances majeures d'évolution dans le domaine des transports concerne une orientation majoritaire sur les problématiques d'exploitation plutôt que sur celles de construction de nouvelles infrastructures dans un contexte de contraintes budgétaires et spatiales (PEUPORTIER, 2013). Deux thématiques d'évolution ressortent. Tout d'abord, l'évaluation de politique de déplacements et d'investissements en infrastructure doit se structurer dans une approche globale. En effet, le sous-système des transports ne peut être traité indépendamment des autres sous-systèmes qui constituent le territoire. Le sous-système de transport permet de relier à la fois les lieux d'activités entre eux, et les centres de productions avec les centres de distributions de marchandise. De fait, les problématiques de transport s'inscrivent du fonctionnement du système économique d'un territoire. L'effet structurant des transports portent également sur l'aspect social. Enfin, au cœur des volontés de développement durable, la prise en compte des impacts environnementaux sont à considérer. Or la complexité des systèmes de transport et d'occupations du sol entrainement des besoins de connaissances approfondies de leurs mécaniques de fonctionnement et des stratégies de gestion. Des modèles proposant une simulation des interactions entre transport et usage du sol sont apparus. Ils proposent des évaluations d'aménagements spatio-temporelles autour des schémas d'activités individuelles. Ils nous permettent d'introduire la deuxième thématique d'évolution, celle d'une meilleure connaissance des comportements individuels. En effet, la distribution des activités sur un territoire entraine une demande de déplacements entre ces

différents lieux et réciproquement la capacité d'accéder à un lieu d'activité influence sa fréquentation. Cependant, chaque individu pondère les attributs qui fixeront son choix de déplacements de manière propre selon ses caractéristiques personnelles (âge, niveau de revenus, etc.) et selon son schéma d'activités, composé d'activités obligatoires (travail, étude) et optionnelles dont les contraintes spatio-temporelles présentent plus ou moins de souplesse (horaires fixes de travail, horaires d'ouverture des magasins, etc.). Ceci fait ressortir des besoins de travaux sur les référentiels de valeurs unitaires (temps, confort, etc.) qui sont des composantes économiques individuelles, d'une meilleure compréhension des chaînes de déplacements corrélées aux schémas d'activité et également une mutation des politiques d'aménagement de l'espace vers des aménagements des temps (problématique des choix d'horaires de départ).

Ce bilan dressé par les acteurs de l'offre de transport et de l'aménagement du territoire montre des besoins d'évolution des outils d'aide à la décision, notamment concernant les modèles de prévision de trafic. Le paragraphe suivant propose une description des outils classiquement utilisés par les aménageurs, les planificateurs et les exploitants.

2 Revue des principales familles d'outils utilisés dans les études transports

Le but de ce paragraphe n'est pas de proposer un état de l'art des différents outils, et notamment des modèles, qui permettent des évaluations ou des simulations sur lesquels s'appuient des études et des analyses en transport. Ce paragraphe doit permettre de répondre aux questions suivantes : Quels sont champs d'application de cette famille de modèles ? Quel est, dans les grandes lignes, le principe de modélisation et comment utilise-t-on ce modèle ? Quels sont les besoins en terme de données de référence ? La nécessité d'alimenter ces modèles nous amène à la question de la production des données. Ce sujet sera traité dans le premier chapitre de la partie suivante (chapitre 4). En effet, la production de données sous forme de mesures de déplacements est l'objet central de la thèse. L'analyse critique de la production de données dans une perspective des différentes applications présentées ci-après, appartient à l'état de l'art des mesures de déplacements. Notamment, nous n'expliciterons certaines des équations de formalisations mathématiques que lorsqu'elles facilitent la compréhension des méthodes.

Nous structurerons ce paragraphe de la manière suivante. Tout d'abord, la multitude des paramètres influençant un déplacement, et de manière agrégée l'ensemble des déplacements sur des réseaux de transport, ainsi que l'inscription dans le territoire de ces derniers, implique une complexité de modélisation. De plus, la variété d'acteurs et d'échelles spatio-temporelles entraine une diversité des objectifs de la modélisation. Le choix des outils se fait selon les objectifs et les enjeux de l'étude. Ainsi, il existe différentes familles de modèles pour apporter des évaluations adaptées. De plus, les outils de modélisation et de simulation des transports ont plusieurs finalités. Ils peuvent être utilisés pour des besoins de planification, de gestion ou de contrôle, mais aussi en tant qu'aide à la décision ou d'aide à la

mise en œuvre de stratégies, ou encore pour des applications théoriques. En conséquence, le premier paragraphe propose une classification des modèles de prévision basée sur une approche systémique de l'urbaine que l'on emprunte à (BONNEL, 2004). Il existe quatre grandes familles de modèles et simulations en transport : les modèles de demande de déplacements, les modèles d'occupation du sol, les modèles de gestion du trafic, de la demande et des réseaux multimodaux et les modèles de trafic pour différents modes (véhicule privé, bus, transport en commun, piétons) et différentes échelles (microscopique, mésoscopique et macroscopique). De cette classification découle la suite du plan. Nous débutons avec les modèles de demande, plus particulièrement avec la méthode classique « à quatre étapes ». Le déséquilibre de ce paragraphe par rapport aux autres et le choix du positionnement dans le texte vient du caractère usuel de cette famille, notamment par les CETE. Leur introduction permet d'introduire des éléments théoriques et méthodologies de base pour aborder les pratiques professionnelles et présenter les autres approches. La connaissance des modèles à 4 étapes permet de mieux apprécier la portée des nouveaux modèles. Nous poursuivons avec une brève présentation des modèles couplant transport et usage du sol pour terminer par des outils d'aide à l'exploitation des réseaux. Nous ne consacrons pas de paragraphe spécifique aux modèles de trafic car ils entrent dans les descriptions des trois autres paragraphes.

2.1 **Multiplicité des modèles**

Le transport est un phénomène complexe à modéliser. En effet, il s'agit de modéliser les déplacements sur un territoire, l'offre et la demande ainsi que les interactions entre ces deux notions de services, et enfin des aspects systémiques, notamment au travers de l'utilisation du sol (voir Figure 15). Premièrement, l'aspect physique est à prendre en considération au travers de l'observation des déplacements des usagers définis comme une entité matérielle, personne ou objet, sur un réseau de transport, entre deux lieux que sont l'origine et la destination, motivé par le besoin de réaliser une activité. Nous rappelons que dans cette thèse, seul le déplacement des personnes est considéré. Deuxièmement, l'aspect économique de la mobilité repose sur les notions de services, c'est-à-dire d'offre et de demande. Troisièmement, les deux aspects précédemment cités sont reliés à des aspects systémiques que sont le marché, l'usage du sol et la régulation. En effet, l'état du marché agit sur l'offre et la demande des transports mais aussi sur l'accessibilité des lieux, l'organisation de l'espace, les pratiques sociales, les modes de vie, la qualité de vies riveraines et enfin sur l'environnement naturel.

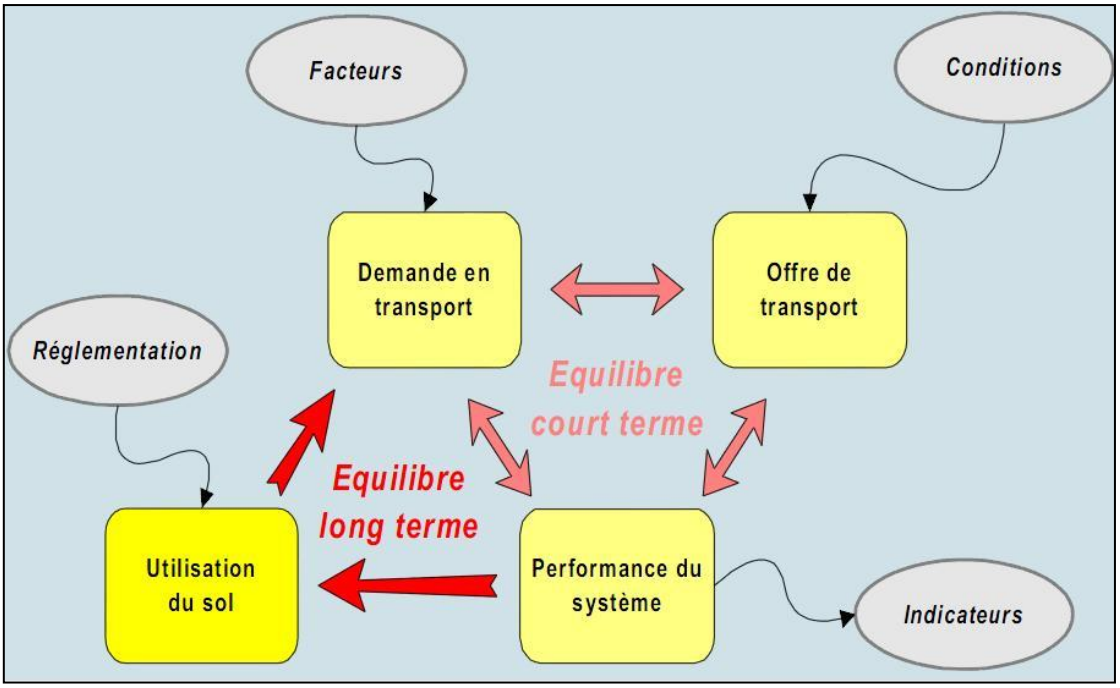


Figure 15 : Notion d'équilibre dans un système de transport (LEURENT, 2006)

Selon les problématiques posées par les acteurs des différents domaines concernés, le niveau de finesse de représentation des différents paramètres qui composent la mobilité varie. Ainsi, une classification est à répéter également à l'intérieur de chaque famille selon la finesse de représentation désirée. En effet, la mobilité n'est pas modélisée de la même manière selon les échelles spatiales, temporelles, le niveau d'agrégation des mobiles (objet en mobilité), ou la richesse des modèles, au sens de la prise en considération de l'environnement de déplacement. La translation de la problématique de planification vers l'évaluation de politique de déplacements urbains, et l'importante déclinaison de ces politiques engrangent un élargissement de la problématique de prévision. Ces effets se répercutent à la fois sur la multiplicité des dimensions à prendre en compte et sur la complexité de l'exercice de prévision. Cette complexité peut se décliner sous deux dimensions, d'abord la dimension spatio-temporelle puis la conception systémique.

Les choix de la classification des familles de modèles présentée par la suite repose sur la différenciation qu'il existe entre leurs fondements théoriques. Nous proposons une classification des modèles de mobilité « transport » en trois familles. Cette répartition s'appuie sur la variabilité spatio-temporelle des interactions entre les sous-systèmes qui compose le système « territoire d'étude » (agglomération, région, pays). Pour la suite, nous prendrons comme exemple de territoire d'étude, un espace urbain. Nous commencerons par expliciter la décomposition des systèmes urbains en sous-systèmes pour classer les différentes familles de modèles selon la nature des interactions entre ces sous-systèmes.

2.1.1 Une décomposition en sous-systèmes

Afin d'illustrer la complexité des systèmes urbains, une approche systémique qui décompose la ville en trois sous-système est proposée (BONNAFOUS, et al., 1983). Il s'agit d'une approche classique mais structurante, grâce à laquelle modéliser les transports urbains revient alors à simuler la capacité de la ville de s'auto-organiser autour des trois sous-systèmes suivants : le sous-système transport, le sous-système de localisation des activités et le sous-système des relations sociales. Cette décomposition est qualifiée de « particulièrement structurante et stimulante » (BONNEL, 2004). En effet, le schéma d'activité réellement réalisé par un individu émerge de la « confrontation » des sous-systèmes urbains. Or, la dimension spatiale des schémas d'activités découle de l'utilisation du sous-système de transport d'où dérive la demande de déplacements.

2.1.1.1 Sous-système des transports

Ce sous-système contient la mise en œuvre de l'offre de transport au travers de la création ou la transformation des infrastructures et/ou des politiques de déplacements qui influent sur l'usage et le fonctionnement du réseau. Les données du sous-système transport sont composées des caractéristiques des infrastructures (capacité, vitesse, longueur, fréquence de desserte pour les TC …) enrichies par les conditions d'utilisation définies par les politiques de déplacements. Ce sont ces mêmes données qui permettent le calcul du coût généralisé des déplacements.

2.1.1.2 Sous-système de localisation des activités

Ce sous-système contient l'empreinte spatiale des lieux d'activité et des mécanismes de transformation de l'espace par les différents acteurs du système urbain. Ces lieux peuvent être le domicile, les emplois, les établissements d'enseignement, ou encore des zones commerciales ou de loisirs. Sont pris en compte leurs caractéristiques physiques (localisation, taille, nature des activités, etc.), économiques (prix du terrain et/ou du bâti, chiffre d'affaire, etc.), de fonctionnement (horaire d'ouverture) et d'image (type d'activités, etc.). C'est à l'intérieur de ce sous-système que se mettent en œuvre les logiques de production et de transformation de l'espace par les différents acteurs.

2.1.1.3 Sous-système des relations sociales

Il contient les pratiques urbaines des individus. Ces comportements d'activité et de mobilité inscrits dans l'espace représentent le fonctionnement socio-spatial de la ville. C'est dans ce sous-système que l'individu définit son programme d'activités, c'est-à-dire l'ensemble des activités qu'un individu souhaite réaliser. Les enquêtes classiques (voir chapitre 4) permettent de reconstituer le schéma d'activités des individus, c'est-à-dire l'ensemble des activités effectivement réalisées.

2.1.2 **Nature des interactions**

Les modèles de transport traduisent les interactions entre les trois sous-systèmes. Ces interactions sont multiples et complexes. Ainsi, une organisation de l'analyse de celles-ci selon les dimensions spatiales et temporelles permet de réduire la complexité de la modélisation du système urbain via des sous-familles de modèles dédiés. D'une part, les interférences entre les sous-systèmes varient avec la temporalité. Cela s'explique par des rythmes d'évolution différents selon les sous-systèmes. En effet, les relations sociales dans le cadre des mobilités quotidiennes évoluent rapidement, tandis que la localisation des activités, en raison de son inertie, est caractérisée par une évolution long terme. La temporalité d'évolution intermédiaire est donc attribuée au sous-système des transports. D'autre part, selon la dimension spatiale considérée, les interactions entre les sous-systèmes changent de nature. Une classification des interactions entre les sous-systèmes selon des dimensions spatiales et temporelles approximatives est présentée dans le Tableau 2.

	Court terme (<5ans)	Moyen terme (5 à 15ans)	Long terme (>15ans)
Quartier/carrefour	A	B	
Zone	A-B	B	B-C
Agglomération	B	B-C	C

Tableau 2 : classification des interactions entre les sous-systèmes du système urbains selon des dimensions spatiales et temporelles (BONNEL, 2004)

Cela permet de créer une classification de A à C des types de modèles selon les domaines de pertinence d'application de ces derniers. Il faut signaler que les découpages spatiaux et temporels sont indicatifs des ordres de grandeur pour assurer la validité des hypothèses qui permettent de négliger certaines interactions. Nous rappelons que le but des modèles de transport est d'évaluer les performances d'infrastructures ou de politiques de déplacements actuelles ou à l'étude. Ainsi, ces modèles permettent de représenter une ou plusieurs facettes des transports lorsque l'on porte une action sur ce sous-système.

2.1.2.1 Sous-famille A : Interactions négligeables entre les sous-systèmes

Les interactions entre les trois sous-systèmes sont supposées très faibles. De plus, les sous-systèmes des localisations et sous-système des transports sont considérés comme figés, c'est-à-dire non amenés à évoluer dans le cadre spatio-temporel de l'étude. Ainsi, les interactions entre ces deux sous-systèmes ne sont pas prises en compte. On ne considère que les modifications du système de transport que l'on cherche à modéliser ou du sous-système des localisations pour le besoin de certaines études de générateur de trafic comme l'implantation d'un nouveau centre commercial. La seule interaction prise en compte est celle de la modification du sous-système de transport sur le sous-système des relations sociales. On

observe alors un phénomène de type stimulus-réponse dans lequel l'inscription spatio-temporelle du sous-système des relations sociales va être modifiée par son interaction avec le sous-système de transport et dans certains cas avec le sous-système des localisations. Ce cas correspond à la seule prise en compte des conséquences spatiales et temporelles des déplacements, et non des conséquences économiques, comme les interactions entre l'offre et la demande. Cette catégorie comprend les modèles analogiques, d'élasticité ou encore les modèles de simulations microscopiques. Nous ne présenterons pas de modèles de cette sous-famille dans la suite du paragraphe.

2.1.2.2 Sous-famille B : Prise en compte partielle des interactions entre les sous-systèmes

Ce cas correspond à un besoin d'étude pour un horizon moyen terme et dans un espace intermédiaire entre un quartier et une agglomération. On pourra citer à titre d'exemple des études de prévision d'usage de nouvelles infrastructures, des études de plan de circulation ou encore des études de restructuration des réseaux.

Les sous-systèmes des transports et des localisations ne peuvent plus être considérés comme figés. Cependant, les interactions entre ces deux sous-systèmes sont supposées réduites. Alors, seule l'influence du sous-système des localisations sur le sous-système des transports est considérée sous la forme d'influence sous-jacente dans la définition du modèle (définition de l'offre de transport ou de la politique de déplacements). De la même manière, l'influence des conséquences sur le sous-système des relations sociales sont indirectement prises en compte sous forme de rétroaction sur le sous-système des transports. Cette dernière est à traiter en dehors du modèle et génère alors de nouveaux scenarii. Les seules interactions directement modélisées sont celle des sous-systèmes de localisations et de transport sur le sous-système des relations sociales.

Cette famille de modèles qui prend en compte les interactions partielles entre les sous-systèmes du système urbain contient tous les modèles qui répondent aux termes génériques de modèles à 4 étapes. La dénomination 4 étapes est relative à la structure de ces modèles qui peuvent s'affranchir de certaines étapes, par regroupement ou par omission, ou en ajouter d'autres. Le paragraphe 2.2 décrit les imbrications structurelles des 4 étapes classiques ainsi qu'une description de ces dernières.

2.1.2.3 Sous-famille C : Fortes interactions

Ce cas correspond à des besoins sur le long terme orientés sur le fonctionnement global du territoire. On pourra citer à titre d'exemple des études de scénarii de politiques de déplacements ou de schémas de transport tels que les Schémas Directeurs, les PDU (Plan de Déplacements Urbains) ou encore les DVA (Dossiers de voiries d'Agglomération). Ce cas a pour vocation l'analyse du fonctionnement du territoire sous différents scenarii de politique de déplacement, différents schémas de voiries ou de transport collectifs. Il ne se limite pas à une seule infrastructure spécifique.

Il s'agit de la configuration la plus complexe et donc la plus proche de la réalité du fonctionnement d'un système urbain. Les interactions entre les trois sous-systèmes sont considérées comme fortes et de ce fait ne sont pas à négliger. De plus, tous les sous-systèmes sont définis comme endogènes dans un tel cas. Ainsi, toutes les influences entre les sous-systèmes sont à modéliser.

Cette sous-famille contient les modèles stratégiques (LICHERES, et al., 1997) et les modèles de type transport-urbanisme « Land Use Transport Interaction » (CLEMENT, 1996).

On résume les différentes interactions entre les sous-systèmes qui sont prises en compte selon les familles de modèles A, B ou C dans la Figure 16.

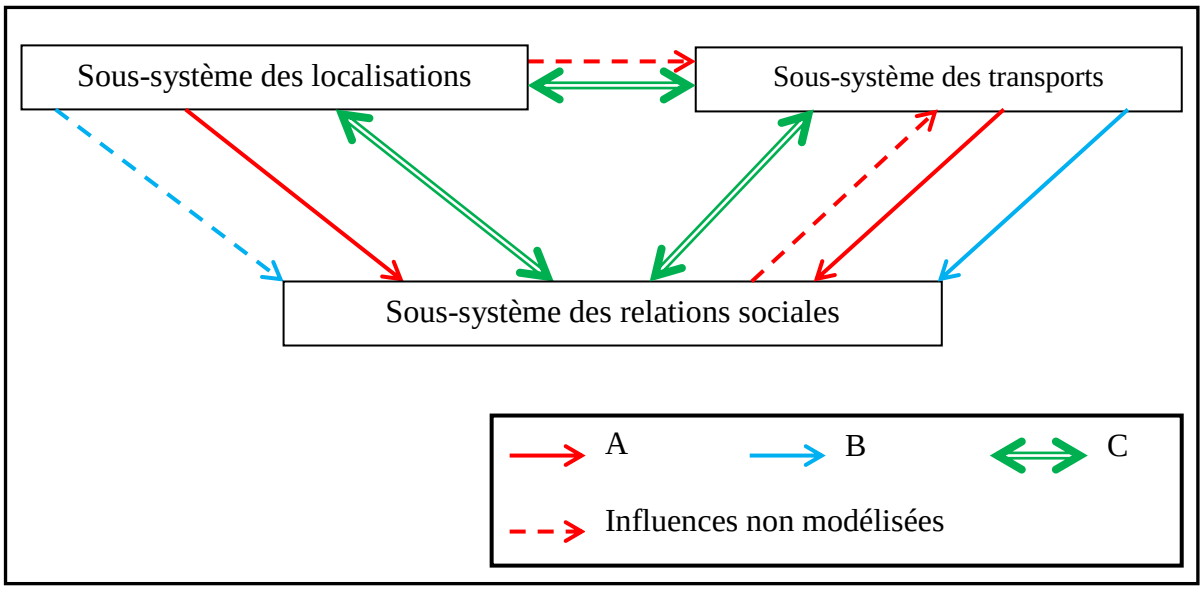


Figure 16 : représentation des interactions entre les différents sous-systèmes selon les familles de modèles (BONNEL, 2004).

Cette classification par famille permet une réduction dans le choix du modèle selon les besoins des acteurs suivant leur domaine. Effectivement, les objectifs de la planification permettent de formuler les hypothèses sur la nature des interactions entre les sous-systèmes. La suite de cette sous-partie est consacrée aux modèles de mobilité avec un découpage selon le degré des hypothèses permettant de négliger tel ou tel phénomène.

La suite du paragraphe présente différents modèles des familles B et C.

2.2 **Modèles de demande de déplacements**

La modélisation dite « à quatre étapes » est l'outil classique de la sous-famille B. Ces fondements théoriques sont issus d'une transposition à la sphère des transports de la théorie microéconomique du choix du consommateur. Dans les années 1960, Ben-Akiva (BEN-AKIVA, et al., 1985), McFadden (DOMENCICH, et al., 1975) ou Manheim (MANHEIM, 1984) en ont été les principaux formalisateurs. L'analyse de l'équilibre entre l'offre et la

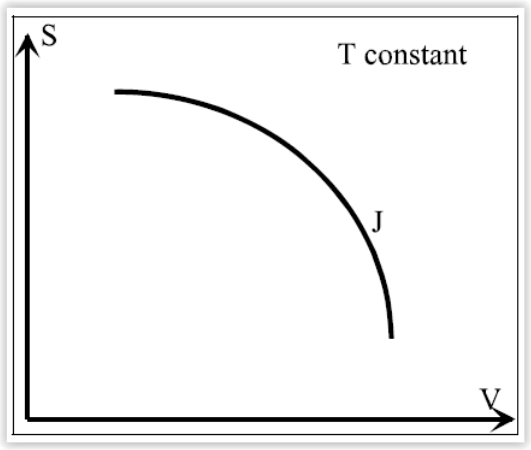
demande se basent sur les notions de coût généralisé et d'utilité. Ainsi, la description des modèles à quatre étapes débutera par une section consacrée à la notion de coût généralisé et à la formalisation de la fonction d'utilité. Ensuite, nous décrirons dans les grandes lignes, les différentes étapes en explicitant quelques-unes des améliorations portées à ces dernières depuis leur création.

2.2.1 **Notion de coût généralisé et fonction d'utilité**

Le fondement théorique de la modélisation de la prévision de la demande de déplacements repose sur la théorie micro-économique du comportement du consommateur qui maximise l'utilité de son déplacement. Nous présentons ici une formalisation mathématique courante appelée fonction d'utilité.

Le modèle néoclassique microéconomique traditionnel qui pose les bases de son application dans le domaine des transports repose sur deux analyses. Tout d'abord, il s'agit d'étudier le comportement du consommateur. « Le consommateur type est supposé rationnel. L'unique motivation du consommateur, lorsqu'il acquiert ou vend des biens sur le marché, est de maximiser sa satisfaction, ou, en d'autres termes, son utilité » (BREMOND, 1990). Sont posées deux fonctions, celles d'utilité marginale qui représente « l'utilité supplémentaire procurée par la consommation d'une unité additionnelle d'un bien. Cette utilité marginale est une fonction décroissante de la consommation de ces biens » (RENAUD, et al., 1998). La fonction d'utilité totale est donc une fonction croissante de la quantité consommée. L'optimum du consommateur est déterminé en posant l'équation d'utilité totale de l'individu en fonction de la quantité consommée de chacun des biens sous la contrainte que la somme du produit de la quantité d'un bien par son prix soit inférieure au revenu. De là, il est possible de construire la courbe de demande d'un bien en tant que maximisation de l'utilité pour le consommateur en fonction de son prix. La deuxième analyse concerne le producteur. Elle permet de tracer la fonction d'offre. La généralisation de ces deux analyses, à l'ensemble des consommateurs d'une part, et à l'ensemble des producteurs d'autres part, permet de rechercher le point d'équilibre entre l'offre et la demande. Cette partie est transposée à la sphère des transports.

Commençons par décrire les fonctions d'offre et de demande en transport proposées par Manheim (MANHEIM, 1984).

a) 

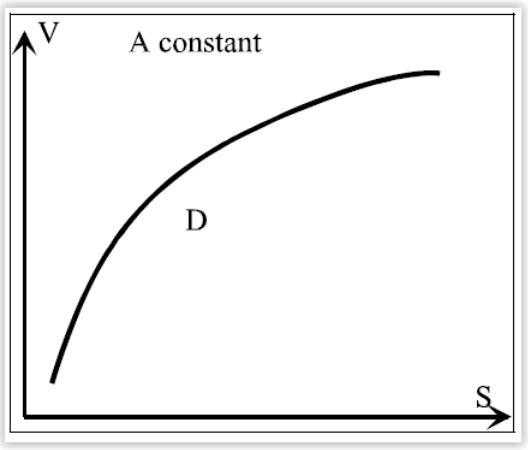
b) 

Figure 17: fonctions d'offre (a) et de demande (b) en transport selon Manheim (MANHEIM, 1984).

La fonction d'offre J illustrée sur la Figure 17.a, s'écrit

$$S = J(T, V) \quad (1)$$

avec S le niveau de service de l'offre de transport,
T le système de transport
et V le volume de trafic ou de demande observé sur le système de transport

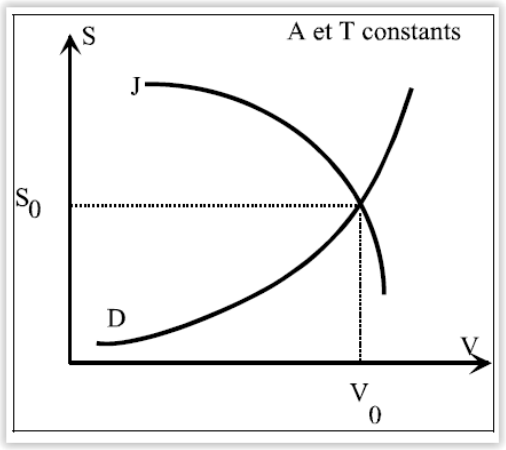
La fonction de demande D illustrée sur la Figure 17.b, s'écrit

$$V = D(A, S) \quad (2)$$

avec S le niveau de service de l'offre de transport
et A correspondand au système d'activités

La confrontation des deux courbes d'offre et de demande permet de trouver le point d'équilibre pour des systèmes de transport et d'activités donnés. Si l'on modifie le système de transport ou d'activité, cela conduit à un nouvel équilibre. L'objectif est en général de modifier la fonction d'offre de sorte à atteindre un nouvel équilibre pour lequel les niveaux de trafic sont plus élevés et la qualité de service meilleure. Ceci est illustré sur les Figure 18.a et Figure 18.b.

a)



b)

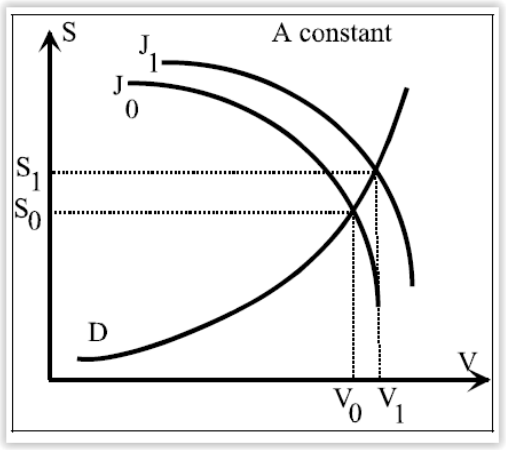


Figure 18 : illustration de la notion d'équilibre (a) et de la notion de déplacement de l'équilibre en cas de modifications du système de transport (b)

Intéressons-nous maintenant à l'interprétation de ces définitions au sein du système urbain. La demande de transport est la résultante de la confrontation des trois sous-systèmes, ainsi les modèles doivent contenir les interactions entre les trois sous-systèmes. Nous avons vu précédemment (paragraphe 2.1.2) une classification en 3 groupes. Pour les modèles du groupe C qui portent sur le long terme, la demande de l'individu est à la fois une demande de transport et une demande de localisation. L'état de la fonction d'offre de transport et d'offre de localisation n'est plus statique. Elles font partie de la dynamique du système. Pour les modèles du groupe B, les fonctions d'offre sont considérées comme statiques. Pour les modèles de la sous-famille B, l'offre de transport est figée, tandis que pour ceux de la sous-famille C, l'offre de transport est évolutive. Une offre de transport figée ne signifie pas un niveau de service constant En effet, la fonction de coût généralisé tient compte du niveau de demande et permet donc de modéliser la congestion. Nous nous concentrerons sur l'interprétation pour la famille B de modèles car elle est prédominante dans la suite de la rédaction.

Dans le cas du groupe B, nous formaliserons la fonction d'offre, puis celle de demande et discuterons des deux approches pour la fonction d'utilité. Tout d'abord, la fonction d'offre est aussi appelée fonction de coût généralisé. Elle traduit dans un indicateur unique des éléments de natures différentes. Notamment, cette approche en valeur du temps permet de sommer des données temporelles avec des données monétaires. Ce coût a pour but de représenter le niveau de service offert à l'usager.

$$C_g = P + (\sum_i \propto_i T_i) V_t \quad (3)$$

$avec\ C_g\ le\ coût\ généralisé,$
$P\ le\ prix\ du\ déplacement,$
$T_i\ une\ partie\ élémentaire\ du\ temps\ nécessaire\ pour\ se\ déplacer,$
$V_t\ la\ valeur\ que\ l'individu\ attribue$ à $son\ temps,$
$\propto_i\ un\ coefficient\ pondérateur\ du\ temps\ élémentaire\ T_i$

A noter, que le prix P est souvent le prix « ressenti » par l'usager et non le prix réel. En effet, par exemple pour un déplacement en véhicule privé, sont pris en compte pour l'évaluation de P l'essence consommée et le coût de péages éventuels. L'usure de la voiture est souvent négligée. Le temps est décomposé car le coefficient de pénibilité n'est pas le même selon le mode et les conditions de déplacement. Par exemple la formule de coût généralisé retenu par (LICHERES, et al., 1997) est :

Temps généralisé (TC) = Temps en véhicule + 2 * Temps d'accès (Origine + Destination) + 1.8 * Coefficient de régularité * Intervalle + Pénalité d'accès (4)

Le temps d'attente est pénalisé par un coefficient d'1.8. La pénalité d'accès permet de rendre compte de l'attractivité de la ligne. La valeur de ces coefficients dépend du contexte de l'étude. De plus, la fonction de coût peut être enrichie pour prendre en considération d'autres aspects. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer certaines dimensions relatives aux caractéristiques du système de transport (fréquence de la desserte, intervalle moyen de dessertes, amplitude horaire de la journée, nombre de changements, etc.) (BONNEL, et al., 1999), ou encore la perception des différents éléments de qualité de service (AMPT, et al., September 8-11, 1996). L'estimation de la perception de l'offre par l'individu est délicate à estimer, comme la notion de confort ressenti. La variabilité, selon les individus, des paramètres influençant le choix d'itinéraire restreint la fonction de coût généralisé à une partie jugée prépondérante des éléments entrant? la perception de l'offre par les usagers. On répertorie également la prise en compte du volume de déplacements au sens de Manheim qui sont généralement inclus dans les temps de parcours en véhicule. Ces temps de parcours sont calculés à partir des lois « débits-vitesse » ou « débits-coût » qui sont également utilisées dans l'étape d'affectation, mais aussi la notion d'habitude et d'information. En effet, les individus ont tendance à sous-estimer les itinéraires habituels et à surestimer le coût des itinéraires inconnus. De plus, une hypothèse forte est sous-entendue dans le calcul des coûts généralisé. On suppose que les usagers connaissent parfaitement l'ensemble de l'offre de transport. En pratique, il est courant qu'une partie de l'offre de transport ne soit même pas considérée par les usagers. Cela pose la question de la place de l'information aux usagers.
Une formalisation de la fonction de demande dans une approche systémique peut s'écrire :

$$V = D\left((A, R), S\right) \quad (5)$$

avec R le sous − système des relations sociales
et A le sous − système de localisation des activités

Pour déterminer la fonction de demande, il faut connaitre la fonction d'utilité du consommateur. En se limitant aux biens considérés dans le processus de choix, l'utilité pour un individu peut s'écrire :

$$V_{i,n} = \sum_k \beta_{i,n,k} X_{i,n,k} \quad (6)$$

$avec\ V_{i,n}\ l'utilité\ du\ bien\ i\ considéré\ par\ l'individu\ n,$
$X_{i,n,k}\ les\ différentes\ variables\ permettant\ d'estimer l'utilité\ du\ bien\ i\ pour\ un\ individu\ n,$
$\beta_{i,n,k}\ le\ coefficient\ de\ pondération\ de\ X_{i,n,k}$

Ces variables contiennent des informations sur les attributs du déplacement (coût généralisé, ou certaines des variables entrant dans le calcul du coût) et sur les caractéristiques socio-économiques des individus ou des ménages. Le choix des variables va dépendre du modèle de choix retenu. La formalisation de la fonction d'utilité présentée est issue d'une approche déterministe. Or les déterminants retenus ne correspondent pas nécessairement à la totalité des déterminants. La fonction d'utilité a donc une composante stochastique. En effet, « on peut argumenter que le comportement humain est intrinsèquement probabiliste. On peut aussi argumenter, cependant, que l'hypothèse du comportement probabiliste traduit l'acceptation par l'analyste d'une connaissance insuffisante du processus de décisions de l'individu. S'il était possible de connaitre les causes de cette inconsistance, la théorie du choix déterministe développé précédemment pourrait être utilisée. Ces facteurs sont cependant en général inconnus ou connus mais **non mesurables** (BEN-AKIVA, et al., 1985). De plus, ce caractère probabiliste peut survenir du fait de l'incapacité à identifier ou mesurer les déterminants du processus de choix des individus. Alors deux approches ont permis d'introduire un mécanisme de choix probabiliste : l'utilité constante et l'utilité aléatoire (LUCE, et al., 1965). Dans le premier cas, l'utilité demeure une constante, cependant le comportement de l'individu est considéré comme probabiliste. L'alternative choisie ne sera plus celle ayant la valeur d'utilité la plus grande, mais celle dont la probabilité de se réaliser, $P_n(i)$ (avec n l'individu, et i l'alternative de l'ensemble des alternatives disponibles pour l'individu), de se réaliser?. Dans le deuxième cas, l'utilité aléatoire est définie par une partie déterministe et une partie aléatoire. La distribution statistique pour la composante aléatoire détermine la solution de l'équation suivante :

$$U_{i,n} = V_{i,n} + \varepsilon_{i,n} \quad (7)$$

$avec\ V_{i,n}\ l'utilité\ déterministe\ présentée\ précédement$
$et\ \varepsilon_{i,n}\ un\ vecteur\ aléatoire\ correspondant\ au\ terme\ d'erreurs$

2.2.2 **La modélisation à « 4 étapes »**

Le but *in fine* de cette approche est de modéliser, au sens de prévoir, les déplacements sur un périmètre d'étude. Ce dernier est découpé en plusieurs zones pour les besoins de la modélisation. Bien que couramment appelée modélisation, la « modélisation à quatre étapes »

est en réalité une méthode et non un modèle. La famille des modèles à quatre étapes fait également l'objet d'une classification. Nous considérons les trois distinctions faites par (BONNEL, 2004). La première porte sur la structure de choix de l'individu qui peut être modélisée soit par une approche séquentielle de choix de caractéristiques du déplacement ou par une approche directe qui ne modélise qu'un seul choix. La deuxième distinction porte sur le niveau d'agrégation. En effet, soit chaque individu est considéré isolément des autres, soit on considère un individu « moyen » représentatif d'un segment d'individus. Enfin, la dernière distinction porte sur l'approche déterministe ou probabiliste de l'utilité. Chacune des quatre étapes contient un modèle qui répond à l'un des critères de classification. La prévision des flux de déplacement se fait par l'itération successive des 4 étapes qui répondent chacune à une problématique précise. Il existe des feed-back entre ces différentes étapes. La première étape répond à la question « Quel volume de déplacements est engendré/attiré par chaque zone ? ». La deuxième étape s'intéresse aux destinations et origines des déplacements zones à zones. La troisième est consacrée à associer un mode de transport au déplacement et enfin la dernière permet d'affecter, c'est-à-dire attribuer un itinéraire à chaque paire Origine/Destination (KONSTANTINOS, Décembre 2013). En nous inspirant de (BONNEL, 2004), nous décrirons successivement ces étapes.

2.2.2.1 Etape de génération

Cette première étape des modèles à 4 étapes a pour but de déterminer le nombre de déplacements émis et reçus par chacune des zones du territoire d'étude. Le découpage du territoire d'étude en zones, ou zonage, se fait en fonction des caractéristiques de chacune des zones qui compose ce territoire selon les objectifs de l'étude, les données disponibles et la taille de la zone d'étude. Il est important de préciser que cette étape n'a pas pour vocation de caractériser les paramètres des déplacements des individus (horaire de départ, itinéraire, mode, etc.), mais seulement d'estimer si un individu va se déplacer ou non à partir ou vers une zone. Ainsi, en sortie de cette première étape, le modèle de génération produit les émissions et les attractions, exprimés en nombre de déplacements par zone, de chaque zone qui permettra de fixer les marges de la matrice Origine-Destination produites dans l'étape suivante. On appelle émission d'une zone tout déplacement dont l'origine se situe dans la zone et attraction tout déplacement dont la destination se situe dans la zone. A la sortie de cette étape, les origines et les destinations ne sont pas encore reliées entre elles.

Les modèles de génération s'appuient sur un certain nombre de variables explicatives qui fixent les données d'entrée nécessaires. Pour l'émission des déplacements, les variables les plus fréquemment requises sont les revenus du ménage ou de l'individu, le taux de motorisation, la composition du ménage (nombre d'adultes, nombre d'enfants) et l'âge ou la classe d'âge des individus. L'attraction est plutôt caractérisée par les activités disponibles sur la zone, ainsi on doit connaitre le nombre d'emplois disponibles sur la zone, la capacité d'accueil scolaire, le nombre de ménages ou d'individus dans la zone.

Il existe plusieurs familles de modèles de génération. Une première catégorie de modèles de génération est celle des modèles normatifs. Pour pallier à un manque de données

issues d'enquêtes, un système de norme été mis en place aux Etats-Unis en fonction de différents paramètres comme la taille de l'agglomération (SOSSLAU, et al., 1978). Il propose un nombre de déplacements émis par motifs selon le revenu des ménages, le taux de motorisation, et un nombre de déplacements attirés par motifs selon les caractéristiques d'une zone (emploi commercial, emploi non commercial, ménage). Ce système de normes s'avère pratique en l'absence de données mais la transférabilité d'une agglomération à l'autre et surtout d'un pays à l'autre s'avère très délicate. Lorsque les données sont disponibles, il est préférable de les utiliser pour déterminer les valeurs des coefficients d'émissions et d'attractions par régression linéaire. Cette catégorie de modèles par régression linéaire se base sur un jeu de données représentant une situation de référence des attractions et émissions d'une zone et des caractéristiques en terme de population et d'activité de chaque zone. Une régression linéaire multiple est appliquée pour déterminer les variables explicatives des émissions et des attractions. En milieu urbain, les données des EMD sont le plus généralement utilisées pour calculer les émissions et les attractions. La caractérisation des activités disponibles sur une zone provient de l'INSEE, de la chambre de commerce, d'agences d'urbanisme, du rectorat, etc. Nous ne développerons pas plus les modèles de régression qui sont décrits dans divers ouvrages (ORTUZAR, et al., 1991). Enfin, les modèles catégoriels ont été développés pour prendre en compte la forte variabilité des comportements des individus et/ou des ménages. Ainsi, on effectue une régression linéaire multiple par classe d'individus ou de ménages homogènes. Ce modèle semble plus pertinent car il permet de travailler sur des classes homogènes en terme de comportement de déplacements. Néanmoins, se pose alors des contraintes sur le jeu de données qui doit être composé d'échantillons de taille suffisante pour chacune des classes. De plus, pour répondre à la problématique de prévision, il faut pouvoir prévoir l'évolution de chacune des classes à l'horizon d'étude.

Les limites des modèles de génération concernant les hypothèses faites pour la régression, la stabilité des paramètres, le choix des variables explicatives, ou encore le fait que les émissions/attractions ne tiennent pas compte de l'offre de transport disponible sortent du cadre de ce travail de thèse. Néanmoins, les limites induites par la qualité des données méritent d'être explicitées. Effectivement, la qualité des données et leur adéquation avec les besoins de la modélisation vont jouer un rôle prééminent au niveau de chacune des étapes de la modélisation. En effet, d'une part, des données de mobilité tirées d'enquêtes telles que les EMD sont nécessaires pour le choix des variables explicatives et pour la formalisation du modèle de génération. Elles doivent alors répondre aux exigences de représentativité statistique, de taille d'échantillon (surtout dans le cas des modèles catégoriels) et de présence de variable pertinentes. Selon les modèles on préféra des données basées sur les déplacements ou sur les activités. Les modèles de générations s'appuient le plus souvent sur la définition d'un déplacement du CERTU que nous avons retenu dans le chapitre 2. En effet, on considère un déplacement pour un motif. Ainsi, dans le cas des chaînes de déplacements, le nombre de déplacements recensés dans une enquête basée sur la définition CERTU sera égale au nombre de déplacements dans la chaîne. Ainsi, les modèles de génération ont tendance à évoluer pour prendre en compte la notion de chaîne de déplacement plutôt que la notion de déplacement (ZHANG, et al., 2001). Ainsi, les données d'entrée des modèles de génération

ne sont plus des EMD mais des recueils d'activités. En effet, les enquêtes ménages ont évolué pour prendre en compte le chaînage des déplacements (AXHAUSEN, 1995). L'orientation des enquêtes n'est pas anodine car on comptabilise une différence comprise entre 15% et 20% en nombre de déplacements recueillis entre les enquêtes de type recueil d'activé et les EMD classiques (JONES, et al., 1980). D'autre part, des données de caractérisation des activités disponibles par zones sont également nécessaires. Cependant, ces bases de données ont souvent été recueillies avec un écart temporel trop important par rapport aux données de mobilité. De plus, le zonage peut être décorrelé entre les deux sources. Ensuite, comme toute source, il est important de quantifier sa fiabilité, ce qui n'est pas en pratique toujours si aisé. Ces mêmes deux jeux de données (mobilité et activité des zones) sont utilisés pour caler et valider le modèle de génération. Enfin, les données doivent être robustes à la prévision. Pour cela les données d'entrée du modèle de génération doivent répondre à deux exigences. La première concerne la fiabilité pour la prévision des variables, notamment en ce qui concerne les variables d'activité zonales. Deuxièmement, les données de mobilité doivent répondre à des hypothèses de stabilité des coefficients de la régression qui ne peuvent être validées sans répéter les enquêtes.

2.2.2.2 L'étape de distribution

La deuxième étape des modèles à quatre étapes est celle de distribution qui prendra en entrées les émissions et les attractions produites dans l'étape précédente de génération. Cette étape a pour but de fixer les choix de destination du déplacement des individus parmi son éventail de choix. Ainsi, la sortie de cette étape est une matrice Origine-Destination des déplacements sur le territoire d'étude, calculée à partir des marges constituées par l'étape de génération. L'objectif principal de cette étape est donc de relier origine et destination des déplacements à partir du nombre de déplacements reçus/émis des zones précédemment estimées. Ainsi, la somme de tous les déplacements dont l'origine est la zone O, quelle que soit la destination, est égale aux émissions de la zone O. Réciproquement, la somme de tous les déplacements dont la destination est D, quelle que soit l'origine, est égale à l'attraction de la zone D. La Figure 19 résume les productions à l'issue de ces deux premières étapes de génération (en rouge) et de distribution (en bleu). Un déplacement de la zone i vers la zone j est couramment noté Tij. Le nombre total de déplacements émis par la zone i (émissions) est noté Ei et le nombre total de déplacements reçus (attractions) par la zone j est noté Aj.

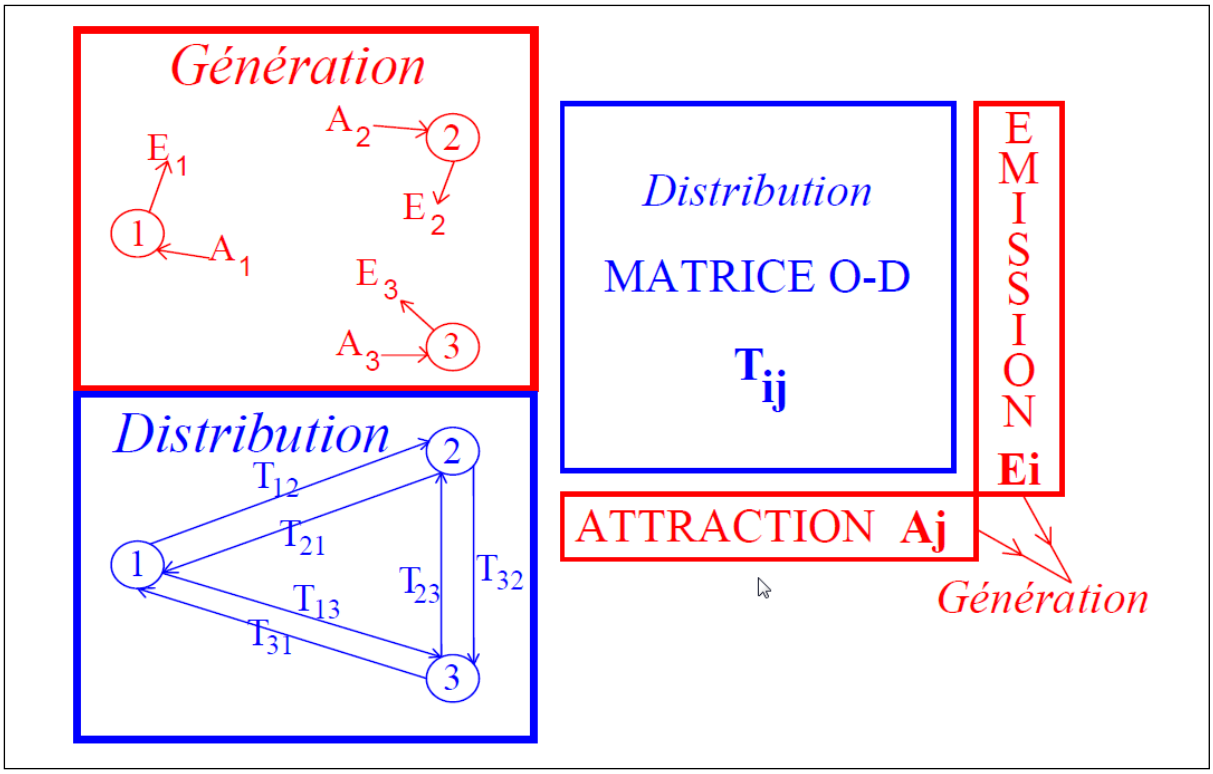


Figure 19 : étapes de génération et distribution des déplacements dans la modélisation à 4 étapes (BONNEL, 2004)

La plupart des modèles de distribution prennent en compte le coût ou le temps de déplacement qui correspond à celui perçu par un individu et qui va influencer son processus de choix des caractéristiques du déplacement. En reprenant l'équation 3 du paragraphe 2.2.1, on peut exprimer le temps généralisé comme :

$$T_g = \frac{P}{V_t} + (\sum_i \propto'_i T_i) \quad (8)$$

avec T_g *le temps généralisé,*
P *le prix du déplacement,*
T_i *une partie élémentaire du temps nécessaire pour se déplacer,*
V_t *la valeur que l'individu attribue à son temps,*
$\propto'_i$ *un coefficient pondérateur du temps élémentaire* T_i *(en unité de temps)*

Il est important de préciser que les déplacements de transit dans le territoire d'étude sont pris en compte. En effet, l'étape d'affectation ne peut s'affranchir de ces déplacements car ils vont conditionner la charge du réseau de transport. Ainsi, une zone « externe » est à ajouter au découpage zonal.

Il existe différents modèles de distribution. Les premiers modèles développés sont les modèles à facteur de croissance. Il s'agit d'une méthode simple qui permet, à partir d'une matrice de référence, d'obtenir la matrice horizon par une succession de déformation tout en

respectant les contraintes aux marges que sont les émissions et les attractions. Il existe différentes méthodes de déformation de la matrice, distinguées par leur algorithme de déformation. Elles consistent à traiter tout d'abord les lignes de la matrice « de référence », puis les colonnes et de répéter l'opération jusqu'à l'obtention d'une précision suffisante. Ces méthodes, dont la méthode de Furness ou de Fratar, présentent l'avantage de la simplicité de calcul. Cependant elles sont dépendantes du contexte actuel et de la qualité de la matrice de référence. De plus, elles ne prennent pas en compte l'offre de transport, ce qui limite leur pertinence d'usage pour estimer l'impact de politiques de déplacements variées. Afin de s'affranchir du passage de ces limites, ces modèles ont été remplacés par les modèles gravitaires. Ils se basent sur l'analogie avec la loi de gravitation de Newton qui définit l'attraction entre deux corps comme le rapport entre la multiplication des deux masses par une constante et divisé par la distance entre les deux masses élevée au carré. La première transposition à l'interurbain stipule que l'attraction entre deux zones, c'est-à-dire le nombre de déplacements entre ces zones, est égal au rapport entre des facteurs expliquant la propension à se déplacer et le coût généralisé du déplacement entre ces deux villes. A terme, le produit est associé à un exposant correspondant à l'élasticité. Comme vu dans le paragraphe précédent (2.2.1), la notion de coût généralisé correspond à la perception par l'individu du coût ou du temps de déplacement. Dans le cas de l'interurbain, les facteurs justifiant les déplacements sont formulés via la population et les revenus des deux villes. Dans le cas de l'intra-urbain, ils sont remplacés par les attractions et les émissions. De plus, d'autres fonctions de coût généralisé sont apparues sous l'appellation fonction de résistance. Cette dernière représente le caractère résistant qui réduit le nombre de déplacements lorsque le coût augmente. Ces fonctions peuvent être formalisées sous forme de fonction puissance, de fonction exponentielle ou de fonction combinée puissance et exponentielle. Comme dans les modèles à facteur de croissance, les contraintes aux marges apparaissent. L'intégration des coûts généralisés est justifiée par la théorie de la maximisation de l'utilité individuelle (COCHRANE, 1975). Une deuxième classe de modèles de distribution est basée sur la maximisation de l'entropie. Encore, une fois cette méthode est une adaptation d'une méthodologie utilisée dans le domaine de la physique. On décompose un système selon trois échelles, l'échelle microscopique, l'échelle mésoscopique et l'échelle macroscopique. Afin de s'affranchir de la description des états à l'échelle microscopique, les micro-états, qui nécessiteraient la connaissance des caractéristiques de tous les déplacements pour l'ensemble des individus, on se place au niveau d'agrégation supérieur représenté par une matrice origine-destination. Il s'agit du méso-état. Le niveau d'agrégation supérieur, le macro-état, est celui du nombre total des déplacements émis ou reçus, ou même le nombre total de déplacements. En partant de l'hypothèse d'une équiprobabilité de tous les micro-états, le principe de la méthode de maximisation d'entropie est de trouver le méso-état qui satisfasse les connaissances à disposition sur le macro-état du système. Cet état au niveau d'agrégation le plus haut est celui sur lequel on dispose de données avec l'incertitude la plus faible. Ainsi, on peut exprimer le nombre de micro-états selon l'équation :

$$W\{T_{ij}\} = \frac{T!}{\Pi_{i,j} T_{ij}!} \quad (9)$$

$avec\ W\{T_{ij}\}\ le\ nombre\ de\ micro-états\ et\ T_{ij}\ le\ méso-état$

On résout cette équation grâce aux connaissances que l'on a sur le macro-état, dont les contraintes produites à l'étape de génération. Dans le processus de résolution de la maximisation d'entropie sous contrainte, on est amené à introduire la fonction de résistance. Alors, on retrouve la formalisation des modèles gravitaires. Les modèles gravitaires sont les plus plébiscités. Néanmoins, il existe une dernière famille de modèles de distribution, celle des modèles d'opportunités. Le principe de cette méthode est basé sur une détermination du choix de destination par l'individu du lieu offrant l'opportunité de satisfaire une activité la « plus proche » de son origine. Cette notion de « plus proche » fait le plus souvent référence à un coût ou un temps généralisé, bien que l'on puisse prendre la distance géométrique. Ce modèle d'opportunité se distingue donc des approches gravitaires en considérant la distance de manière relative ou ordinale par rapport aux autres destinations possibles et non de manière absolue ou continue. De ce fait, la distance ne produit pas les mêmes incidences selon les deux approches. En effet, une modification du sous-système de transport, dans un modèle d'opportunité, ne remettrait pas nécessairement en cause la notion d'ordre, et donc n'aurait aucun effet dans la sortie de la modélisation. Réciproquement, la précision du calcul du coût ou du temps généralisé, surtout pour des écarts faibles entre deux zones, sera beaucoup plus impactant qu'avec le modèle gravitaire. Ceci constitue le principal inconvénient de cette approche. Cependant, les modèles d'opportunités offrent l'intérêt d'une méthodologie de calcul identique pour les déplacements inter-zonaux et intra-zonaux.

Nous conclurons ce paragraphe par un type de limites que l'on retrouve dans les différents modèles de distribution. Nous nous concentrerons seulement sur les problèmes relatifs aux données d'entrée des modèles. Tout d'abord, une stabilité des coefficients de calage dans le temps pourrait être assurée par la mise à disposition de données en série chronologique ou de mesures répétées dans le temps. De telles mesures ne sont que rarement à disposition des modélisateurs qui se contentent d'un calage des coefficients de la fonction puissance ou exponentielle à une seule date. Ensuite, la fonction de résistance du modèle gravitaire est dépendante du motif du déplacement. Or, pour une partie des données de calage, une segmentation n'est pas accessible. C'est le cas des enquêtes embarquées dans les transports collectifs ou des enquêtes en bord de route. De plus, dans le cas des enquêtes de comptages, aucune segmentation n'est possible. Après, les déplacements de transit, c'est-à-dire avec soit l'origine, soit la destination, soit les deux, en dehors du territoire d'étude ne sont généralement pas recensés dans les enquêtes ménages. Ainsi, des enquêtes de type cordons seront nécessaires pour compléter les données. A cela s'ajoutent les moments où sont réalisées les enquêtes. En effet, afin de disposer d'un jeu de données suffisants, elles sont effectuées en dehors des heures de pointe. Or, le coût généralisé n'est pas le même en heure creuse et en heure de pointe. Enfin, la qualité des données est un problème récurrent à chacune des étapes. La taille des échantillons est souvent trop faible, allant jusqu'à la cellule nulle. Ceci réduit la fiabilité des matrices origine-destination produites.

2.2.2.3 L'étape de répartition modale

En troisième position de la méthode à quatre étapes, nous avons l'étape de répartition modale. Elle va prendre en entrée les matrices origines-destinations produites par l'étape de distribution et les distribuer selon les modes pris en compte dans l'étude. En sortie de cette étape sera produite une matrice origines-destinations par mode. Il existe deux approches que nous allons décrire successivement ; l'approche historique agrégée et une évolution vers des modèles désagrégés à choix discrets.

Nous débutons par l'approche historique qui regroupe des modèles dit agrégés. Comme dans l'étape de distribution, la notion de coût généralisé occupe une place centrale dans l'estimation du partage modale. Cependant, ses coefficients de calage diffèrent selon le moment de la journée. Idéalement, deux référentiels, un en heures de pointe et un en heures creuses, seraient requis. En pratique cela s'avère trop coûteux. Usuellement, les facteurs explicatifs retenus pour le choix du mode sont l'offre de transport, les caractéristiques du déplacement et les caractéristiques des individus ou des ménages. Tout d'abord les déterminants relatifs à l'offre de transport regroupent le prix ressenti par l'individu, le temps perçu par l'individu, le stationnement. Pour ce dernier, les disponibilités des données ne permettent pas toujours de le prendre en compte (MASSOT, et al., 1991). C'est également le cas pour d'autres éléments de type qualitatifs délicats à mesurer, comme le confort, la sécurité, la fiabilité, etc. Ensuite, les caractéristiques du déplacement que sont la paire origine-destination, le motif, l'heure de la journée et le chaînage, sont des déterminants du choix de mode. Enfin, pour analyser les déterminants du choix de mode liés aux caractéristiques individuelles, il s'agit de présumer que ces individus disposent effectivement d'un choix. Se pose alors la question de l'accès à la motorisation et la capacité de conduire un véhicule. Ensuite, il faut se baser sur des analyses de mobilités, plus ou moins fines selon les objectifs de l'étude. Comme vu dans le chapitre précédent, les pratiques de mobilité sont issues de la combinaison de divers facteurs tels que l'âge, le sexe, la profession, la structure du ménage, etc. Cette liste de facteurs explicatifs n'est cependant pas complète et se résume aux déterminants retenus en pratique. L'usage des modes dépend fortement de facteurs socio-économiques. Par exemple, d'après l'enquête ménage-déplacement de Lyon en 1995, on remarque que la part des déplacements réalisés en voitures particulières par rapport aux transports collectifs varie de 20% à 90% selon un nombre de voitures disponibles au sein du ménage soit de 0 ou de plus de 2. Ceci indiquerait un besoin d'une segmentation dans les données issues des étapes de distribution et de génération selon la motorisation.

(BONNEL, 2004) propose de regrouper les modèles de répartition modale en 2 groupes. Tout d'abord, comme pour les modèles de génération, les modèles précurseurs étaient normatifs. Ils ont été abandonnés en raison de leurs performances au profit de modèles à régression logistique. Les fondements des modèles logit sont issus de la théorie micro-économique. Cette méthode est utilisée dans le cas d'une définition de l'utilité dans sa seule composante déterministe. Elle suppose de vérifier l'hypothèse d'indépendance entre les alternatives disponibles. Sinon, une structure de choix emboité (Nested logit) est à favoriser. Ce modèle permet de produire la probabilité de choix de chaque mode généralisée à

l'ensemble des individus avec le logit multinomial. Certains modèles ont émergé proposant de combiner l'étape de distribution avec l'étape de répartition modale. D'autres encore, dit modèles directs, permettent de traiter les trois premières étapes en une seule équation.

On peut exprimer des limites similaires pour les modèles de distribution dans le cas des modèles de répartition modale présentés ici. Le problème de la taille des matrices et de leur fiabilité est amplifié par l'éclatement des matrices selon les modes. A cela s'ajoute la difficulté pratique pour ces modèles d'estimer l'impact de mesures de « traffic calming » ou de promotion de modes doux mis en avant par les PDU actuels. Néanmoins, cette approche est basée sur le comportement d'un « individu moyen » fictif. Sachant que les données sont produites à un niveau désagrégé, premièrement au niveau de l'étape de répartition, puis étendus aux autres étapes, des travaux suivant une approche désagrégée ont été proposés et adoptés.

Dans les modèles désagrégés de choix discrets, une approche aléatoire de l'utilité est préférée à une approche déterministe. On ne suppose plus, comme pour l'approche agrégée, que l'individu ait un comportement aléatoire, mais un comportement rationnel où il cherche à maximiser son utilité. L'expression aléatoire de l'utilité représente la partie non connue de l'utilité ou encore appelée erreur (3.2.1). De plus, l'univers des choix est considéré comme fini. Cela implique de faire des hypothèses sur la forme de la distribution du terme aléatoire. Les modèles seront classés selon le choix de cette fonction statistique. Tout d'abord, la distribution de l'erreur de la fonction d'utilité peut être une distribution normale. En effet, on suppose que le terme d'erreur résulte de la variation d'un grand nombre de facteurs inconnus mais indépendants entre eux. Ces modèles sont appelés modèles probit. L'estimation se complique pour un nombre d'alternatives supérieur à 3. Ensuite, basés le plus couramment sur une distribution de Gumbel, on cite les modèles de type « logit ». Cette famille regroupe le modèle logit multinomial pour faire face à des univers de choix multidimensionnels, le modèle logit emboîté (Nested Logit) et les modèles de la valeur extrême généralisée (Generalised Extreme Value ou GEV) qui permettent de s'affranchir de l'hypothèse d'indépendance des résidus ainsi que les modèles logit multinomial mixte. La valeur observée de choix est binaire au niveau désagrégé. L'utilisation de la méthode de maximum de vraisemblance est donc nécessaire pour l'estimation statistique.

Comme précédemment, nous nous concentrons principalement sur les limitations relatives aux données. L'approche désagrégée lève certaines limitations rencontrées avec l'approche agrégée. En effet, la fonction d'utilité prend en compte les caractéristiques de chacun des individus annulant les besoins et les limitations de la segmentation des données. La problématique des variations de la perception de l'approche désagrégée posent des limites importantes selon les familles de modèles. En effet, l'hypothèse d'une perception homogène selon les individus semble forte. Enfin, bien que le modèle désagrégé puisse être estimé sur des données individuelles, l'exercice de prévision se place à un niveau agrégé qui conduit à un processus d'agréation.

2.2.2.4 L'étape d'affectation

L'étape finale est celle de l'affectation de la matrice origines-destinations par mode sur le réseau de transport. Cela correspond au processus de choix d'itinéraire pour un individu. A l'issu de cette dernière étape, la charge des réseaux et les temps de parcours seront estimés. Cette étape d'affectation implique de codifier les réseaux de transport. Nous ne nous attarderons pas à décrire cette partie éloignée de la thématique de mesure des déplacements. Une fois les réseaux codifiés, il s'agit de calculer le coût d'un ou plusieurs itinéraires entre chacune des origines i et destinations j afin d'en représenter le niveau de service, au travers du coût ou du temps généralisé. En pratique, par manque de données sur les valeurs du temps perçu par exemple, il est très rarement possible d'estimer un coût généralisé au niveau d'un déplacement. Le calcul du coût généralisé permet de représenter l'utilité pour un individu de prendre un itinéraire compte tenu d'une origine, d'une destination et d'un mode donné. Les modèles d'affectation sont généralement classés selon deux dimensions : la prise en compte des contraintes de capacité et le choix d'une approche déterministe ou probabiliste pour l'utilité (ORTUZAR, et al., 1994).

Tout d'abord, la famille des modèles « tout-ou-rien » ou « plus court chemin » ne prennent pas en compte les contraintes de capacité et sont construits sur une fonction d'utilité déterministe. Ces modèles reposent sur un principe simple, la totalité du trafic est affecté pour une origine-destination sur le chemin le plus court en terme de coût généralisé. Deux hypothèses sont faites. Premièrement, tous les individus perçoivent le coût de manière identique. Ceci garantit l'unicité du plus court chemin. Et deuxièmement, le coût généralisé d'un lien ne dépend pas de la charge et est calculé à partir du coût à vide. Ce coût est donc fixe et ne tient pas compte des phénomènes de congestion. L'algorithme de plus court chemin le plus répandu est celui de Dijkstra (DJIKSTRA, 1959). Une des principales limites de cette méthode est qu'il est possible de produire une affectation telle que la charge dépasse la capacité. Néanmoins, elle permet d'estimer un itinéraire désiré dans le cas d'un réseau non congestionné et sert ainsi de base aux autres méthodes d'affectation. Une seconde famille de modèles d'affectation est celle des procédures stochastiques ou multi chemin qui ne prend toujours pas en compte les contraintes de capacité, mais dont la fonction d'utilité est probabiliste. Elle permet de lever la restriction de la première hypothèse présentée ci-avant, en prenant pour nouvelle hypothèse une perception des coûts inégale parmi les individus ainsi qu'une incertitude dans l'estimation des grandeurs du calcul du coût généralisé. Parmi les modèles d'affectation multi-chemin statiques les plus répandus on recense ceux de Dial (DIAL, 1971) et de Burrell (BURREL, 1968). Une variante de ces modèles est l'affectation prix-temps qui permet d'arbitrer entre une composante monétaire et une composante temporelle au niveau de la fonction d'utilité dans un contexte de choix discret. Le principe est d'identifier les « chemins efficaces », c'est-à-dire les chemins pour lesquels il n'existe pas d'alternative plus rapide et moins chère (LEURENT, 1995). La principale limite de cette famille de modèles est la non-prise en compte des contraintes de capacités en supposant un coût fixe calculé à vide. Ces méthodes ne sont pas adaptées à des réseaux routiers congestionnés. Nous présentons alors une troisième famille de modèles qui tient compte de la

dimension capacitaire des réseaux avec une fonction d'utilité déterministe. Il s'agit des modèles d'affectation à l'équilibre ou avec contrainte de capacité dont le plus répandu est le modèle d'équilibre de Wardrop (WARDROP, 1952). La charge des réseaux apparait au niveau de la définition du coût généralisé d'un lien en fonction de sa charge. En conséquence, lorsqu'un lien est trop chargé son coût en devient trop élevé et le choix se porte vers un autre lien plus intéressant en termes de coût généralisé. Enfin, une dernière famille de modèles combine la prise en compte des effets capacitaires avec une définition stochastique de l'utilité, il s'agit de l'affectation à l'équilibre avec utilité stochastique ou Stochastic User Equilibrium Assignment (SUE). Ce modèle repose sur les principes suivants. Tout d'abord, le chemin qui est choisi par chaque usager est celui qui garantit de minimiser le coût perçu. Ensuite, Ce chemin choisi de coût perçu le plus faible est également un chemin dont « aucun usager ne peut trouver un chemin lui offrant un coût perçu plus faible » (BONNEL, 2004). L'inconvénient de ces modèles est le temps de convergence des algorithmes.

En dépit des progrès des algorithmes d'affectation à l'équilibre basés sur le premier principe de Wardrop, les modèles opérationnels continuent de souffrir de limitations. En effet, ils sont « statiques » et donc chargent le réseau avec des flux qui sont stables à l'intérieur de la journée. Ainsi, ils ne prennent pas bien en compte les phénomènes évoluant avec le temps comme la congestion, ou les variations de trafic d'un jour à l'autre. Cela réduit leur potentiel d'utilisation dans le cadre des systèmes de transports intelligents. Une « affectation dynamique » pourrait permettre d'incorporer dans leur structure la dimension temporelle et l'on parviendrait à suivre l'évolution des flux sur les différents arcs du réseau dans le temps (MAHMASSANI, et al., 1992). Pour assurer les objectifs de réduction de la demande, des stratégies d'optimisation des réseaux basées sur la diffusion d'informations aux usagers sur l'état du trafic sont discutées. Pour cela, il faut mettre en place de la gestion dynamique du trafic, comme l'affectation variable des voies, un contrôle d'accès au réseau, une optimisation du fonctionnement des carrefours à feux ou une instauration de péages variables, sur la base d'information concernant l'état du réseau (Advanced Traffic Management system AMTS). Or ces techniques nécessitent une connaissance, voire une anticipation de la variation des flux dans le temps. Il est nécessaire d'avoir une cartographie dynamique du réseau à partir de laquelle, une série de variables comme la durée des trajets sur les différentes routes, la longueur des files d'attentes ainsi que leur évolution dans le temps peuvent être calculées. Ainsi, les gestionnaires du réseau peuvent évaluer l'efficacité de leurs stratégies et de leurs mesures de contrôles. Alors l'affectation dynamique est issue du besoin de modéliser les réactions des conducteurs face à de l'information trafic afin de connaitre le bon moment pour l'envoi de l'information (BUISSON, et al., 1997).

Le calage de cette étape d'affectation est une étape sensible. En effet, ce calage concerne les attributs des fonctions servant à codifier les réseaux, les coûts des liens et certains paramètres des modèles d'affectation. Pour ce faire, les données disponibles dans le meilleur des cas, sont les matrices de déplacements issues de production de données ou d'estimations dont la précision décroit rapidement avec la finesse du zonage, les données de comptage en des points donnés avec éventuellement la vitesse, les logeurs et caractéristiques des voies, des données d'exploitation des exploitants des réseau et les enquêtes de temps de

parcours. Toutes ces sources de données sont très hétérogènes en termes de qualité et de portée de l'information.

2.3 **Prendre en compte l'usage du sol**

Nous avons vu que des années 1990 à nos jours, se sont posés de nouveaux paradigmes de modélisation de la demande. Ainsi en 2012, la dernière version de la « bible des modélisateurs » des déplacements urbains aux Etats-Unis sort (CHANDRAR, 2012). On constate que la modélisation à 4 étapes est toujours là. Mais elle ne règne plus seule, elle partage le document avec les « advanced travel analysis procedures ». Ces besoins d'évolutions trouvent de multiples causes. On pourra citer les déficiences des modèles à 4 étapes pour traiter correctement les questions de gestion des pollutions dues aux transports (STOPHER, 1993), mais également les évolutions de la législation qui pèsent lourd sur la modélisation après 1990, et enfin les effets des évolutions technologiques. En effet, d'une part de nouveaux moyens de calcul ouvrent un nouveau champ de possibilités algorithmiques, et d'autre part les potentialités offertes par les nouvelles technologies d'information appliquées aux transports (les systèmes de transports intelligents ou ITS), créent un nouveau contexte propice à l'exploration des nouvelles logiques de modélisation.

La famille de modèles C (voir 3.1.2.3) contient les modèles qui prennent en compte les interactions entre les sous-systèmes. Il s'agit alors de prendre en compte en plus de l'utilité de se déplacer, l'utilité de réaliser une activité. Ainsi se sont développés des modèles dit activités-centrés. Leur ambition est de remplacer les 3 premières étapes de la modélisation à 4 étapes sur l'idée de base qu'on ne se déplace non pas pour le plaisir procuré par le trajet effectué mais pour accomplir des activités particulières. Alors, les déplacements sont le résultat des interactions avec les autres membres de notre ménage et ils sont soumis à des budgets de temps fins, ainsi qu'à des contraintes spatiales. Toutefois, le réalisme sociologique de cette approche se traduit par une complexité computationnelle importante, et ce n'est que très récemment que des modèles opérationnels basés sur les activités ont vu le jour, notamment dans plusieurs grandes villes américaines (KONSTANTINOS, Décembre 2013). De plus, l'induction, au sens de l'approche électrique, de trafic est souvent la partie la moins bien modélisée du processus. Elle recouvre néanmoins des phénomènes fondamentaux sur le plan de l'analyse économique, tels que les changements de localisations ou d'activités. Il conviendrait de mieux modéliser l'induction de trafic ou au moins d'analyser qualitativement son contenu possible. Une solution théoriquement satisfaisante est de coupler le modèle de trafic à un modèle d'activité, ce qui aboutit à un modèle représentant la relation entre usages du sol et transports (modèles « LUTI » pour Land Use Transport Interaction) (QUINET, 2013). Depuis les années 1990 aux les Etats-Unis, des programmes de recherche se sont lancés. Ils sont chargés de promouvoir de nouvelles pratiques de modélisation, capables de traiter le lien entre les questions des transports, la qualité de l'air, l'énergie, le développement économique, les usages de sol et la qualité de vie. Il faut donc des outils de modélisation capables d'intégrer la question de l'urbanisme et la question des transports, les modèles intégrés transport-usage du sol LUTI. Ces modèles intègrent les interactions entre l'offre et la

demande de transports, l'offre et la demande de biens immobiliers et la question de l'usage du sol. Il s'agit d'outils à fort potentiel pour les acteurs de la planification urbaine, pourtant il n'existe pas encore d'outils opérationnels. Certains questionnements sont toujours au stade de la recherche. Sur le plan théorique, des travaux sont en cours sur la notion d'équilibre statique ou dynamique et sur le plan pratique, on se pose la question de la disponibilité de données standardisées, du choix d'un modèle intégré ou d'une approche modulaire et également de la faisabilité technique. Des tests pour améliorer et renforcer ces outils sont en cours sous forme d'expérimentation (CEREMA, 30 septembre 2013).

2.4 **La gestion du trafic**

Dans cette partie, nous nous intéresserons également aux interactions entre l'offre et la demande, mais du point du vue de l'exploitation. Dans ce cadre le volume de la demande est supposé constant. Néanmoins, la distribution dans l'espace et dans le temps est amenée à varier car les usagers sont supposés libres de leurs itinéraires et libres de leurs choix d'horaires de départ. De même, dans ce contexte, l'offre peur varier dans le temps via des actions de régulation de trafic telles que présentés dans le paragraphe 1.2.2. Ces changements de l'offre ont pour but de modifier la distribution spatio-temporelle de la demande afin de prévenir ou de limiter les phénomènes de congestion. En effet, la principale problématique de l'exploitation est de gérer la congestion. Il s'agit d'un phénomène systémique car elle résulte des interactions entre les composantes du système, véhicule et infrastructure, et des caractéristiques individuelles de chaque composante. Nous traiterons de la modélisation du trafic routier.

2.4.1 **Le diagramme fondamental**

Afin d'opérer son réseau, un opérateur routier a besoin de mesures pour connaitre en temps réel ou non la manière dont les véhicules s'écoulent. Même si l'accès à des variables au niveau individuel, comme la trajectoire d'un véhicule, sont très intéressantes pour un exploitant, il s'agit de données auxquelles il a peu accès dans la pratique. Grâce aux boucles électromagnétiques implantées dans la chaussée, un exploitant dispose généralement des grandeurs suivantes pour un flot de véhicules.

- Le débit moyen sur le tronçon, c'est-à-dire le nombre de véhicules passant pendant une certaine période en un point donné. Il s'exprime en veh/h ou veh/s.
- La concentration, encore appelée densité, c'est-à-dire le nombre de véhicules situés sur une portion de route donnée à un instant donné. Elle s'exprime en veh/km ou en veh/m.
- Le taux d'occupation qui est, dans le cas de remontées par boucles électromagnétiques, la fraction de temps pendant laquelle la boucle est occupée. Cette grandeur permet une estimation indirecte de la concentration. Ces deux grandeurs sont proportionnelles avec un coefficient de proportionnalité qui varie selon la variabilité des longueurs des véhicules.

- La vitesse du flot de véhicules qui est le ratio du débit par la concentration (ou le taux d'occupation).

En ingénierie du trafic, les variables qui décrivent le flot de trafic sont représentées au travers d'un outil appelé diagramme fondamental. Ils sont produits soit à partir de données issues d'un modèle d'écoulement ou soit à partir de données empiriques. Commençons par décrire un modèle d'écoulement de trafic routier en exprimant les relations qui existent entre le débit, la vitesse et le taux d'occupation. On peut exprimer la densité kilométrique sur un tronçon de la manière suivante :

$$\rho = \frac{n}{L} \quad (10)$$

avec ρ la densité kilométrique,
n le nombre de véhicules d'une file qui se suivent
et L la longueur du tronçon

Le conducteur du véhicule est libre du choix de sa vitesse si la densité kilométrique de véhicules est faible, et ne l'est plus lorsque ρ est élevée. Généralement, on préfère exprimer le taux d'occupation plutôt que la densité kilométrique car les données sur les réseaux routiers proviennent principalement des boucles électromagnétiques implantées dans la chaussée. Elles renvoient un temps d'absence/présence de masses métalliques sur la chaussée que l'on peut rapidement lier à un taux d'occupation. Ainsi, on a

$$k = \frac{\sum l_i}{L} \quad (11)$$

avec k le taux d'occupation du tronçon,
l_i la longueur du véhicule de position i dans la file
et L la longueur du tronçon

De même, la vitesse est libre pour le conducteur d'un véhicule lorsque le taux d'occupation est inférieur à un taux d'occupation critique noté k_c.
La relation qui lie ρ et k est

$$k = n\bar{l} \quad (12)$$

$\bar{l}$ la longueur moyenne des véhicules de la file

Exprimons alors le débit du flot de véhicules lorsque le taux d'occupation est inférieur au taux d'occupation critique:

$$q = \rho\bar{v} = \rho v_{max} = \frac{v_{max}}{\bar{l}} k \quad (13)$$

avec q le débit, $\bar{v}$ la vitesse moyenne des véhicules sur le tronçon assimilée à *la vitesse maximale autorisée v_{max} lorsque $k < k_c$*

Exprimons maintenant le débit du flot de véhicules lorsque le taux d'occupation est supérieur au taux d'occupation critique:

$$q = \frac{1}{\bar{\tau}}(1 - k) \quad (14)$$

avec q le débit,
$\bar{\tau}$ la valeur moyenne du paramètre τ,
sachant que $\tau_i v_i$ est la distance inter − véhiculaire minimum
entre le véhicule i et le véhicule précédent $i + 1$ pour éviter une collision

Il s'agit d'un modèle consistant avec les observations expérimentales (AGUILERA, 2013).

Il existe alors trois représentations du diagramme fondamental : $q = f(k)\ (a)$; $v = f(q)\ (b)$; $v = f(k)\ (c)$. Elles sont illustrées sur la Figure 20.

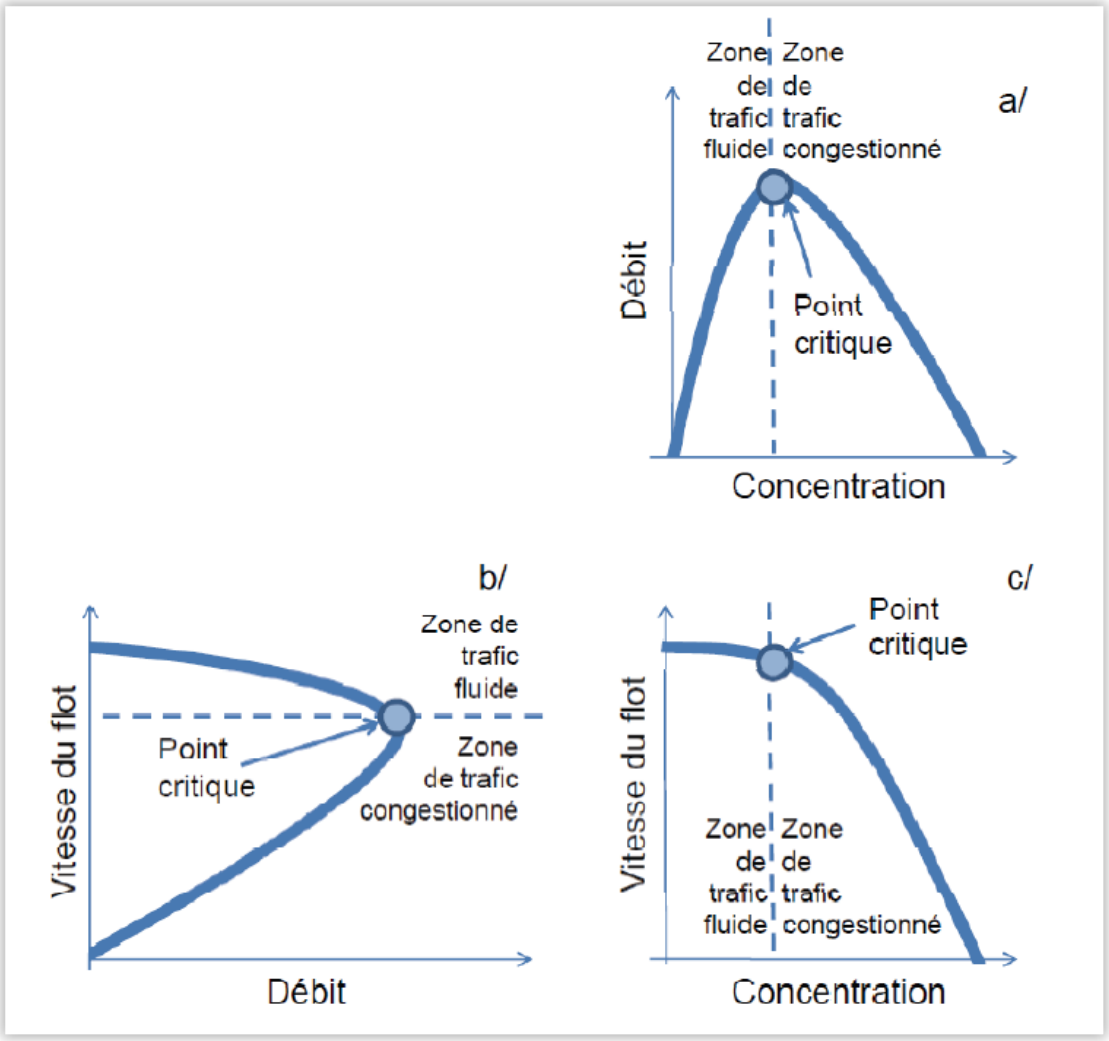


Figure 20 : les trois représentations du diagramme fondamental (BUISSON, et al., 2010)

Usuellement, on appelle diagramme fondamental la courbe qui émerge dans le plan taux d'occupation (ou concentration) – débit.

Ce diagramme fondamental permet d'introduire les notions de capacité et de qualité de service. En effet, la congestion apparait lorsque la capacité de l'infrastructure est atteinte et ne permet plus d'écouler la demande de trafic. La Qualité de Service perçue par les usagers en découle également. Dans un livret d'explications publié par le CERTU (BUISSON, et al., 2010), il est indiqué deux méthodes pour déterminer la capacité d'une infrastructure. Tout d'abord, la capacité peut être déterminée en observant les débits maximaux au pas de temps précédent le régime congestionné. Une deuxième méthode se base sur l'application d'une régression à partir de données empiriques de la vitesse en fonction du débit. Le diagramme fondamental montre deux points de fonctionnement autour du point de criticité, un régime libre et un régime congestionné. Néanmoins, en deçà du seuil critique, mais proche de celui-ci, le flot de véhicules est instable. Il existe alors un seuillage différent à prendre en compte qui caractérise à la fois la qualité de service perçue par les usagers et les conséquences pour

l'exploitant. Ces définitions sont tirées du Highway Capacity Manual pour les autoroutes interurbaines (MANUAL, 2000) :

- Niveau de service A : Le taux d'occupation est autour de 4%. Les vitesses véhiculaires sont toutes proches de la limite de vitesse. Les conducteurs ont la possibilité de changer de voie si besoin. Les autres véhicules n'influencent peu ou pas la conduite. Le confort de conduite est maximal. Aucun bouchon ne se forme en cas de perturbation importante de type accident.
- Niveau de service B : Le taux d'occupation est autour de 7%. Les vitesses véhiculaires restent proches de la limite de vitesse. Les changements de voie nécessitent plus d'attention. Le confort de conduite reste à un niveau important. Aucun bouchon ne se forme de manière durable en cas de perturbation importante.
- Niveau de service C : Le taux d'occupation est autour de 11%. Les vitesses commencent à décroître. Les changements de voie requièrent une attention particulière. Les conducteurs peu expérimentés ressentent une gêne. Il est probable qu'un bouchon se forme en cas de perturbation importante.
- Niveau de service D : Le taux d'occupation est autour de 17%. Le flot est en limite de stabilité. Les changements de voie deviennent difficiles. Le niveau de vigilance requisest important. Le confort de l'ensemble des conducteurs décroit. Une perturbation minime peut provoquer un bouchon. Des ondes de freinage peuvent survenir de l'aval.
- Niveau de service E : Le taux d'occupation est autour de 25%. La capacité est atteinte. Les vitesses restent relativement élevées, mais le flot est très instable. Les changements de voies sont difficiles. Une attention constante et soutenue est requise. L'inconfort ressenti par les conducteurs est important. Toute perturbation en aval, même minime, se répercute en amont, et à tendance à s'amplifier.
- Niveau de service F : Le taux d'occupation dépasse 30%. Des arrêts complets fréquents, plus ou moins prolongés, sont nécessaires. Il s'agit du niveau de service rencontré lorsque la demande dépasse structurellement la capacité.

2.4.2 **Modéliser le trafic**

Il existe plusieurs approches pour modéliser ou simuler le trafic. Premièrement, à grande échelle, le trafic peut être modélisé commue un fluide. Cette approche hydrodynamique s'appuie sur une description à une échelle macroscopique du trafic autour de trois variables qui expliquent la dynamique du trafic. Ce sont les variables présentées précédemment et qui apparaissent dans le diagramme fondamental, à savoir le débit, la concentration (ou le taux d'occupation) et la vitesse. Ensuite, une approche microscopique facilite une bonne description du trafic à petites échelles. Cependant, le nombre de paramètres à prendre en considération augmente la difficulté de la calibration de manière significative. Ces simulations microscopiques sont adaptées à des tests de scénarii ou des aides de conception ou d'aménagement. Les comportements à plus large échelle ne sont pas accessibles par cette approche. Enfin, il existe des approches à automates cellulaires ou multi-

agents tels que Transims qui modélisent l'ensemble des déplacements et qui offrent la possibilité de simulations efficaces de très grands systèmes mais pour lesquels le recueil des données s'avère complexe (SMITH, et al., 1995). Ces méthodes étant récentes, il est difficile d'avoir suffisamment de recul sur leur capacité opérationnelle.

Nous avons parlé dans le paragraphe 2.2.2.4 des modèles d'affectation. Il existe deux types d'affectations, l'affectation statique et l'affectation dynamique. On parle d'affectation statique lorsque la dynamique de congestion des réseaux n'est prise en considération que par l'intermédiaire de fonctions débits-temps de parcours d'un tronçon. Dans le cas d'une affectation dite dynamique, la dimension temporelle de l'écoulement est considérée. L'affectation dynamique est aujourd'hui à la frontière de l'opérationnel (MAHMASSANI, et al., 1992).

3 Conclusion

Les outils et les méthodologies pour traiter des problématiques rencontrées par les différents acteurs de l'offre de transport ont dû s'adapter aux mutations du domaine. Les efforts de construction sont délaissés pour des efforts d'optimisation et de régulation des réseaux existants multimodaux et intermodaux. Les transports sont à traiter dans leur contexte économique, social et environnemental. Alors, grâce aux progrès informatiques et mathématiques, les modèles se sont complexifiés pour une meilleure représentation de la réalité des interactions entre les différents éléments. La multiplication des enjeux et des acteurs a entrainé une diversité importante des modèles. Cela engendre une baisse de lisibilité, des paramètres et des variables nombreuses soumises à des hypothèses fortes qui ne sont pas toujours vérifiées. Effectivement, les outils de modélisation et de simulation de la mobilité sont nombreux. Nous avons présenté trois familles de modèles auxquels les acteurs de l'offre ont recours pour des besoins différents. En effet, la famille de modélisation à quatre étapes est un outil standard de la planification qui permet de prédire la demande de déplacements sur une zone d'étude. La prise en compte de l'usage du sol disponible dans les modèles stratégiques de type LUTI est un outil précieux pour les aménageurs. Enfin, la modélisation du trafic répond aux problématiques d'exploitation. Pour produire des estimations adaptées aux analyses auxquelles se prêtent les acteurs de l'offre, ces modèles de nature différente, requièrent pour leur alimentation et leur calibration des sources de données dédiées. Au travers de la description de la structure de ces modèles et des recommandations de modélisations posées par les acteurs, on devine un besoin de compléter les sources de données actuellement disponibles. Nous avons identifié quatre axes de perfectionnement des modèles possibles grâce à une évolution des informations contenues dans les données.

Tout d'abord, les recommandations et la tendance générale d'évolution des modèles vont dans le sens d'une meilleure représentation des comportements individuels, au travers des approches désagrégées, mais aussi des valeurs unitaires qui expliquent les processus des choix des usagers. Ensuite, la question de l'approche dynamique est au cœur du débat. La dernière édition du manuel TRB sur la modélisation des déplacements urbains, adressée à des professionnels, consacre plusieurs passages à des questions relatives à l'affectation

dynamique, alors que l'édition précédente de 1998 ignorait complétement le sujet. Quelle est la prochaine étape ? Va-t-on assister à une alliance prochaine entre la modélisation basée sur les activités, qui ambitionne de remplacer les 3 premières étapes de la modélisation à 4 étapes, et l'affectation dynamique dans la quatrième étape ? (KONSTANTINOS, Décembre 2013). Puis, les "effets systémiques" des transports sont inclus dans les modèles de transport actuellement disponibles. Ces effets systémiques sont des conséquences de l'état du sous-système de transport sur un aspect, un acteur interne ou un acteur externe du système. Dans l'état de l'art, les interactions entre le consommateur final et ses fournisseurs, les effets d'entrainement de la production économique, les conséquences de rendements des ressources employées pour les opérateurs et les conséquences de qualité de service pour les usagers, et les processus de choix des caractéristiques de déplacement, sont partiellement traités par les modèles disponibles, notamment pour illustrer les comportements des usagers. La rétroaction forte sur l'offre de l'état de fonctionnement n'est pas considérée. Certains modèles désagrégés de demande pour les voyageurs prennent en compte la programmation spatio-temporelle des activités et donc des déplacements. Enfin, l'influence du sous-système de transport sur l'espace est abordée par certains modèles expérimentaux intégrant à la fois transport et usage du sol (LEURENT, 2013). Enfin, Dans le cadre des bilans LOTI, un large éventail de bilans ex-post est à disposition. Ces bilans sont très importants pour faire évoluer à la fois les modèles mais également les méthodologies et les procédures qui définissent le cadre des études, notamment les définitions d'hypothèses. Cependant, ils nécessitent de reproduire l'enquête. Ainsi, une source complémentaire idéale pour répondre à ses évolutions de besoin de modélisation doit permettre une représentation des comportements à l'échelle de l'individu, de manière dynamique et mesurer les aspects systémiques à des fins d'étude ex-ante ?, mais également permettre la répétabilité de l'enquête pour des études ex-post.

Ces mutations de problématiques, accompagnées par des besoins d'outils, soulignent des besoins de description fine à l'échelle de l'individu, capables de soutenir les contraintes de reconstruction de la dynamique des phénomènes et les besoins de suivi en temps réel pour l'exploitation, tout en permettant des agrégations aux échelles spatiales et temporelles supérieures. Se pose alors la question de l'adaptation des sources de données pour consolider les modèles en développement. Sur le principe théorique de fonctionnement technique, les données de téléphonies semblent posséder des caractéristiques intéressantes en ce qui concerne des mesures à l'échelle individuelle mais agrégeables sur un territoire de manière dynamique. Comme toute source de données, la mesure de déplacements à partir de remontées des réseaux de téléphonie mobile va présenter des champs d'applications privilégiés. Dans la partie II, après un état de l'art des méthodes de mesures de déplacement, nous reconstruirons des indicateurs déjà disponibles avec des sources de données dont se servent certains acteurs pour montrer la faisabilité d'usage d'une telle source et dégager son potentiel de source complémentaire répondant aux besoins d'évolution d'alimentation des modèles.

Conclusion de partie

Les analogies entre les étapes qui ont mené aux réseaux de transports et de télécommunications mettent en valeur des similarités entre les deux domaines. Le schéma ci-dessous illustre cette chronologie de déploiement des réseaux par phases sous l'angle de la segmentation de la demande, de la gouvernance, de l'exploitation et des problématiques de modélisation des déplacements (voir Figure 21).

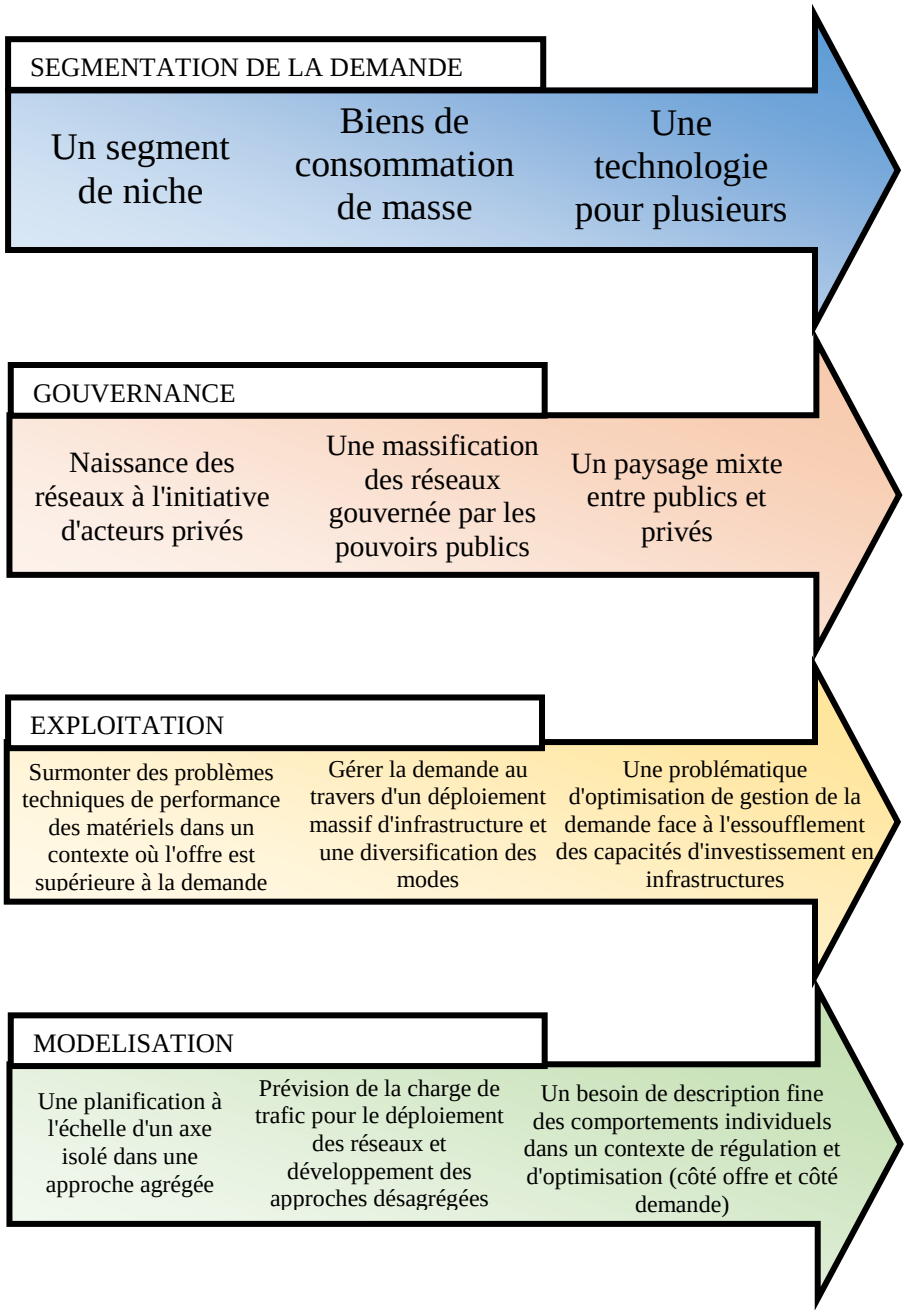


Figure 21 : synthèse de la chronologie des étapes de mise en place des réseaux de transports sous l'angle de la segmentation de la demande, le la gouvernance, de l'exploitation et de la modélisation

L'angle des avancées techniques se différencie des autres aspects. En effet, d'une part, sur la Figure 22 on observe 4 phases, et d'autre part, malgré un certain essoufflement dans les avancées sur les matériels roulants/terminaux mobiles et les axes de circulation/canaux de propagation (ceci est un peu moins vrai dans le domaine des télécoms où de larges efforts sont toujours en cours sur les technologies de codage de source, d'ajout de fonctionnalités aux terminaux mobiles etc.), des effort techniques se poursuivent sur d'autres sujets. Notamment, la question de réduction de consommations énergétiques dans une problématique écologique et durable porte, dans le cas des transports, sur la pérennisation des infrastructures et sur les politiques de prise en compte des impacts environnementaux. Ainsi, ces considérations doivent être modélisables dans les outils de planification et les impacts sont à mesurer en condition d'exploitation.

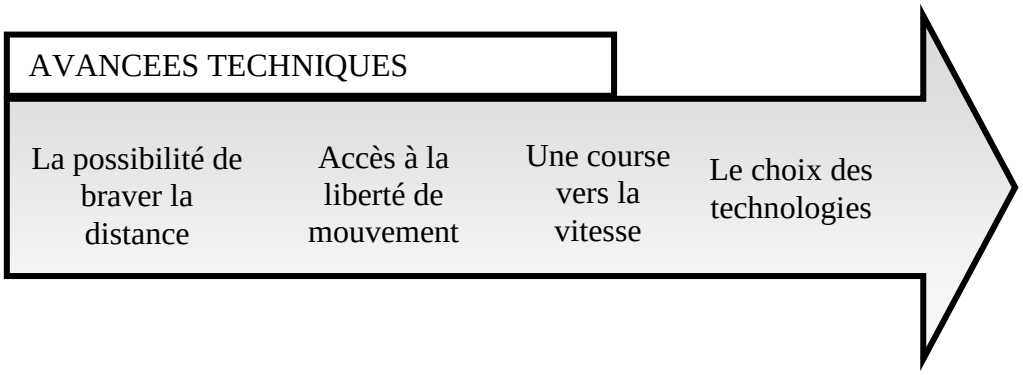


Figure 22 : synthèse de la chronologie des étapes de mise en place des réseaux de transports sous l'angle des avancées techniques

Au cœur des réseaux se trouvent les usagers, dont le constat des pratiques de mobilité qui tendent à se complexifier dans un environnement concurrentiel, amène la question de la pertinence des outils (modèle ou indicateur) de représentation de la mobilité. En effet, selon le ou les phénomène(s) que l'on cherche à mesurer et les objectifs d'études, la représentativité des indicateurs peut s'avérer inappropriée. Par exemple, l'indicateur du nombre moyen de déplacements quotidiens par personne ne permet pas à lui seul de rendre compte des impacts environnementaux. De plus, l'offre de transport propose une diversité de modes et de combinaison de modes avec des épisodes localisés dans le temps et dans l'espace de congestion. Alors, la gestion des externalités et de la continuité de service ainsi que l'exploitation doivent se baser sur des mesures spatio-temporelles fines, disponibles à une fréquence rapprochée de celle des phénomènes à observer. Cela va dans le sens d'un besoin d'observations dynamiques des rythmes et des variations des comportements individuels. En effet, dans un monde de plus en plus connecté, chaque individu cherche à optimiser son schéma d'activité en limitant "les pertes de temps de déplacement". Il s'agit alors de modéliser ces comportements de choix des attributs d'un déplacement, ou d'une chaîne de déplacement, dont un des déplacements unitaires peut être dévié du choix d'origine avec un accès à une connaissance dynamique des conditions de confort d'usage du réseau de transport. Malgré l'apparente stagnation qui ressort de certains indicateurs à un niveau agrégé, on constate une

évolution des distributions selon les motifs (notamment loisirs) et une dissymétrie accentuée des pratiques de déplacements selon le moment de la semaine. Se pose alors la question de la disponibilité des données pour mesurer ces phénomènes moins récurrents que les déplacements domicile-travail un jour ouvré moyen.

Finalement, les familles de modèles que nous avons introduits présentent une limite commune : approcher une description fine passe par l'accès à des données à des échelles suffisamment basses pour rendre compte des dynamiques comportementales individuelles et leurs impacts sur différents agents/systèmes du territoire. Nous avons vu qu'une source complémentaire idéale pour répondre à ces évolutions de besoin de modélisation devrait permettre une représentation des comportements à l'échelle de l'individu, de manière dynamique et de mesurer les aspects systémiques à des fins d'étude ex-ante, mais également permettre la répétabilité de l'enquête pour des études ex-post. On notera que les téléphones mobiles sont des capteurs embarqués au niveau des individus qui utilisent des services télécoms de manière personnelle, connectés en permanence à un réseau mobile qui couvre l'ensemble du territoire d'une nation et dont le fonctionnement est assuré tout le temps. De plus, sachant que le taux de pénétration de la téléphonie mobile en France a dépassé les 100% et que ces terminaux mobiles accompagnent les usagers en déplacement, qu'ils soient utilisées on non pour accéder à des informations sur le trajet, ne pourraient-ils pas être utilisés comme capteurs de déplacements individuels?

Partie II : Mesure des déplacements à l'aide de messages de signalisation: application à la construction d'indicateurs de Qualité de Service sur la ligne A du RER

Introduction

Cette partie justifie le choix d'exploiter une source de données issues des réseaux radio-mobiles comme instrument de mesure des déplacements. Elle comprend deux chapitres. Le premier (chapitre 4) présente une revue bibliographique des méthodes de collecte de données utilisées par les acteurs de l'offre de transport pour alimenter modèles et analyses de mobilité. Le deuxième chapitre (chapitre 5) détaille notre première expérience de mesure à grande échelle des déplacements sur un réseau de transport, sur la partie souterraine de la ligne du Réseau Express Régional (RER) francilien.

Deux familles de sources de données sont identifiées dans le chapitre 4, selon le caractère actif (dans le sens où une action est attendue de sa part) ou non de l'enquêté. Dans cette acception, les enquêtes transport traditionnelles sont qualifiées d' « actives ». Les mesures réalisées par le biais de capteurs sont qualifiées de « passives ». Cette dernière famille comprend deux sous-familles, selon que les capteurs soient fixes ou mobiles. La méthode de collecte de données que nous envisageons appartient à la famille des enquêtes passives avec un réseau de capteurs mobiles, les téléphones portables. Parmi, les données que l'on peut extraire des réseaux de télécommunications, nous avons choisi les données dites de « signalisation » dans lesquelles se reflètent en temps réel une part non négligeable de l'activité des téléphones mobiles (et donc de leurs porteurs) sur un territoire. Ces caractéristiques se rapprochent des besoins évoqués dans la partie I. Le chapitre 4 introduit les notions techniques de signalisation et de fonctionnement des réseaux de télécommunications radio-mobiles.

Cependant, les enseignements tirés de la partie I sont doubles. Outre la caractérisation d'une source de mesures de déplacements, nous en avons également dégagé quelques sujets plébiscités par les différents acteurs de l'offre de transport. Par exemple, pour construire une alternative modale à l'automobile individuelle, il est utile de pouvoir accéder à des indicateurs décrivant finement les paramètres qui vont influencer les choix modaux. Parmi les nombreux sujets intéressant les acteurs de l'offre des transports en commun, nous avons choisi d'en traiter deux à partir de données de signalisation: la production d'indicateurs de qualité de service et le compromis temps de parcours/confort en véhicule. Alors, le chapitre 5 donne les bases techniques nécessaires au traitement détaillé de ces sujets et particulièrement les résultats du premier sujet. Le deuxième sujet sera abordé dans la partie III. Nous détaillerons le cheminement méthodologique ainsi que des indicateurs résultants tels que la densité de passagers par train, la fiabilité d'un tronçon ou encore le volume de voyageurs sur une ligne. Ces estimations de volume seront comparées au même indicateur construit à partir d'une source billettique afin de valider notre approche méthodologique.

Chapitre 4 : Comment « signaler » un déplacement ?

Introduction

La partie I a exprimé les besoins croissants de méthodes d'analyse pour la prévision, la régulation et la gestion temps réel des infrastructures de transport. Nous avons traité des outils dont les acteurs de l'offre disposent actuellement, à l'état opérationnel ou à l'état d'investigation. Nous avons vu également que l'étude de l'adaptation des usagers en mobilité sur un réseau complexe a montré le besoin de mieux observer ces processus de choix des attributs des déplacements. Historiquement, on peut attribuer aux évolutions fondamentales des modèles le besoin de développement de nouvelles sources de données pour les alimenter. De nouvelles approches de mesures de déplacements sont intéressantes et nécessaires sous deux aspects. Premièrement, elles débutent la chaine de simulation en approvisionnant les modèles et deuxièmement elles permettent une validation ex-post des solutions élaborées à partir des prévisions produites.

Ce chapitre est donc consacré à un élément fondamental pour les acteurs de l'offre, les données sur les déplacements. Bien que dans un processus d'évaluation d'un scénario de transport, la source de données soit l'élément d'entrée, nous avons choisi d'aborder ce point en conclusion. Ceci est motivé par deux aspects du procédé rédactionnel. Tout d'abord, décrire l'évolution des problématiques au cours des années nous a permis d'apprécier le

fonctionnement du domaine des transports. Ensuite, le point technique central de cette thèse se pose sur la mesure de déplacements, il était donc adapté de terminer par l'état de l'art des méthodes de collecte de données et de leur traitement pour estimer les déplacements.

Ainsi, ce chapitre est structuré en deux sections. Nous débuterons par un état de l'art des méthodes de collectes d'informations sur les déplacements pour justifier notre approche d'utilisation des remontées des réseaux radio-mobiles pour la mesure de déplacements. La section qui suit sera consacrée à la méthodologie de collecte des données utilisées dans ce travail de thèse.

1 L'avènement des méthodes de collectes numériques

La modélisation des transports a connu des évolutions significatives depuis les années 1950. Toutefois, l'autre composante des outils de mesure des déplacements, à savoir la méthode de recueil de données n'a pas connu « de rupture mais plutôt des évolutions graduelles » depuis les années 1970 (KONSTANTINOS, Décembre 2013). Ces évolutions graduelles sont le fruit de besoins d'ordre économique visant à réduire la taille de l'échantillon grâce à l'évolution des techniques d'échantillonnage. A cela s'ajoutent les évolutions sociétales qui entrainent un biais de représentativité parmi les populations refusant les enquêtes. Enfin, le besoin principal est la lutte contre la sélectivité de la mémoire humaine qui omet une partie des déplacements réalisés. En effet, entre 20 et 30% des déplacements ne seraient pas mesurés lors d'interviews (STOPHER, et al., 2007). Néanmoins, l'avènement des technologies de l'information et de la communication semblent ouvrir une porte vers d'autres solutions de recueil.

Ce paragraphe dresse un état de l'art des méthodes de collectes de déplacements. Nous distinguerons deux familles de méthodes de recueil de données : les méthodes actives pour lesquelles les unités (ménages/individus) enquêtées sont directement impliquées et les méthodes passives qui ne nécessitent aucune interaction entre unités enquêtées et enquêteurs. Les avancées technologiques ont permis un déploiement important des méthodes passives grâce à la multiplication de capteurs statiques et mobiles.

1.1 Les méthodes actives de recueil de données

Dans ce paragraphe, nous présentons succinctement les méthodes actives de recueil classiquement mises en œuvre. Une présentation rapide de ces méthodes nous permettra de nous interroger sur leurs avantages et leurs inconvénients pour répondre à la problématique de description fine des comportements des usagers des réseaux de transport.

1.1.1 **Présentation des méthodes de recueil**

En France, on recense un certain nombre de méthodes de mesure des déplacements que nous qualifierons d'actives car il s'agit d'enquêtes. Ces enquêtes sont réalisées au domicile des ménages, par téléphone ou encore au niveau de points fixes sur des itinéraires (« enquêtes cordons »). Toutes ces méthodes sont validées, standardisées et servent de base de travail pour les différents acteurs du transport car leurs limites sont connues et maitrisées.

1.1.1.1 L'Enquête National Transport et Déplacements (ENTD)

En France, une seule enquête est réalisée à l'échelle nationale : l'Enquête Nationale sur les Transports et Déplacements (ENTD). Elle est reconduite tous les 10 ans environ. Plus précisément, les ENTD s'articulent autour de quatre thèmes principaux. Le premier est la mobilité régulière qui concerne surtout les déplacements habituels de nature contrainte (domicile-travail, domicile-étude et domicile-garde d'enfant). Deux parties de la mobilité sont traitées par rapport à la distance de l'activité au domicile ; la mobilité locale pour des déplacements vers une activité située dans un rayon de 80km à vol d'oiseau du domicile et les mobilités longue distance. Enfin, la connaissance du parc des véhicules et de leurs usages se décompose en différents axes. Elle recense une description des véhicules possédés par les ménages, la description de leurs usages ainsi que des informations sur la pratique de la conduite (détention de permis, pratiques et accidents de circulation). Une évaluation de l'accessibilité aux transports au commun (abonnement et réductions tarifaires) est également effectuée. Le caractère complet d'une telle enquête permette de traiter d'une vaste gamme de sujets allant de la concurrence entre modes de transport, la spécification en fonction des motifs, en passant par la consommation d'énergie et les déplacements touristiques. La dernière ENTD date de 2007-2008. Elle a été conduite par le ministère chargé des transports et l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) qui assure la maitrise d'œuvre. La maitrise d'ouvrage est déléguée au SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques prospectives). Les méthodes de recueil sont standardisées et garantissent ainsi des comparaisons dans le temps et dans l'espace (ARMOOGUM, et al., 2007-2008). Evidemment, la richesse d'une telle enquête à l'échelle nationale entraine des coûts temporels. Par exemple, la réalisation de l'ENTD de 2008 s'étend de mai 2007 à avril 2008.

1.1.1.2 Les Enquêtes Ménages-Déplacements (EMD)

Les EMD (Enquêtes Ménages-Déplacements) sont une méthode de collecte classique et largement répandue pour l'étude des déplacements quotidiens des populations urbaines (ORTUZAR, et al., 2011). En France, les EMD existent depuis plus de trente ans. Les définitions, les concepts et la méthode de recueil ont peu évolué pendant cette période afin d'assurer la continuité des séries statistiques. Néanmoins, les enquêtes dans leur contenu se sont adaptées afin de tenir compte des avancées de la recherche en statistique, mais surtout des nouveaux besoins exprimés par les collectivités locales (CERTU, janvier 2013). De telles enquêtes sont standardisées par l'Etat français car elles constituent un outil essentiel pour

l'Etat dans son rôle d'évaluateur des politiques publiques. Cela garantit une méthode de recueil de données harmonisée, rigoureuse et pérenne car les données sont fiables et comparables dans le temps et dans l'espace.

Les enquêtes ménages sont un des outils essentiels à la réalisation d'études de déplacements décrivant la mobilité quotidienne des personnes habitant dans un périmètre donné. Ce type d'enquête est réalisable à plusieurs échelles spatiales du territoire : EMD pour les agglomérations, EDVM (enquêtes Déplacements Villes Moyennes) et EDGT (Enquêtes Déplacements Grand Territoire). En France, elles sont réalisées par les collectivités locales qui reçoivent une assistance de la part des CETE (Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement). Des informations relatives à la maitrise d'œuvre sont mises à disposition par exemple par le CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux de Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques). Rassemblées dans une base de données nationale, ces informations permettent des études et une évaluation des politiques de déplacement urbain (PDU).

La méthode « standard CERTU » repose sur quelques principes essentiels :

- Les enquêtes sont réalisées au domicile des ménages dont chaque personne âgée de plus de 5 ans est interrogée.
- Les recensements portent sur les déplacements effectués la veille du jour d'enquête.
- L'ensemble des paramètres de chaque déplacement est recueilli (motif, mode(s), origine, destination, heure de départ et heure d'arrivée).
- Les enquêtes portent sur un échantillon représentatif de la zone étudiée. Cet échantillon est tiré aléatoirement.

Une enquête « classique » contient quatre questionnaires portant sur le ménage, les personnes, les déplacements et les opinions. Des questions supplémentaires peuvent être ajoutées à l'enquête. Les enquêtes ménages-déplacements ont pour vocation de reconstituer la mobilité des habitants d'une zone lors d'un jour ouvrable « moyen », c'est-à-dire les mardis, mercredis et jeudis hors des périodes de vacances scolaires et jours fériés, de mi-octobre à mi-avril. Cela implique des contraintes fortes dans le déroulement de l'enquête. En effet, les actifs ne sont généralement présents à leur domicile qu'à partir de 18h30. Alors, la durée d'enquête sur le terrain est de 10 semaines en moyenne. La Figure 23 illustre le type de données disponibles pour chaque individu. On notera la richesse des informations fournies sur les activités réalisées, les modes de transport utilisés, ainsi que les horaires favorisés. On notera également que la dimension spatiale est plus problématique. En effet, la localisation exacte des individus n'est pas connue. Chaque activité est ainsi localisée approximativement dans une zone de déplacement, tandis que les trajets réellement effectués par les individus dans le réseau de transport ne sont pas recensés, ou avec un biais non négligeable (CERTU, janvier 2013).

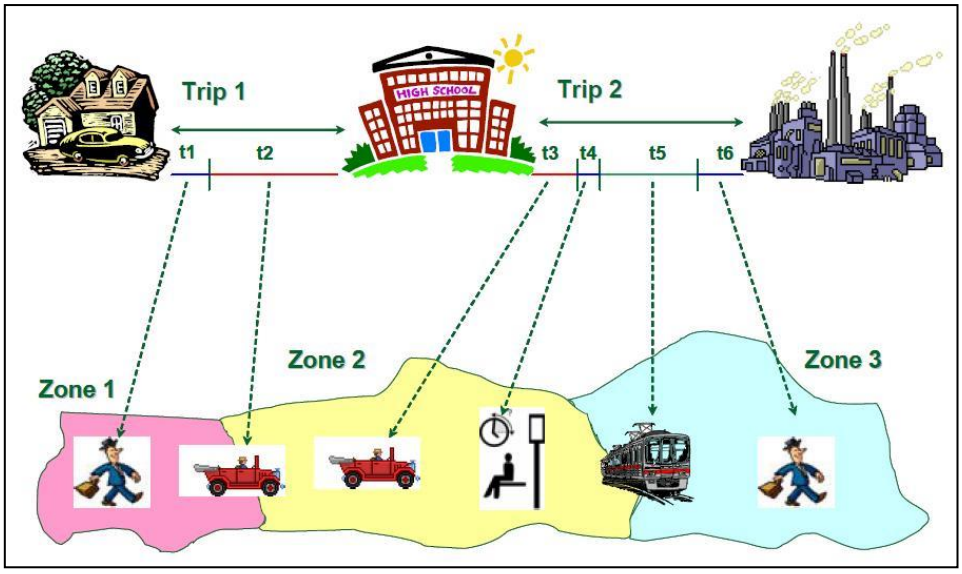


Figure 23 : schéma des informations fournies par les EMD

Une EMD particulière, appelée Enquête Globale Transport (EGT) a lieu tous les 10 ans sur les ménages franciliens. Elle est pilotée par le STIF (Syndicat des Transports de l'Ile de France) et la DRIEA (Direction Régionale Interdépartementale de l'Equipement et de l'Aménagement). L'EGT a pour vocation de dresser une vue d'ensemble de la mobilité des franciliens, essentielle pour définir les politiques de déplacements adaptés aux besoins. De plus, cette enquête renseigne sur l'équipement des ménages ainsi que la détention d'un permis de conduire et/ou d'abonnement à des modes collectifs. Cependant, certaines facettes de cette enquête nécessitent des améliorations. A ce titre, la méthodologie d'enquête de l'EGT de 2010-2011 porte une attention particulière aux déplacements courts alors que les éditions antérieures présentaient quelques lacunes quant à l'observation de ces déplacements courts et/ou occasionnels qui n'étaient pas toujours mentionnés, mais aussi quant à la précision de l'itinéraire réellement parcouru. Cette nouveauté dans la méthodologie entraine des difficultés d'interprétation d'évolution de certains indicateurs par rapport aux enquêtes précédentes (OMNIL, juillet 2012). Ce nouvel inconvénient introduit s'ajoute à différentes limitations de cette source pourtant nécessaire et très exploitée par les acteurs du transport. Tout d'abord, on peut noter des « imperfections » dans la construction de l'enquête. Par exemple, la distance euclidienne est appliquée au lieu de la distance réelle parcourue sur le réseau de transport. Ceci accroit les imprécisions sur les estimations vitesses de déplacement d'autant que les durées de temps de trajet sont déjà recueillies comme interprétations des enquêtés. De plus, la complexité du questionnaire le rend difficile à administrer, et les enquêteurs doivent faire face à une augmentation du refus de recevoir des enquêteurs à domicile. Ensuite, le dépouillement et l'analyse des données est un processus extrêmement long d'environ 18 mois en raison de la richesse des enquêtes mais aussi de leur construction et leur processus de recueillement « manuel ». Finalement, le coût (environ cinq millions d'euros pour l'actuelle EGT 2009-2011 en Île-de- France pour 18 000 ménages) est un réel

frein à la mise en place d'enquêtes de cette envergure. Ce coût est dû en grande partie à l'intervention humaine. En effet, les interviews sont en face-à-face et durent 1h30 en moyenne, les enquêteurs se déplacent à domicile et leur taux de productivité journalier est inférieur à un. Ce coût élevé a pour conséquence une fréquence de réalisation faible d'une enquête, tous les dix ans en moyenne.

1.1.1.3 Les enquêtes Origine-Destination

Les enquêtes O-D ont été très utilisées dans les années 1960 et 1970 dans les grandes aires urbaines des pays industrialisés et dans les quelques grandes villes des pays émergents. Ce type d'enquête est principalement employé pour deux applications : la prévision de trafic et l'alimentation des modèles activités-centrés lorsque les informations sont suffisamment fines et que les données sur l'infrastructure des activités (heure d'ouverture des lieux d'activités) sont disponibles. Dans le premier cas d'application, l'objet principal d'intérêt est le trajet entre une origine et une destination, plus que les composantes comportementales associées, d'où le terme enquête O-D. De manière générale, l'échantillon de données doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Recueil de données basées sur « un trajet », celui-ci étant relié aux modes de transports empruntés, aux lieux accédés, au temps de parcours, à la longueur du trajet, etc.
- L'inclusion de tous les modes de transports, même les modes doux
- Des mesures au niveau très désagrégé, voir individuel si possible, des motifs de déplacements
- Une couverture temporelle la plus large possible (au moins une journée de 24h)
- Un recueil des informations de mobilité de tous les membres d'un ménage
- Une qualité des données suffisamment robuste pour une utilisation désagrégée

1.1.1.4 Les enquêtes cordons

Ce type d'enquêtes a pour vocation la mesure de flux autour d'une zone. L'étendue de l'enquête est délimitée par une ligne imaginaire appelée « cordon ». Il s'agit le plus souvent des limites communales, ou de quartiers. Cette bordure extérieure, ou cordon externe est choisie en fonction des besoins de l'enquête. Le but de cette délimitation est de pouvoir quantifier spatialement des variables telles que la population ou le nombre d'emplois (ORTUZAR, et al., 2011).

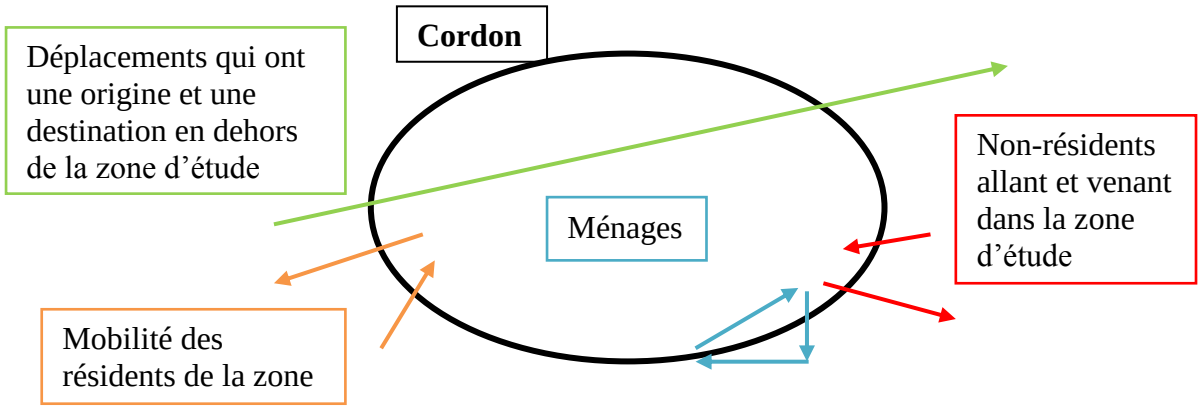


Figure 24 : représentation des éléments observés lors d'une enquête cordon

Etudier uniquement les déplacements à l'intérieur du cordon n'est pas suffisant car, comme indiqué sur la Figure 24, des déplacements sont susceptibles de traverser la zone d'étude. Pour une étude complète, les données suivantes sont nécessaires :

- Une enquête ménage déplacement sur les ménages de la zone d'étude
- Des données cordons, c'est-à-dire sur les déplacements qui franchissent le cordon, qu'ils soient entrants ou sortants de la zone.
- Des données de comptage de trafic
- D'autres informations comme des données comportementales, d'usage des sols, sur les infrastructures du territoire étudié, etc.

Ce type de recueil de données présente les mêmes limites que les méthodes citées précédemment en termes de coûts, de représentativité des échantillons et de leur caractère statique. De plus, par essence, elles sont principalement utilisées pour des comptages avec le minimum d'informations concernant les attributs des déplacements. Cette méthode ne permet pas de recueillir de connaissance sur les déplacements internes à la zone d'étude. Comme les enquêtes Origine-Destination, cette méthodologie est souvent déployée en complément d'autres enquêtes.

1.1.2 **Des méthodes adaptées aux nouveaux besoins ?**

Le caractère actif de l'enquête vient de l'interaction directe entre un enquêteur et un enquêté. Dès lors, la mise en place de telles enquêtes est lourde, coûteuse en temps et en ressources. Un compromis est à trouver entre la quantité d'informations à questionner, l'étendue de la zone d'enquête, la durée de l'enquête, la fréquence de renouvellement de l'enquête et bien sûr des ressources disponibles pour sa réalisation.

Néanmoins, les questionnaires de ces enquêtes sont très complets et permettent d'avoir accès à un très large panel de caractéristiques d'une population. De plus, la désagrégation jusqu'au niveau de l'individu est atteignable. Ces enquêtes constituent une source très riche d'informations sur les usagers des transports. Notamment la pratique du

réseau de transport et les composantes personnelles de choix des attributs des déplacements sont relatés. Ainsi, le point fort de telles sources est la possibilité qu'elles offrent de mettre en relation des facteurs individuels avec les déplacements qui ont effectivement été réalisés. Cette méthode de collecte permet notamment d'accéder à une catégorisation des activités ainsi qu'à des caractéristiques individuelles de démographie sociale, à l'instar des méthodes passives classiques préférées pour les études à objectifs larges (JIANG, et al., 2012).

Cependant, certaines limitations de cette méthode de recueil peuvent la rendre mal ou non adaptée aux nouveaux besoins de modélisation. Premièrement, le point discriminant est le besoin d'accéder aux caractéristiques d'une population de manière quasi-exhaustive. En effet, cette connaissance est nécessaire pour l'analyse des facteurs déterminant les comportements de mobilité. Or, pour réduire les coûts budgétaires et temporels, l'échantillon d'enquêtés doit être réduit au maximum, tout comme la fréquence des enquêtes. Ne serait-il pas intéressant d'avoir des informations moins complètes sur un plus grand nombre d'enquêtés et plus fréquemment ? Deuxièmement, les échantillons de ces enquêtes sont constitués à partir des ménages recensés en tant que résidents d'un périmètre. Les segments d'individu « de passage » sur une zone tels que des touristes ou des excursionnistes n'apparaissent que dans les enquêtes menées dans leur zone de résidence. De plus, les évolutions sociétales vont biaiser la « population enquêtable » par le fait que la volonté de répondre à une enquête est en forte baisse, et ainsi ce sont généralement les personnes les moins mobiles qui s'avèrent être les plus disponibles pour des enquêtes (KONSTANTINOS, Décembre 2013). Enfin, pour des raisons de coût, les tailles des échantillons sont réduites ainsi que le périmètre d'enquête. Ainsi, les méthodes actives, souvent restreintes dans l'espace, imposent alors des limitations lors des études des caractéristiques d'un système urbain dans son ensemble, notamment pour l'identification des « clusters » de mobilité (YUAN, et al., 2012). Un compromis est donc à trouver entre l'accès à des variables explicatives des comportements de déplacements et des contraintes liées à la taille de l'échantillon, sa représentativité et la fréquence de renouvellement de l'enquête (NATURE, 2008). Troisièmement, une grande majorité de notre compréhension des systèmes urbains provient de ces méthodes actives considérées comme traditionnelles. Bien que ces méthodes permettent d'accéder à des informations très détaillées sur les comportements urbains, les difficultés de mises à jour des jeux de données limitent la possibilité d'une observation dynamique et continue des phénomènes engendrés par les déplacements urbains (READES, et al., 2007). De plus, la procédure même d'enquête « porte à porte » ne permet pas à cette méthode de collecte de sortir de son caractère statique. Ainsi, des phénomènes évoluant dans une plage temporelle et spatiale faible, à l'échelle de la journée par exemple, telle que la congestion, ne peuvent être recensés. Enfin, les enquêtes ne peuvent pas s'affranchir de la « sélectivité » de la mémoire humaine. En effet, il est rare d'avoir accès à des itinéraires précis entre deux activités, même pour des trajets quotidiens, et les variations sont souvent oubliées. Ainsi, les trajets à caractère exceptionnel, tels que ceux pour motifs achats ou loisirs, ou encore les trajets secondaires d'une chaine, sont assez difficiles à recenser. De plus, la différentiation du jour de la semaine ou de la saisonnalité ne fait généralement pas partie des enquêtes classiques. Par exemple, les EMD ont pour but de représenter les mobilités pour un

jour ouvré moyen. Ainsi, les comportements inhabituels, ou les faibles variations par rapport à des itinéraires habituellement empruntés sont très difficiles à mesurer.

La construction de nouveaux modèles de demande a entrainé des évolutions des méthodes d'enquêtes (BONNEL, 2004). Tout d'abord, afin de capturer le jeu de contraintes et d'opportunités qui structurent la mobilité quotidienne, il a fallu prendre en compte l'environnement social et spatial des individus. Alors, les méthodes de recueil des activités ont été développées afin d'alimenter des approches centrées sur les activités (AXHAUSEN, 1995). Ensuite, est apparue la méthode de préférences révélées afin d'estimer l'impact de facteurs qui influencent la manière de se déplacer et qui s'avéraient très difficiles à mesurer (STOPHER, 1998). Elle permet de quantifier de manière subjective des facteurs tels que le confort, la propreté, le design ainsi que la perception de la valeur du temps pour un usager grâce à des scenarii hypothétiques (ORTUZAR, et al., 1994). Or, un phénomène similaire à la sélectivité de la mémoire humaine face à des événements vécus ne peut-il pas se produire sur une projection erronée de réaction dans une situation hypothétique ? Enfin, dans le but d'évaluer finement l'incidence de la modification de l'offre de transport sur les choix des caractéristiques du déplacement, ces dernières doivent être observées finement, spatialement et temporellement. L'apport d'un repérage spatial fin des données est illustré par le modèle MADITUC construit à partir des données des enquêtes régionales origines-destinations de Montréal et de Toronto (CHAPLEAU, et al., 1997).

Les évolutions des modèles à 4 étapes sont de plus en plus sensibles au manque de précision, particulièrement quant à la localisation des activités. De même, la privatisation croissante des infrastructures (péages) entraine une exigence croissante par rapport à la précision et à la qualité des informations sur la mobilité des personnes. Alors, au milieu des années 1990, une nouvelle forme de questionnaires est proposée pour lutter contre la mémoire « sélective » des enquêtés qui oublient un certain pourcentage des déplacements effectués et sont moins enclins à répondre à de telles enquêtes. Ainsi, l'apparition de nouvelles technologies telles que le GPS (Géolocalisation Par Satellite) ont permis de se poser la question suivant : pourrait-on remplacer les « enquêtes ménages déplacements » par d'autre méthodes de recueil pour pallier aux inconvénients présentés jusqu'alors? (KONSTANTINOS, Décembre 2013).

1.2 Les capteurs numériques de déplacements

1.2.1 Vers des méthodes de recueil passives ?

Certains concepteurs d'enquêtes de mobilité ont fait le choix d'enquêtes assistées par la technologie GPS pour assurer la continuité des enquêtes classiques en place depuis plus d'un demi-siècle. En effet, les systèmes GPS engagent de réduire les coûts d'enquête tout en permettant un accès automatique à l'origine et la destination d'un déplacement, aux horaires précis de départ et d'arrivée, à la localisation des activités et à la longueur des trajets (WOLF, juillet 2000). En 1996 a lieu l'étude-pilote de Lexington, Kentucky, commanditée par l'« US Department of Transportation ». L'objectif poursuivi était de mesurer l'écart entre les pratiques de déplacement réelles et celles reportées dans les EMD. Des ménages ont été

équipés de GPS couplés de PDA installés en voiture pour enregistrer les déplacements sur une période de 6 jours et ont parallèlement participé à une enquête classique. Les résultats montrent qu'un nombre supérieur de déplacements ont été enregistrés via la solution GPS. De plus, les déplacements courts ont été mieux détectés. (WAGNER, 1997). Ainsi, dans la continuité des enquêtes actives, les premières études pilotes ont nécessité l'accord des ménages d'être équipés de GPS et de dispositifs techniques. La rupture avec les méthodes traditionnelles passe par la pacification des enquêtes, c'est-à-dire en s'affranchissant de toutes interactions entre un enquêteur et un enquêté. Alors plusieurs questions se posent. Par exemple, comment identifier le motif de déplacement ? Les SIG semblent apporter des éléments de réponses (WOLF, et al., 2008). Une enquête à Cincinnati en 2009 sur environ 5000 ménages équipés de GPS portables a montré qu'il est possible d'identifier avec un degré de précision de 96% le mode utilisé et une similarité des résultats de 90% a été obtenue en comparant ces résultats avec ceux obtenus par les questionnaires on-line remplis par les mêmes enquêtés (STOPHER, et al., février 2012).

Dans la suite de ce paragraphe, nous présenterons quelques méthodes de recueil de données dites passives décrites dans la littérature. En effet, la métrologie des déplacements peut se faire via diverses technologies de captures que nous diviserons en deux groupes : les systèmes « fixes » et les systèmes « mobiles ». Nous faisons le choix de faire porter l'adjectif « fixe » à un système de capture si le déclenchement de capture se produit en un lieu fixe (péage, tronçon de routes, intersection). La détection qui produit la collecte d'information peut se faire via un matériel embarqué (carte à puce) ou non (boucles électromagnétiques). Selon les dispositifs de détection de présence en un point fixe, il est possible d'associer un ensemble de points mesurés à un individu et donc de produire des trajectoires individuelles. A contrario, un système de capture est considéré « mobile », si le déclenchement de la mesure ne dépend pas d'un lieu particulier. Ces systèmes permettent de générer des successions de mesures dont le nombre et les intervalles de temps inter- mesure varient selon les mécanismes déployés. Un système de capture « mobile » peut être utilisé comme un système de capture « fixe » si l'on décide de déclencher toutes les mesures en des points fixés par avance. Dans tous ces mécanismes de collecte, les informations d'instant de capture et de localisation sont disponibles à minima.

1.2.2 **Les systèmes de capture « fixes »**

On peut classer la famille des systèmes de capture « fixes» en deux sous-familles. Par analogie avec l'approche Eulérienne en mécanique des fluides, une première sous-famille de capteurs fixes permet de mesure le flux (de déplacements) en un point. La deuxième sous-famille est naturellement basée sur une approche Lagrangienne qui permet l'observation d'un écoulement entre deux points fixes.

1.2.2.1 Approche « Eulérienne »

Nous débuterons la présentation des systèmes de capture fixes par les réseaux de capteurs qui sont insérés dans l'infrastructure de transport et ne nécessitent pas d'équipements particuliers pour la détection des usagers. On peut assimiler cette première méthode de capture à une approche « Eulérienne », dans le sens où l'on observe un flux en un point de l'espace. La nature même de ces technologies de capteurs confère le caractère passif à la méthode de recueil. L'application largement majoritaire de ces systèmes de capture est la mesure de flux de trafic en un point du réseau de transport (ROSE, May 2006). Ils sont largement répandus sur les autoroutes ou les routes à forte densité de voyageurs afin d'observer le trafic en temps réel et sont, dans la grande majorité des cas, propriétés des entités opérant les portions de voies surveillées. Il s'agit de technologies intrusives car les capteurs sont placés sur ou sous les portions des voies. On peut citer comme technologies de capteurs les tubes pneumatiques, les capteurs piézoélectriques ou encore les boucles électromagnétiques. Cette dernière est la technologie la plus déployée. Selon les portions considérées, l'espacement entre deux boucles successives varie. Elles sont principalement utilisées pour remonter des informations d'occupation de la route et de flux, mais aussi pour produire des vitesses moyennes sur des segments. Des études se sont concentrées sur l'identification des véhicules à partir des boucles pour produire des temps de parcours point-à-point (ABDULHAI, et al., 2003). Cependant, cette identification est très délicate. De plus, bien qu'étant une technologie mature et approuvée, les boucles électromagnétiques demandent un coût de maintenance et de génie civil lourd qui ne permet pas un déploiement à large échelle sur le réseau de transport routier. Intéressons-nous alors aux méthodes non-intrusives basées sur des observations à distance. On peut citer le comptage manuel qui permet d'obtenir des informations complémentaires concernant le nombre de passagers dans les véhicules, de piétons ou de cyclistes, les capteurs infrarouges (actifs et passifs), les radars micro-ondes, les systèmes acoustiques ou encore les caméras vidéo. Ce dernier système permet également d'identifier le véhicule grâce à la reconnaissance des plaques d'immatriculation (LAPI : Lecture Automatique de Plaques d'Immatriculation). Il est donc possible de calculer les temps de parcours entre deux lieux équipés du système. Ces équipements électroniques disposent d'un algorithme de reconnaissance automatique de plaques (WASSON, et al., June 2008).

Ainsi, ces technologies de capteurs fixes sont matures et ont prouvé leur performance. Néanmoins, elles ont un inconvénient principal : leurs coûts d'installation et de maintenance. De plus, la défaillance des équipements et la sensibilité de certains systèmes aux mauvaises conditions météorologiques diminuent la fiabilité des mesures réalisées. Qui plus est, elles permettent la mesure des déplacements routiers exclusivement, et sur une partie seulement du réseau de transport (certaines portions des réseaux autoroutiers). En zone urbaine, certaines intersections munies de stops ou de feux en sont équipées, mais la différentiation entre les types de véhicules reste à faire pour isoler les transports en commun des flux de voitures individuelles. Enfin, le principe de fonctionnement des technologies de capteurs fixes produit majoritairement des données agrégées. Ainsi, elles ne permettent pas

l'accès à des trajectoires individuelles ni à aucune caractéristique des individus en déplacement.

On notera qu'une approche « Eulérienne » est très adaptée au comptage en un point mais nécessite des traitements supplémentaires pour produire des informations critiques pour les exploitants telles que la vitesse moyenne ou le temps de parcours d'un tronçon. En effet, la nature intrinsèque des technologies de capteurs présentées jusque-là ne permet pas d'identification immédiate des usagers/véhicules en écoulement sur un axe de transport. Une approche « Lagrangienne » est à favoriser pour produire ces informations car par nature elle permet de construire des ensembles de trajectoires. Le paragraphe suivant présente les systèmes de captures « fixes » dont le déclenchement de la mesure se produit grâce à un équipement embarqué qui peut contenir un identifiant unique de l'usager et/ou du véhicule.

1.2.2.2 Approche « Lagrangienne »

Les systèmes de capture « fixes » qui permettent une approche « Lagrangienne » requièrent une paire constituée d'un réseau de capteurs de localisation fixes et d'un équipement embarqué contenant un système d'identification par usager/véhicule. Le déclenchement de la mesure se fait lorsque l'équipement embarqué se trouve au niveau d'un capteur fixe et permet l'identification du détenteur de l'équipement. Parmi ces équipements, on peut citer les cartes à puce d'abonnement à un réseau de transport. Par exemple, en Ile-de-France, les abonnés du réseau de transport en commun ferré valident leur admission dans le réseau en portant leur carte à puce (Pass Navigo) au niveau des barrières de péages des stations. Ainsi, chaque validation est horodatée et localisée à la station pour un identifiant d'abonné. Il est possible alors de reconstruire des volumes par paire de stations ainsi que des temps de parcours (BERTINI, et al., 2003). Un procédé équivalent est envisageable pour les barrières de péages routiers via le télépéage. Or, ces abonnés sont des usagers réguliers, ce qui peut entrainer un biais de représentativité. Il est faible dans le cas des transports en commun francilien mais ce n'est pas le cas pour les réseaux autoroutiers. En effet, la majorité des abonnés des télépéages sont des professionnels à forte mobilité et une partie des résidents à proximité d'une section payante d'autoroute sans itinéraire alternatif. D'autres technologies d'identification peuvent être envisagées au niveau des barrières de péages comme la reconnaissance de plaque ou encore un suivi d'une carte à puce fréquemment utilisée par son détenteur : sa carte de crédit. En effet, une étude sur la mobilité a été réalisée en suivant l'activité de retraits bancaires par carte de crédit aux Etats-Unis (BROCKMANN, et al., 2006). Néanmoins, un tel système de capture ne peut être envisagé en France sans l'accord de toutes les personnes enquêtées car l'exploitation de données à caractère personnelle n'est pas légale en France sans l'accord signé des individus ayant pris connaissance du cadre d'utilisation de ces informations dont ils sont les propriétaires, comme nous le verrons par la suite (paragraphe 2.2) Or dans ce cas l'adjectif "passif" n'aurait plus lieu d'être.

1.2.3 **Les systèmes de capture « mobiles »**

Le déclenchement d'une mesure par des systèmes de capture "mobiles" peut se produire en tous les points du territoire. En pratique, ces points ne peuvent donner lieu à une mesure car les technologies de capteurs « mobiles » sont soumises aux conditions de transmission du signal requise pour le fonctionnement du système de mesure. Il existe deux systèmes principaux pour la production de mesure de déplacements via un système de capture mobile : le système basé sur la technologie GPS (Global Positioning System) et le système basé sur les réseaux de téléphonie mobile. Dans les deux cas, le principe est basé sur la communication radio entre un réseau fixe (antenne) et un équipement terminal mobile qui se déplace avec l'unité à observer (véhicule, individu). Des mesures horodatées et géo-localisées sont remontées avec un pas de temps fonction de la technologie et pas nécessairement constant.

Les systèmes de capture basés sur la technologie GPS (Global Positionning System) permettent une localisation « outdoor » avec une précision à la dizaine de mètres. Le terminal portatif peut être embarqué dans un véhicule ou directement sur l'usager. Le premier cas se matérialise par des flottes de véhicules équipés (taxi, véhicules de location, véhicules produits pour le système Vehicle Infrastructure Integration (VII) …). On citera comme cas d'application la mesure de vitesse moyenne sur des portions de route pour la détection d'incident ou de congestion. Le deuxième cas est l'utilisation de téléphones mobiles équipés d'A-GPS (Assisted-GPS) comme dans l'étude menée par le Transportation Development Center du Canada en 2005 (KIRK, et al., 2005). Dans les deux cas, la taille de l'échantillon est limitée soit par le nombre de véhicules de la flotte, soit par le nombre de téléphones équipés et dont les utilisateurs ont accepté de partager les informations relatives à leur localisation. Le déterminisme de l'échantillon créé par cette méthode introduit un biais. Ces méthodes posent les mêmes questions sur la taille de l'échantillon et la minimisation du biais que les enquêtes actives. De plus, par le fait du fonctionnement de la technologie GPS, au moins trois satellites, voire quatre dans le cas du A-GPS, sont nécessaires et les consommations de batterie réduisent considérablement les périodes d'étude. Les remontées de traces GPS et leur exploitation pour produire de l'information sur le trafic routier est une technologie mature sous réserve des limites précédemment mentionnées. Néanmoins, il s'agit également d'une technologie qui ne s'applique pas à tous les modes, notamment pour les transports en communs ferrés avec des sections souterraines. En effet, la couverture GPS des infrastructures souterraines, des tunnels, voire même de certains bâtiments n'est pas technologiquement fonctionnelle.

Les technologies des capteurs embarqués sur la personne ne cessent de se répandre. Accéléromètres, gyroscopes, capteurs « d'ambiance », etc. sont autant d'outils de mesure disponibles sur des téléphones mobiles qui ne quittent presque jamais leur propriétaire. Cela constitue une source de données exploitables pour mesurer l'activité humaine, de la marche à l'immobilité, du déplacement à bord d'une voiture au déplacement à bord d'un train de banlieue (BAO, et al., 2004). Cependant, le taux d'équipement de la population en « capteurs portables » sophistiqués et la segmentation des personnes en possédant introduisent un biais.

Existe-t-il des technologies de capteurs plus largement répandu dans la population ? On peut tout simplement citer les téléphones portables dont les Smartphones sont la dernière évolution. En effet, même si les mobiles de dernière génération hébergent GPS, accéléromètres, etc. ; ils ont été développés à l'origine pour communiquer en tout point d'un réseau de télécommunication, comme les mobiles des anciennes générations. Ce sont des objets de la vie courante qui nous suivent dans tous nos déplacements. Ainsi, avec des méthodes adéquates de recueil de données et de traitement, connectés à un réseau cellulaire, les téléphones portables forment un système de capture des déplacements. Ce constat constitue l'essence du travail de thèse présenté. Dans la suite, nous présenterons les différents types de mesures réalisables à partir du réseau de téléphonie mobile selon la localisation du point de collecte dans l'architecture du réseau de télécommunications.

1.2.3.1 Les points de collecte d'un réseau de téléphonie mobile

Par construction des réseaux de télécommunication sans fil, la connaissance de la position approximative des téléphones mobiles est imposée. Cette connaissance permet d'une part de respecter des standards de sécurité (appels d'urgence) et d'autre part d'assurer l'acheminement des communications en tout point d'un territoire couvert. Pour assurer la fonctionnalité de communication, l'architecture du réseau est composée de plusieurs éléments entre lesquelles des informations transitent. Ainsi, il existe plusieurs points de collecte de données radio-mobiles. Selon les points de collecte, les données sont de nature différente. Dans cette section, nous présenterons une version simplifiée de l'architecture réseau afin de décrire les parties du réseau de télécommunication dont sont communément extraites « des données brutes » nécessaires au bon fonctionnement du réseau mobile. Puis, nous ferons un état de l'art des méthodes qui permettent de déterminer une mesure de déplacement à partir de ces informations « brutes ».

Tout d'abord, présentons un schéma très simplifié d'un réseau de télécommunication dont la vocation première est d'illustrer la nature des informations disponibles au niveau des points de collecte. Une description détaillée de l'architecture du réseau de téléphonie et son fonctionnement est l'objet principal du paragraphe 2. Un réseau de télécommunication est composé d'une partie mobile, un ensemble de téléphones cellulaires, et d'une partie fixe (voir Figure 27). Pour faciliter la compréhension, nous avons divisé cette partie fixe en deux entités. Chacune de ces entités correspond à une fonctionnalité et peut contenir un ou plusieurs éléments physiques du réseau. La première entité fonctionnelle est en charge de la qualité du canal de propagation ouvert entre un mobile et le réseau. Pour assurer sa fonction, les informations qui circulent entre elle et le mobile sont des mesures physiques de puissance de signal reçu/émis, des mesures de rapport signal sur bruit, de temps de propagation, d'orientation du signal reçu ou encore de charge au niveau de l'antenne. La deuxième entité a trois missions principales. Premièrement, elle a en charge la gestion de la mobilité, pour assurer que tout mobile en tout point du réseau peut recevoir ou émettre une communication. Ensuite, elle s'occupe du routage vers les différents réseaux mobiles et fixes. Enfin, elle gère les autorisations de connexion au réseau ou aux services demandés. Ces autorisations

dépendent de l'abonnement souscrit par l'usager. Les informations concernant les abonnés (type d'abonnement, nom, adresse de facturation, etc.) se trouvent dans une troisième entité fonctionnelle non représentée. De plus, pour effectuer la facturation à l'abonné, les volumes (en minutes, en nombre de SMS ou en octets) consommés par les abonnés pendant la période de facturation sont stockés dans cette entité non représentée. Ces informations sont protégées par la CNIL (Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés). A ce titre, elles sont propriété uniquement de l'abonné et ne sont pas légalement exploitables sans l'accord de l'abonné (hors facturation). Néanmoins, comme aucune information de localisation n'y est enregistrée, elles ne présentent aucun intérêt pour la mesure de déplacements.

Il y a deux points de collectes distincts, que nous noterons P et S (Figure 25). Le point P permet de recueillir des mesures physiques à propos de la qualité du canal de propagation aérien établie entre le mobile et le premier élément fixe du réseau. Le point de collecte S situé entre les entités fonctionnelles 1 et 2 de la partie fixe du réseau cellulaire permet d'accéder à des informations sur la nature de l'opération à réaliser pour permettre de satisfaire une demande du mobile. Il s'agit soit d'une demande d'établissement de communication (appel entrant ou sortant), d'une mobilité dans le réseau de télécommunication ou d'une connexion/déconnexion du réseau. Ces messages sont appelés évènements de signalisation. De manière simplifiée, ils contiennent l'information de l'opération à réaliser. Les mécanismes de signalisation seront détaillés dans le paragraphe 2.

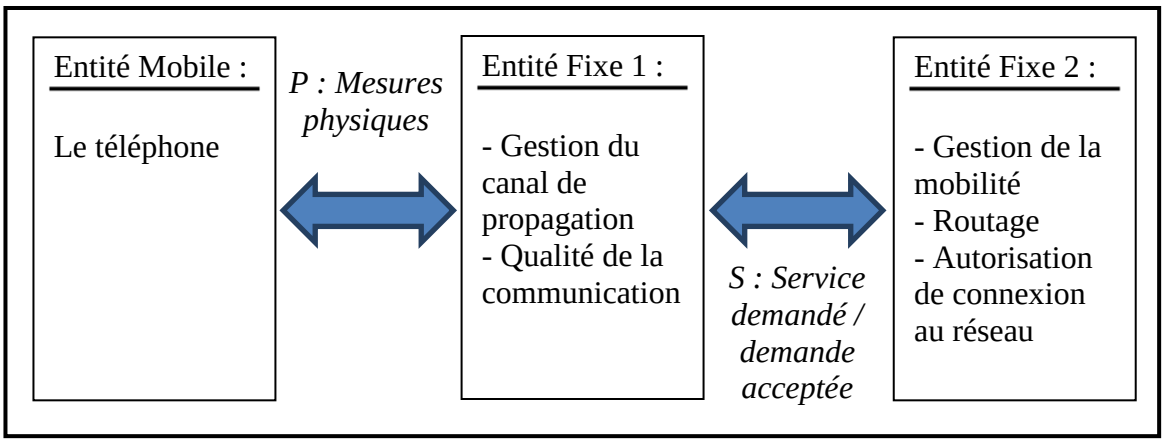


Figure 25 : points de collecte de données disponibles dans un réseau de télécommunications mobiles au travers d'une représentation fonctionnelle simplifiée

1.2.3.2 Traitement des données collectées en P

Les méthodes d'exploitation des données collectées en P sont nombreuses. Nous proposons de classer ces données en deux familles, les mesures de propagation radio et les mesures de charge. Dans les deux cas, ces mesures permettent soit une analyse en différé pour comprendre un dysfonctionnement, pour observer les variations de la demande ou encore pour prédire les évolutions à apporter pour améliorer la qualité de service, soit en temps réel pour le routage d'un mobile vers une antenne voisine moins chargée ou pour offrir un canal de propagation de meilleure qualité. Ces données de nature différente sont générées dans un but commun : garantir une qualité de communication optimale. Pourtant, dans le domaine de la mesure des déplacements, leur traitement mène vers deux applications clairement séparées. D'une part, la localisation précise spatialement et temporellement d'un terminal mobile s'obtient en traitant les mesures de propagations et d'autre part, les mesures de charge permettent l'observation de dynamiques de population à des échelles spatiales et temporelles plus étendues.

Chronologiquement, les mesures de propagation ont été les premières à être exploitées pour déterminer des positions de mobiles avec une précision spatiale fine en deçà de la cellule (périmètre couvert par une antenne). En effet, dès 1998, des techniques de localisation voient le jour (DRANE, et al., April 1998). Elles exploitent soit le temps de propagation, soit l'écart de temps à l'arrivée (TDOA Time Difference of Arrival), soit l'angle d'arrivé, soit la phase de porteuse ou encore le Timing Advance (TA). Ces mesures sont communiquées entre le mobile et le premier élément du réseau fixe. Une autre méthode très répandue pour extraire des informations de localisation à partir d'un réseau cellulaire est le « GSM fingerprinting ». De manière générale, le « fingerprinting » est une méthode basée sur l'exploitation des mesures de puissance de signal radio reçu, en un point donné, par un émetteur dont l'emplacement est connu (OTSASON, et al.). Selon les systèmes et l'environnement de propagation (indoor ou outdoor), ces méthodes permettent une précision de localisation de l'ordre de la dizaine de mètres. Ainsi, il est possible de mesurer avec précision le déplacement d'un mobile entre deux instants et obtenir alors des trajectoires individuelles. Cependant, les mesures de puissance de signal ou de temps de propagation ne sont disponibles qu'au niveau de la première interface aérienne entre un mobile et le premier élément du réseau cellulaire, la cellule. A titre d'illustration, en France, un réseau cellulaire compte des dizaines de milliers de cellules. Or, la collecte d'informations au niveau de cette interface nécessite un déploiement de sonde de collecte au niveau de chaque antenne. Ainsi, la méthode d'estimation de la position requiert le traitement d'un volume de données extrêmement conséquent, voire limitant, pour une exploitation au-delà de la dizaine de cellules.

Pour la deuxième famille de données, les méthodes de mesure de charge reposent sur le fait que le « trafic télécom » varie selon le lieu et l'instant de la journée. L'unité traditionnelle de mesure de trafic est l'Erlang qui représente le volume de trafic voix ou data transitant sur un canal de transmission. L'Erlang (symbole E) est une unité sans dimension à considérer comme une mesure statistique de la charge d'un élément. Il s'agit d'une

représentation de l'usage de la ressource et dépend donc du nombre de communications ainsi que de leurs durées. La mesure d'un Erlang au niveau d'une antenne est l'équivalent d'un usager en communication pendant une heure dont le mobile est resté connecté à cette antenne. Par exemple, si pendant une heure, 100 appels de 5 minutes chacun ont transités par l'antenne *a*, alors il sera mesuré (100*5) /60 = 8.33E au niveau de *a*. En exploitant la distribution d'une mesure de charge normalisée d'un ensemble de cellules couvrant une zone d'intérêt, il est possible de faire ressortir les dynamiques de ce lieu. En effet, en 2005, Ratti introduit le concept de « Mobiles Landscapes » permettant la visualisation des dynamiques urbaines à partir de mesure de charge (RATTI, et al., 2006). Il montre alors l'intérêt d'utiliser les mesures de charge des cellules, déjà exploitées et donc accessibles, par les opérateurs de téléphonie, pour l'observation des déplacements dans la ville de Milan. Des applications possibles de ces traitements sont l'estimation des flux entrants et sortants d'une agglomération, l'observation des migrations pendulaires et des schémas de mobilité en fonction du moment de la semaine (jours travaillés et week-ends), et l'analyse des points critiques de l'utilisation d'une aire urbaine ainsi que des comportements de mobilité et la diffusion de la population lors d'évènements particuliers. La technologie de collecte est telle qu'une exploitation en temps réel est permise. Cependant, l'hypothèse sous-jacente à cette étude est que l'activité au niveau de chaque antenne est proportionnelle au nombre de personnes présentes dans la zone couverte. Ceci n'est vérifié que lorsque tous les abonnés de la zone communiquent à intervalles réguliers et de manière uniforme. Or, les schémas de communication dépendent des caractéristiques individuelles (âge, catégorie socio-professionnel, etc.) et de l'activité pratiquée (travail, récréation, etc.) (YUAN, et al., 2012). Bien que la capacité d'une antenne soit connue par dimensionnement, l'hétérogénéité des pratiques de téléphonie sur une zone ainsi que l'évolution de ces dernières font perdre toute signification à l'utilisation moyenne de la ressource radio pour une zone donnée. Ainsi, pour donner plus de signification aux mesures de charge, des historiques individuels d'évènements de communication (appels, SMS) sont nécessaires vers une mesure plus précise des déplacements (RATTI, et al., 2006).

1.2.3.3 Traitement des données collectées en S

Les données collectées en S (voir Figure 25) contiennent principalement des informations relatives à l'action à réaliser par le réseau pour assurer son fonctionnement. Il existe deux familles de données collectées en S traitées dans la littérature : les actions demandées par l'abonné, à savoir les communications, et les actions nécessaires au réseau pour assurer l'itinérance.

Dans la littérature les communications sont majoritairement exploitées au travers de bases de données appelées CDR pour Calling Detail Record. Ces CDR contiennent en général et à minima les champs suivants : un identifiant de l'abonné, le moment de début de communication, la durée, le type (voix, SMS/MMS, data) et un identifiant de l'antenne à laquelle est connecté le terminal mobile au moment de la communication. Cette source peut être fournie par des opérateurs de télécommunication. Depuis plus de 10 ans, des chercheurs

de domaines variés démontrent l'envergure des champs d'applications d'une telle source. En effet, en agrégeant dans l'espace l'ensemble des traces individuelles, horodatées et localisées au niveau de la zone de couverture d'une antenne, il est possible de visualiser les rythmes d'une ville ou d'un territoire (RATTI, et al., 2006). Ainsi, les CDRs sont adaptés pour des applications d'aide à l'aménagement urbain car ils permettent notamment la détection de zone denses (RUBIO, et al., 2013). De plus, à partir de cet ensemble de trajectoires individuelles partielles, il est possible de mesurer d'une part des déplacements individuels, mais surtout des flux de déplacements représentés dans des matrices Origine-Destination (WHITE, et al., 2002). L'étude des flux peut être approfondie jusqu'à l'inférence des modes de transport (WANG, et al., September 2010) ou la segmentation pour des types de voyageurs particuliers tels que les touristes (AHAS, et al., 2008). Les études sur le tourisme à partir d'un tel jeu de donnée sont un complément extrêmement intéressant aux enquêtes actives sur le tourisme car ces dernières sont difficiles à mettre en place étant donné la non-permanence des enquêtés sur une zone et le biais induit par les personnes acceptant de répondre à une enquête en vacances. De plus, pour des enquêtes sur le tourisme international, des coûts additionnels sont générés par la nécessité d'enquêteurs multilingues. A cheval sur l'urbanisme et l'étude des mobilités, ces données permettent de mesurer l'impact de la morphologie urbaine sur la mobilité (KANG, et al., 2012). Ainsi, elles ont permis de construire différents modèles de mobilité (GONZALEZ, et al.), (BAGROW, et al., 2009). Enfin, l'usage du réseau de téléphonie et l'activité pratiquée étant corrélés, et chaque élément des trajectoires individuelles localisées, le traitement des CDRs s'applique également pour faire ressortir des schémas d'activités quotidiens (CALABRESE, et al., 2013). Ratti et son équipe font évoluer les « mobiles landscapes » vers des « Activity-aware map » démontrant ainsi l'étendue des champs d'applications accessibles par l'exploitation des CDRs. Néanmoins, une telle source de données n'est pas sans désavantage. Premièrement, par construction, les données d'un CDR ne contiennent aucune information sur l'individu excepté un identifiant anonymisé. En comparaison aux données disponibles via des enquêtes actives, les CDRs manquent de caractéristiques sociodémographiques permettant notamment de comprendre les comportements de mobilités et les schémas d'activités en fonction de caractéristiques individuelles. Cette source est ainsi qualifiée d'incomplète au sens des informations contenues (FARRAHI, et al., 2010). Deuxièmement, une trace n'est déclenchée que lors d'un événement de communication. Pour la majorité de la littérature décrite dans ce paragraphe, les communications sont de nature vocale et proviennent de réseaux de télécommunications de technologie 2G. Ces évènements peuvent être qualifiés de rares par comparaison avec des traces GPS par exemple (FARRAHI, et al., 2010). Ainsi, cette source est incomplète dans le sens où les trajectoires présentent un fort degré d'incertitude quant à la détection complète des tous les événements de mobilité. En effet, la connaissance du comportement du téléphone (mobile/immobile) en dehors des événements de communication n'est accessible qu'au travers d'hypothèses. Troisièmement, ajoutée à l'incertitude en dehors des points constituant l'ensemble des trajectoires discrètes des individus, il existe une imprécision non négligeable sur la localisation. En effet, un événement d'un CDR est horodaté et localisé à l'échelle d'une cellule du réseau de télécommunication. La dimension

d'une cellule varie d'une centaine de mètres de rayon à une dizaine de kilomètres selon la densité de population du territoire qu'elle couvre. De plus, en fonction de la charge du réseau et des conditions locales de propagation, le réseau de télécommunication peut faire le choix de router un mobile situé dans une cellule vers une cellule voisine. Dans la littérature, des exemples de « CDRs améliorés » sont proposés afin de remédier à certaines lacunes précédemment énoncées. Des entreprises comme AirSage ont développé un algorithme déposé WiSE (Wireless Signal Extraction) qui traite les remontées du réseau cellulaire Verizon et estime la position des mobiles (latitude, longitude) avec une précision de 300 mètres. Ils proposent alors des CDRs avec une précision spatiale améliorée (WANG, et al., September 2010). Cependant, le problème de la détection erronée des déplacements courts (entre deux cellules voisines) demeure car elle est la conséquence des fluctuations de la couverture radio (CALABRESE, et al., 2013). De la même manière, afin de quantifier, voire de corriger les carences des trajectoires en données sociodémographiques, des études avec des CDRs enrichis de l'âge et du genre du propriétaire du mobile ont été mises en place en Chine sur un large échantillon de la population (YUAN, et al., 2012). De telles études ont permis de montrer les corrélations entre mobilité et usage de la téléphonie selon des critères individuels. Cependant, la législation quant à la protection des données individuelles diffère selon les pays et une telle étude n'aurait pu être menée en Europe, et particulièrement en France, sans l'accord de tous les abonnés inclus dans l'étude. Parallèlement, des modèles de la distribution de temps entre deux appels pour un abonné ont été proposés afin de prédire les schémas de communication des usagers. A ce titre, sont proposés dans la littérature des lois exponentielles (YANG, et al., 2009), mais aussi des lois de puissance (GONZALEZ, et al.). Cette inimité vient du nombre important de paramètres qui influencent les schémas de communication. En effet, les caractéristiques individuelles telles que l'âge, le genre, etc., mais aussi l'activité pratiquée, déterminent la fréquence, la durée, le moment des communications tout autant que des composantes extérieures telles que le moment de la journée, le jour de la semaine, etc. Ainsi, pour plus de précision, les modèles de distribution de l'instant entre deux appels d'un usager devraient considérer chacun de ces facteurs. Cependant, en essence, les CDRs ne contiennent aucune information personnelle sur l'abonné. Il apparait alors difficile de corriger les imperfections des trajectoires individuelles, même en exploitant les modèles du temps entre deux communications selon des critères affinés, car il n'est pas possible d'accéder à des critères sur l'individu dont la trajectoire est incomplète. Afin de constituer une base contenant des informations sur les individus, le MIT a mis en place une enquête mixte active et passive (EAGLE, et al., march 2006). L'idée sous-jacente à cette enquête mixte était de construire une base de données en collectant diverses informations depuis des téléphones mobiles habituellement transportés par leur propriétaire mais également depuis une enquête en ligne afin de valider les informations remontées via les réseaux de communication. L'étude se veut complète, car elle contient à la fois des informations quasi-continues sur la localisation des individus enquêtés et l'usage du terminal mobile en terme d'applications et de communication. Un tel jeu de données est approprié pour la mesure de systèmes sociaux complexes, à travers la reconnaissance de schémas d'interactions sociales dans les activités quotidiennes, dans l'inférence des relations sociales,

dans l'identification de lieux ayant une forte importance sociale et pour les modèles des rythmes d'organisation sociale. Un échantillon fût composé de 100 personnes du MIT Media Laboratory et du MIT Sloan Business School ayant accepté de participer à cette enquête sur 9 mois. Ils se sont vu remettre un téléphone Nokia 6600 équipé du logiciel Context. Ce logiciel permet la collecte des logs de communication, des appareils Bluetooth à proximité, des identifiants des antennes cellulaires et du statut du téléphone (RAENTO, et al., 2005). Le jeu de données passives a été constitué à partir de remontées depuis le réseau de téléphonie et du réseau Bluetooth pour permettre une localisation plus précise à proximité d'un environnement contenant des appareils Bluetooth, notamment dans les bâtiments. Lorsque le mobile ne se trouve pas dans un périmètre couvert par un réseau Bluetooth, la précision spatiale est alors à l'échelle d'une cellule. De plus, le fonctionnement classique d'un réseau cellulaire ne permet d'avoir un identifiant de cellule généré que lors d'une communication. Pour assurer la continuité des données, le logiciel embarqué sur les 100 mobiles enquêtés contient un protocole spécifique qui déclenche l'enregistrement de l'identifiant de cellule à laquelle il est connecté dès que cet identifiant est rencontré pour la première fois. Dès lors, le MIT dataset contient les trajectoires quasi-continues de chaque individu enquêté. Le jeu de données anonymisé correspond à environ 450 000 heures d'informations sur les positions des 100 individus et sur la manière dont ils utilisent leur téléphone pour communiquer mais aussi pour les applications disponibles sur le terminal. Ainsi, ce jeu permet de s'affranchir des biais relatifs au caractère épars et discret des CDRs et d'accéder à la compréhension des usages individuels en fonction des schémas de déplacement. De plus, de nombreux travaux se sont basés sur ces données disponibles en ligne. Notamment, il a été montré la faisabilité de réduire des bruits liés aux oscillations entre cellules et aux délais temporels de transfert intercellulaire (BAYIR, et al., 2009). Des méthodes de clustering de cellules permettent d'augmenter la robustesse du jeu de données. Cependant, les biais de représentativité et de taille de l'échantillon dû au caractère actif de l'étude réapparaissent. Cet exemple illustre bien le compromis entre taille de l'échantillon et données accessibles. Nous avons cité des exemples de travaux réalisés à partir de CDR pour illustrer l'étendue des mesures réalisables à partir de ces comptes rendus de communications. Néanmoins, le paragraphe 2.2 décrivant le cadre légal précise que l'exploitation de telles bases n'est pas autorisée en France sans l'accord des abonnées ayant laissé une trace de communications dans le CDR. Ainsi, dans cette thèse nous exploiterons les communications depuis une source temps réel qui permet de supprimer la phase de stockage et de respecter le cadre légal (paragraphe 2.2).

Cependant, les actions permettant d'assurer la fonction d'itinérance des réseaux de télécommunications sont également assimilables à des capteurs de déplacements. Il s'agit de messages de mobilité entre les unités spatiales du réseau cellulaire, à savoir les cellules, ou un regroupement de ces dernières. Les applications pour la mesure des déplacements sont différentes de celles mentionnées précédemment. En effet, dès 1994, les informations de changement de cellules en communication, appelées handover, et les changements de zones de localisation (regroupement logique de cellules) sont exploitées pour la mesure de flux de trafic routier (LINAARTZ, October 1994). En France, une application de mesures de trafic a

été opérée dans le corridor du Rhône (YGNACE, et al., 2000) (YGNACE, 2001). Le sujet de la mesure du trafic à l'aide de messages de mobilité générés par le réseau de téléphonie est récurrent depuis cette première preuve de faisabilité (BAR-GERA, 2007), (CACERES, et al., 2010). Ces mesures de flux routier permettent l'estimation de vitesse grâce à des capteurs virtuels placés le long d'un axe de transport avec le même niveau de précision que des boucles électromagnétiques par exemple. Des offres basées sur ces technologies sont disponibles depuis 2012. En effet, l'opérateur de services d'information trafic routier Médiamobile, fût le premier à proposer un service qui intègre des données de téléphonie mobile fournies par l'opérateur Orange comme source d'information trafic. Depuis les années 2000, les exploitants routiers peuvent accéder à des sources d'informations trafic qui s'affranchissent de matériel supplémentaire à déployer sur les routes. Ainsi, par opposition aux boucles électromagnétiques, aux caméras de surveillance de trafic et aux systèmes de reconnaissance de plaques, on cherche à exploiter les « capteurs mobiles ». Ce terme désigne un système permettant de recueillir des informations directement issues des véhicules traceurs via la méthode dite « Floating Car Data » (FCD) ou à partir d'appareils nomades, comme des téléphones mobiles, présents à bord et circulant dans le flot de la circulation via la méthode « Floating Mobile Data » (FMD) (RECLUS, 6 décembre 2011). Les méthodes basées sur des capteurs mobiles présentent les avantages suivants. Les informations sur les conditions de circulation sont disponibles en temps réel, les données de vitesse recueillies permettent de produire des indicateurs de vitesse moyenne, de temps de parcours, d'état de trafic, etc. Ainsi, la détection et la connaissance des congestions sont plus précises (début, longueur et fin de bouchons). Il est d'ailleurs envisagé de construire de l'information dédiée à des catégories d'usagers du réseau routier (poids lourds bus, taxis, etc.) De plus, cette source d'informations permet de compléter des données recueillies sur le terrain. Ainsi, il est envisageable d'exploiter ces données en temps différé afin de produire par exemple des matrices Origine-Destination. Néanmoins, des informations sur les volumes et la concentration (débit, taux d'occupation) ne sont pas encore constructibles à partir de ces méthodes. En effet, la représentativité statistique varie au cours de la journée et de la semaine. Cette variation est bien plus significative avec la méthode FCD qu'avec la méthode FMD. De plus, la composition exacte de flot de véhicule n'est pas connue. Et surtout, il n'existe pas encore de normalisation des aspects liés à la qualité et à la fiabilité des informations produites. Comparons maintenant ces deux méthodes. Tout d'abord, malgré sa démocratisation et la précision spatiale qu'elle permet d'atteindre, la méthode FCD basée sur la technologie GPS présente des inconvénients. En effet, le nombre de véhicules équipés de GPS communiquant ses informations de position avec les fournisseurs de service d'information trafic est bien souvent réduit à des flottes de véhicules comme les véhicules de messagerie ou les taxis. De plus, le système radio permettant de transmettre ces informations est plus onéreux, car dédié à cette application, alors que le système basé sur le réseau de téléphonie est naturellement en fonctionnement. La méthode FMD exploite deux procédés existants pour estimer la localisation à partir du réseau cellulaire: la triangulation avec des données collectées en P (voir Figure 25) et la méthode dite « Floating Mobile Data » qui exploite des évènements de changement de cellules en communication (handover) que l'on

peut collecter en S. Ainsi, dans le cas de la deuxième approche, la taille de l'échantillon est réduite aux mobiles en communication suffisamment longtemps pour générer un minimum de 3 handovers. La Figure 26 illustre le procédé.

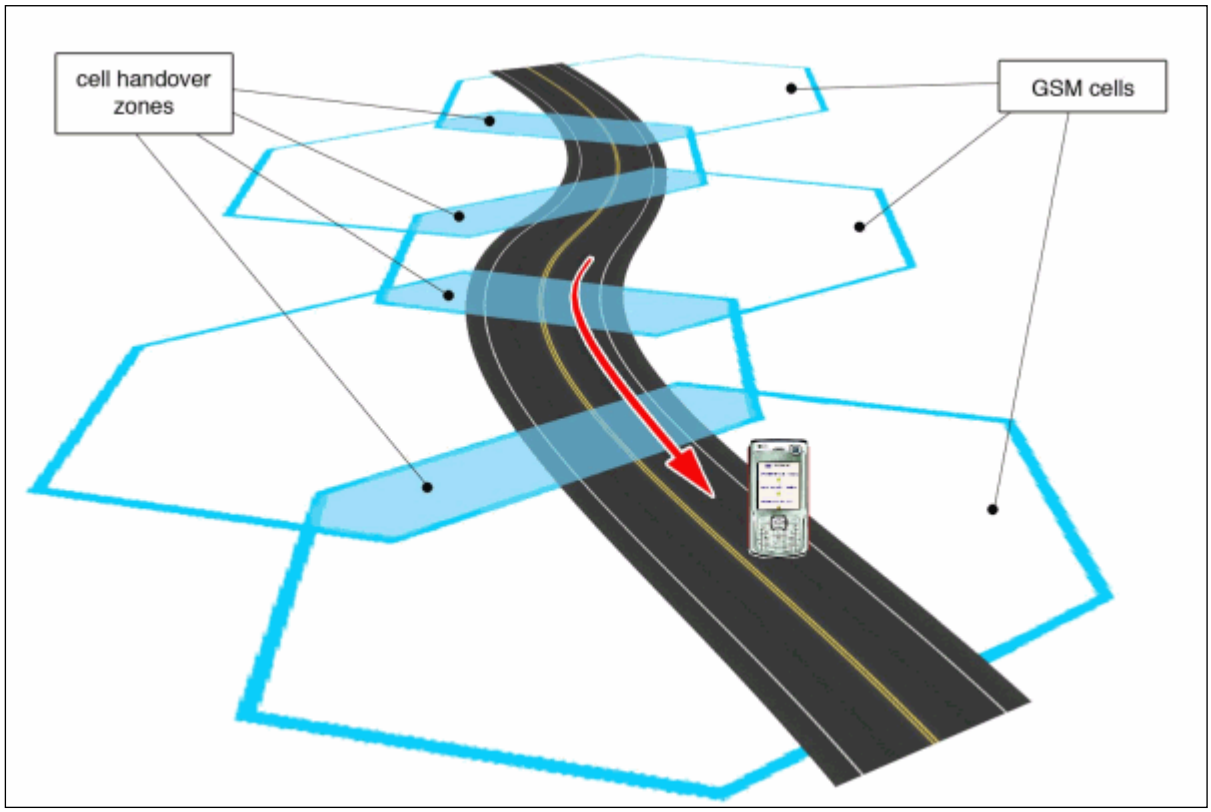


Figure 26 : principe du FMD[11]

1.3 **Conclusion**

Les enquêtes passives traditionnelles sont efficaces, standardisées et permettent d'observer les évolutions des mobilités en fonction des caractéristiques individuelles. Néanmoins, leur caractère statique est un frein pour l'observation fine dans le temps, ainsi elles présentent des limites pour la mesure de comportements localisés étroitement dans le temps et dans l'espace et/ou de comportements sporadiques. Les technologies numériques semblent prometteuses pour de telles mesures. Néanmoins, leur caractère passif et le cadre légal qui protège les données personnelles, empêchent l'accès à des informations sociodémographiques sur les individus. Une autre limitation des enquêtes traditionnelles est la précision spatiale. La portée des déplacements est souvent approchée à la distance à vol d'oiseau et l'accès à l'itinéraire exact n'est pas toujours évident. De plus, en raison des coûts

11 : http://www.transport-intelligent.net/technologies/localisation-78/article/les-donnees-des-telephones-mobiles

de mise en place de telles enquêtes, le périmètre d'étude doit être restreint, ce qui empêche à la fois l'étude de phénomènes à caractère occasionnel, mais aussi l'étude sur un vaste territoire. Les coûts réduits proposés par les enquêtes passives et le déploiement à l'échelle d'un grand territoire d'un réseau de capteurs déjà en place promettent de lever cette limitation. Cependant, il apparait que dans le cas d'un réseau de capteurs fixes, le périmètre d'étude est borné par l'emplacement des capteurs qui sont fixes. Cela n'est pas le cas pour les réseaux de capteurs mobiles qui assurent un périmètre d'étude à l'échelle d'un territoire. L'intérêt des concepteurs d'enquêtes de recourir à la technologie GPS depuis une dizaine d'année est-il annonceur de la disparition des enquêtes traditionnelles ou d'un enrichissement de ces dernières en couplant les deux méthodologies ?

Nous avons vu qu'à partir d'un objet de consommation du quotidien, le téléphone portable, des chercheurs sont parvenus à observer la mobilité sur des territoires, au travers de rythmes de présence ou même des déplacements sur un axe de transport. Il existe différentes méthodes basées sur la téléphonie mobile selon le point de collecte sur un réseau de télécommunication. Notamment, l'approche désagrégée basée sur l'étude des événements de signalisation présente l'avantage d'être le reflet d'un comportement d'usage du réseau de téléphonie lorsqu'un abonné mobile pratique un territoire couvert par ce réseau. On se situe alors aux abords de la perception de l'usager. De plus, les équipements de remontées sont naturellement en place pour assurer le fonctionnement de ces réseaux. Enfin, les solutions basées sur les réseaux de télécommunications sont disponibles partout et pour un très large nombre d'individus passivement enquêtés, lorsque les technologies GPS ne sont pas encore opérationnelles en indoor (bâtiments, tunnels, etc.) et ne concernent que des segments particuliers d'enquêtés.

Parmi, les solutions de captures de mobilité sur un territoire basées sur le réseau radio-mobile, nous avons choisi dans cette thèse de travailler avec celles qui exploitent la signalisation des mobiles. Nous justifions le fait de favoriser les données collectées en S par rapport aux données disponibles en P par deux points. Tout d'abord, le coût de traitement informatique des volumes que l'on peut collecter en P restreint considérablement la dimension des périmètres d'étude. Ensuite, bien qu'offrant a priori une précision spatiale moindre, les données collectées en S vont dans le sens d'une représentation de la perception de l'usager. Quant au choix du type d'évènements de signalisation à utiliser pour mesurer des déplacements, nous combinons les deux familles que nous avons identifiées dans la littérature en considérant aussi bien les évènements de communications que les évènements de mobilité. Ainsi, on peut assimiler le système de capture que l'on considère comme un réseau de capteurs fixes (déclenchement d'évènement de mobilité LAU et HO, etc.) couplé à des capteurs mobiles (communications, etc.). Cela permet d'avoir un ensemble de points de mesure horodatés précisément (sur déclenchements d'évènements), localisés spatialement à l'échelle de la zone couverte par une antenne, mais contenant également des informations de contexte sur la manière dont les réseaux de transport et de télécommunication sont pratiqués.

Dans cette thèse, nous traiterons de la mesure de déplacements à partir de ces évènements de signalisation. Alors, nous consacrerons la section suivante à l'introduction du fonctionnement d'un réseau de télécommunications axé autour des procédures de

signalisation. Cela nous permettra de poser le cadre d'usage des réseaux mobiles, la manière dont sont collectées les données et le vocabulaire ainsi que les notations qui faciliteront la compréhension de la suite du document.

2 Présentation des données de signalisation

Les travaux présentés dans cette thèse ont pour but de montrer l'étendue des champs d'application découlant de la mesure de déplacements à partir d'une donnée brute : la signalisation du réseau radio-mobile. Ainsi, afin de mieux comprendre comment, pourquoi et sous quelle forme est générée cette signalisation, nous débuterons cette section par une description simplifiée d'un réseau de télécommunication. Nous nous concentrerons uniquement sur les technologies 2G et 3G. En effet, la production des données utilisées dans cette thèse a eu lieu avant 2013, c'est-à-dire avant le lancement de la 4G en France. Cela nous permettra également de poser le vocabulaire employé dans le reste du document. Cette étape est nécessaire car les analogies développées dans la partie I existent également dans la terminologie d'usage. Cette description sommaire des réseaux de télécommunications facilitera l'appropriation par le lecteur des procédés de signalisation des évènements. Par la suite, nous présenterons la méthodologie de captures de ces derniers qui débutera par une introduction du cadre légal qui détermine la manière de traiter les données de signalisation. Afin de répondre aux exigences des lois de protection des données personnelles, un prétraitement automatique des données est nécessaire. Enfin, nous présenterons la méthodologie qui a permis de construire les jeux de données que nous exploiterons pour produire les résultats présentés dans cette thèse.

2.1 Les données de signalisation

Cette sous-section dédiée à la source de données que nous exploiterons pour la mesure des déplacements, est divisée en deux paragraphes principaux. Le premier pose de manière synthétique les connaissances nécessaires sur le fonctionnement des réseaux de télécommunications pour appréhender la notion de signalisation. En effet, avant d'introduire le principe de signalisation qui existe dans le cadre du fonctionnement des réseaux de télécommunications mobiles, nous présentons de manière simplifiée des éléments qui constituent ce réseau. Tout d'abord, nous dessinons les différentes unités utilisées pour découper le territoire couvert par un réseau d'antennes, auquel nous ferons référence tout au long du document sous l'appellation "territoire mobile". Cela permet de faire le rapprochement avec la géographie du territoire national et son découpage administratif par exemple. Ensuite, nous nommerons les éléments d'architecture d'un réseau radio-mobile qui seront nécessaires pour la compréhension du système de collecte de données que nous envisageons. Ces deux représentations, de découpage et d'architecture, nous permettent d'introduire les notions de technologies et de « couches » qui vont constituer le « territoire mobile ». L'ensemble de ces points abordés amène à la présentation du rôle de la signalisation

et de son importance pour le fonctionnement des réseaux. Enfin, la deuxième sous-section vise à décrire la signalisation en elle-même et les notations que nous suivrons dans ce manuscrit.

2.1.1 **Présentation d'un réseau de télécommunication**

2.1.1.1 Découpage du « territoire mobile »

Dans les études transport, il existe plusieurs systèmes d'unité pour proposer un zonage d'un territoire offrant un service de transport. Par exemple, le territoire national est découpé en régions, départements, agglomérations, quartiers … Sur ce même territoire, un réseau de télécommunication sans fil fournit à ses abonnés des services de télécommunications (voix et data). Par analogie, nous appellerons le « territoire mobile » la zone de service télécom. Elle est composée d'unités appelées cellules. Ces dernières sont adjacentes les unes aux autres et se chevauchent afin d'assurer une couverture de service sur tout le territoire. On peut classer ces cellules selon le rayon de couverture :

- Les macro-cellules : On les retrouve dans des zones rurales de faible densité de population. Ces cellules ont un rayon de couverture entre 0,5km et 30km
- Les micro-cellules : On les retrouve dans des zones urbaines de forte densité de population. Ces cellules ont un rayon de couverture entre 50m et 500m.
- Les pico-cellules et femto-cellules : Ce sont des cellules pour la couverture à l'intérieur des bâtiments ou des avions (de 5 à 50 mètres de rayon).

On appelle cellule le périmètre géographique couvert par une antenne radio. Dans le cas d'une antenne isotrope, qui rayonnerait uniformément dans toutes les directions dans un milieu homogène et isotrope également, une cellule serait un cercle autour d'un point du territoire où se situe l'antenne. Cet emplacement du territoire est appelé le site. Un site peut héberger des antennes de technologies et de fréquences différentes. Nous en verrons les conséquences directes sur le découpage du « territoire mobile » dans le paragraphe 2.1.1.3.

Tout abonné dont le terminal mobile est allumé, est connecté au réseau de service de télécommunication. Alors son mobile se trouve dans une cellule du « territoire mobile ». Comme le territoire géographique le « territoire mobile » est subdivisé. On distingue trois échelons classés ci-dessous par ordre croissant de dimension:

- La cellule (dont la définition est présentée ci-avant)
- La zone de localisation : qui correspond à un ensemble de cellules, adjacentes ou non.
- Le « territoire mobile national », qui correspond à la zone de couverture d'un pays par toutes les antennes localisées sur ce territoire. Le terme utilisé en télécommunications est PLMN pour Public Land Mobile Network.

2.1.1.2 Architecture d'un réseau de télécommunications

Ce paragraphe n'a pas pour vocation de décrire le fonctionnement complet d'un réseau cellulaire. Les éléments introduits, permettent de poser un vocabulaire et de faciliter la compréhension du comportement du réseau en situation d'usage par ses abonnés en mobilité. Le flux d'information qui permet au réseau d'interpréter, de traiter et de réagir à la demande de service des abonnés n'est autre que la signalisation.

Tout d'abord, un réseau de télécommunication permet à des abonnés autorisés (abonnés de l'opérateur ou des « roamers ») l'accès à des services (téléphonie, messagerie, transmission de données, diffusion de contenus audio-visuels). Ainsi, un réseau cellulaire se compose d'un réseau fixe (non-mobile) dont les éléments sont connectés de manière filaire et d'un large nombre de terminaux mobiles. Ceux-ci sont équipés de carte SIM permettant l'identification de l'abonné sur le réseau. Les parties fixes et mobiles communiquent entre elles via une liaison radioélectrique. Lorsque la communication entre le terminal mobile s'effectue dans le sens du terminal vers le réseau fixe, on parle de liaison montante. La communication en sens inverse est appelée descendante. La partie fixe est constituée d'un réseau d'accès radio qui assure les transmissions radioélectriques et gère la ressource radio, d'un réseau cœur qui gère l'acheminement des appels et la mobilité des abonnés et d'un système d'exploitation et de maintenance qui permet à l'opérateur d'administrer et de contrôler son réseau. Le maillage d'antennes constitue l'interface entre le terminal mobile et le PLMN. Nous ne nous intéresserons qu'aux réseaux d'accès radio et des réseaux cœur.

Le PLMN repose sur différentes architectures normalisées (2G, 2.5G, 3G, …). Un opérateur de télécommunications déploie et opère son PLMN dont il est propriétaire. Ce dernier héberge des architectures propres à chaque technologie dont il a acquis la licence d'opération. De manière simplifiée, l'architecture d'un PLMN se décompose en deux sous-ensembles représentés sur la Figure 27. Les encadrés en traits pleins orange constituent le réseau d'accès radio et les encadrés en traits pointillés noirs constituent le réseau cœur. Selon la technologie, les éléments du réseau d'accès varient. Ces éléments sont situés à gauche en violet et encadrés d'orange pour la 2G et à droite en bleu et encadrés d'orange les éléments pour la 3G. On remarquera que le réseau cœur est divisé en deux parties non relatives aux technologies mais au type de données transmises. La partie CS (Circuit Switched) du réseau cœur est représentée en violet mais est à la fois une composante pour les technologies 2G et 3G. Elle traite la voix et les SMS. La partie PS (Paquet Switched) traite quant à elle, des données de type « paquet ». Ces différents éléments sont connectés par différentes interfaces (Abis, A, Iub, Iu-CS et Iu-PS).

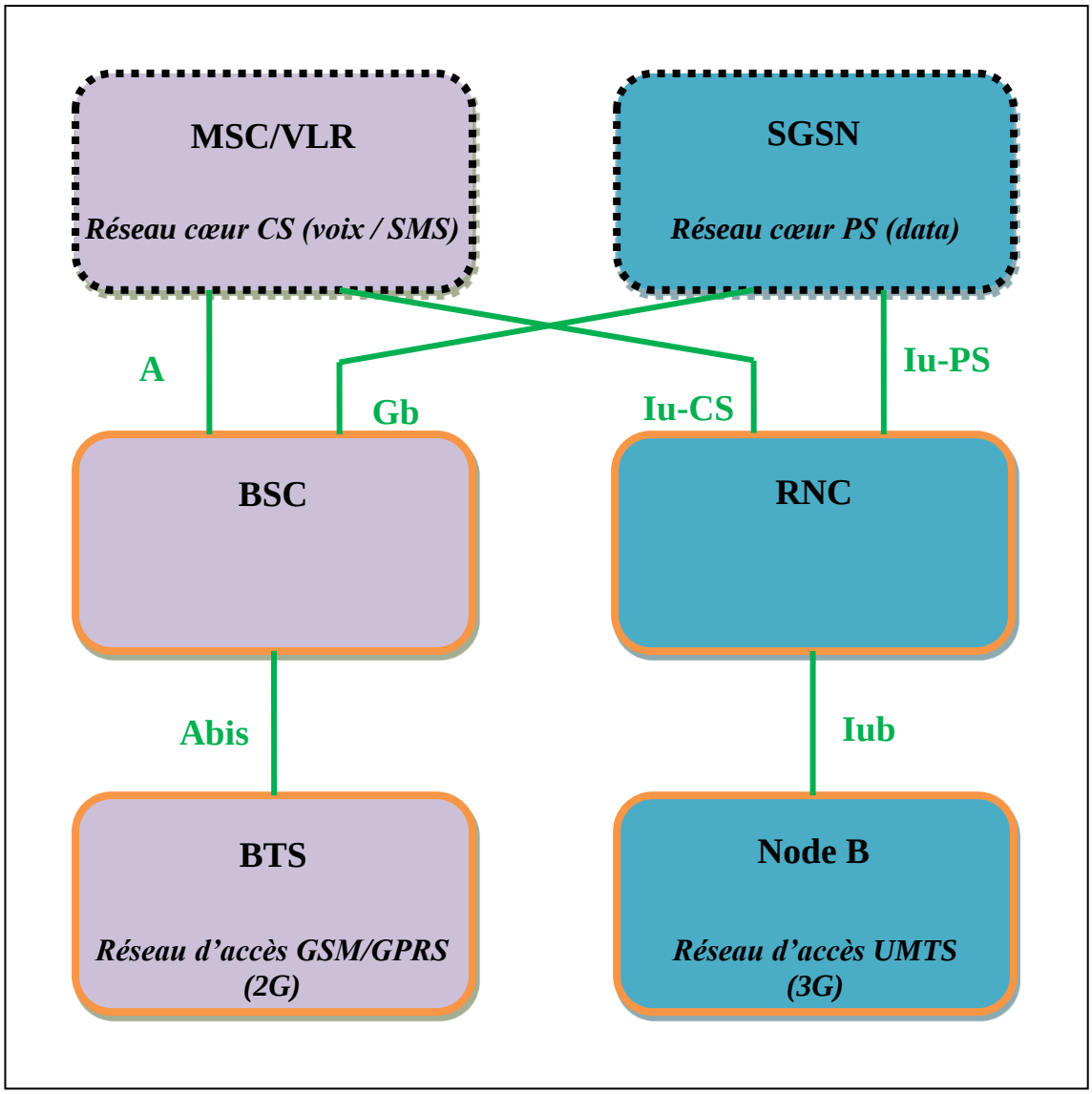


Figure 27 : architecture simplifiée d'un PLMN équipé des technologies 2G et 3G

Détaillons les éléments de l'architecture plus précisément en commençant par les premiers éléments que rencontrent les téléphones, c'est-à-dire les points d'accès réseau. Il s'agit en fait des sites qui hébergent les antennes relais. Un site de technologies 2G est appelé station de base ou BTS pour Base Transceiver Station. Un site de technologie 3G est appelé Node B. Ces éléments appartiennent au sous-système radio (trait plein orange), c'est-à-dire au réseau d'accès radio (RAN pour Radio Access Network). Son rôle est d'assurer les transmissions et de gérer la ressource radio. En 2G, on parle de BSS (Base Station Sub-System) ou GERAN (GSM Edge Radio Access Network) et en 3G on parle d'UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network). Le deuxième sous-système de l'architecture que nous présentons sur la figure est encadré par des pointillés noirs. Il s'agit du sous-système d'acheminement ou réseau cœur (Core Network). Il réalise les fonctions d'établissement des appels, l'échange de données et gère la mobilité.

Chacun de ces systèmes réalise les fonctions dont il a la charge grâce à divers équipements. Le sous-système radio est composé de stations de base (ou node B) et de contrôleurs de ces stations de base. Ces derniers sont appelés BSC (Base Station Controller) en 2G et RNC (Radio Network Controller) en 3G. Ils pilotent les stations de bases, elles-mêmes en charge de la gestion physique du lien radio. Leur rôle comprend les prises de décisions concernant l'activation/désactivation d'un canal de communication vers le terminal mobile, la puissance d'émission et la gestion de la synchronisation horaire et de la mobilité entre deux cellules à la charge du contrôleur.

A partir du déploiement des technologies GPRS pour General Packet Radio System (2.5G), le réseau cœur s'est scindé en deux parties, l'une dédiée à la voix et aux SMS uniquement et l'autre dédiée aux données. Ainsi la partie CS (Circuit Switched) permet le transport de la voix et des SMS et la partie PS (Packet Switched) le transport des données. Le réseau d'accès et la partie CS du réseau cœur sont liés par des interfaces filaires annotée interface A en 2G et interface Iu-CS en 3G. Cette interface relie en réalité le contrôleur de station de base à un routeur nommé MSC pour Mobile Switching Center. Cet élément assure l'interconnexion avec le réseau de téléphonie fixe et les autres réseaux de téléphonie mobile, et effectue les commutations pour les mobiles desservis par cet élément. Le MSC est en charge d'interroger la base de données qui gère les abonnés d'un opérateur (HLR : Home Location Register) et le Centre d'authentification (AuC : Authentification Center) pour valider les demande de services et pour chiffrer les communications. Un MSC fonctionne de pair avec un équipement : le VLR (Visitor Location Register). Il s'agit d'une base de données temporaire qui mémorise certaines informations, notamment de localisation sur le « territoire mobile ». Le PLMN contient autant d'interfaces A et Iu qu'il existe de MSC de technologie 2G et 3G. Un fonctionnement symétrique existe dans le domaine PS. Alors l'interface A devient Gb et l'interface Iu-CS devient Iu-PS. En mode paquet, l'équivalent du MSC est appelé SGSN pour Serving GPRS Support Node.

2.1.1.3 Les différentes « couches technologiques » du « territoire mobile »

Le protocole de communication entre le terminal mobile et le réseau varie selon la technologie du réseau de télécommunication (2G, 3G, 4G). Alors, le « territoire mobile » aura un découpage en cellules et zones de localisation distinct pour chacune des technologies. De plus, à chaque technologie sont associées une ou plusieurs bandes de fréquence de fonctionnement. Ceci n'entraine pas un nouveau découpage en zone de localisation mais un chevauchement des cellules pour chaque fréquence de la technologie. Un site contient généralement plusieurs antennes d'une même technologie et d'une même bande de fréquence, appelées secteurs. Ils assurent une couverture tout autour du site. On notera qu'un même site peut héberger des antennes de technologies différentes et/ou appartenant à diverses bandes de fréquence. Ainsi, une cellule est la zone couverte par une antenne nommée secteur. A titre d'exemple, un site de coordonnées (X, Y) peut héberger 3 secteurs 2G pour la bande de fréquence 900MHz, 3 secteurs 2G pour la bande de fréquence 1800MHz et 3 secteurs 3G pour la bande de fréquence 2GHz. On décompte alors 9 cellules distinctes autour du site (X,

Y) qui appartiennent à trois sous-couches du « territoire mobile ». Ceci n'est pas sans impact sur l'aspect du « territoire mobile ». Ainsi, un même point de coordonnées (X, Y) du « territoire géographique » peut être couvert par une cellule C1 attachée à la zone de localisation L1 de technologie T1 à la fréquence f1, une cellule C2 attachée à la zone de localisation L2 de technologie T1 à la fréquence f2 et une cellule C3 attachée à la zone de localisation L3 de technologie T2 à la fréquence f3. Les cellules C1 et C2 seront dans la plupart des cas reliées à un même MSC de technologie T1. Les zones de localisations sont disjointes entre les technologies, même si les paramétrages de raccordement peuvent coïncider. Dès lors, le « territoire mobile » peut être interprété comme une superposition de « couches technologiques », chacune divisée en zone de localisation puis en cellules. Ces couches se superposent au territoire géographique avec comme point de référence les coordonnées des sites. Chaque « couche technologique » peut être scindée en « couches mobiles » selon la fréquence de fonctionnement. Ce découpage selon la fréquence d'opérations entraine une redondance du découpage du territoire mobile sur le plan des cellules mais pas sur celui des zones de localisation. Sur le réseau actuel, on peut superposer au territoire géographique sur lequel sont implantés les sites (en noir sur la Figure 28), les « couches mobiles » suivantes :

- La couche mobile GSM 900MHz qui appartient à la couche technologique 2G (en orange)
- La couche mobile DCS 1800MHz qui appartient à la couche technologique 2G (en jaune)
- La couche mobile UMTS 900MHz qui appartient à la couche technologique 3G (en vert)
- La couche mobile UMTS 2GHz qui appartient à la couche technologique 3G (en bleu)
- La couche mobile LTE 800MHz qui appartient à la couche technologique 4G (en gris)
- La couche mobile LTE 2,6GHz qui appartient à la couche technologique 4G (en violet)

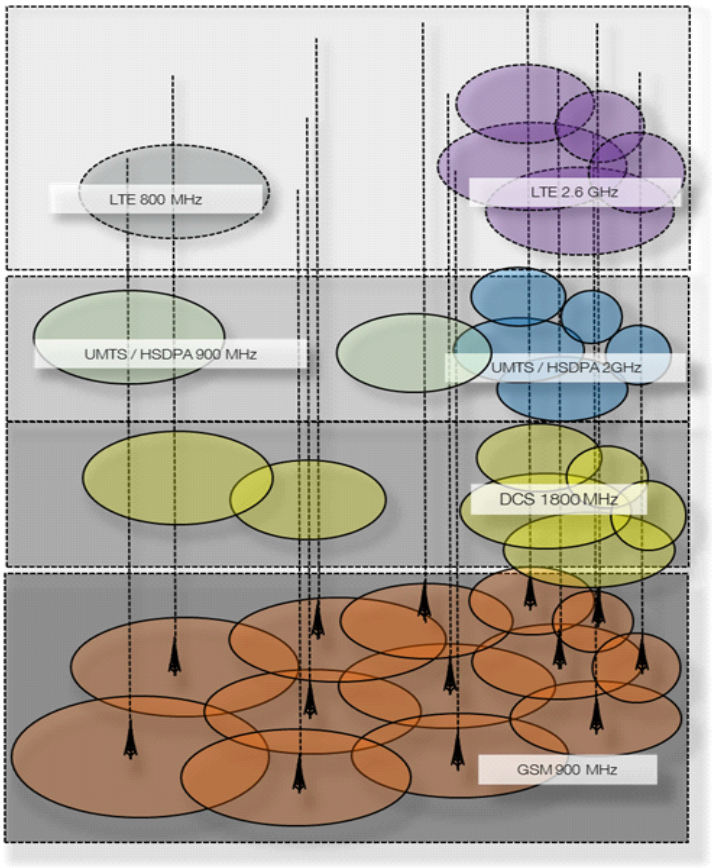


Figure 28 : représentation simplifiée des superpositions en couche mobiles en supposant des antennes isotropes

Sur le graphique précédent, à l'instar de la technologie 2G, nous avons représenté les « couches technologiques » 3G et 4G sur une même « couche mobile ». La justification vient de l'écart entre les fréquences utilisées pour ces technologies qui entrainent des cas rares de superposition. En effet, d'après la formule de Friis en espace libre, le rayon de couverture est inversement proportionnel à la fréquence. Ainsi, les cellules 3G 2GHz couvriront plutôt les zones urbaines denses et les cellules 3G 900MHz, les zones rurales. De plus, comme mentionné précédemment, nous travaillons à partir de données collectées avant l'ouverture du réseau 4G en France. Dès lors, nous ne considérerons que 3 « couches mobiles » dans la suite de notre étude : la « couche mobile 2G-900MHz », la « couche mobile 2G-1800MHz » et la « couche mobile 3G » qui regroupent l'ensemble des bandes fréquentielles de la 3G. Nous avons opté pour ce regroupement en 3G, car la fréquence est, dans la plupart des cas, discriminante du type de sol couvert et il n'existe pas le même recouvrement du "territoire géographique" par les différentes couches fréquentielles de la 3G que nous observons avec les bandes 900MHz et 1800MHz de la 2G.

Cette notion de « couche mobile » du « territoire mobile » est importante car elle peut donner lieu à une mauvaise interprétation des évènements de signalisation. En effet, deux évènements successifs dans des cellules distinctes d'une même « couche mobile » sera

sûrement le reflet d'un déplacement sur le territoire grâce à l'optimisation du plan de fréquence qui évite les interférences. Cependant, il faut prendre garde à l'interprétation de déplacements inter-couches sur le territoire mobile, car les deux cellules peuvent couvrir une même zone géographique. En effet, selon l'usage radio demandé par un abonné et l'état de charge du réseau cellulaire, des « sauts technologiques » peuvent se produire. La gestion de ces « sauts » requiert une signalisation adaptée pour gérer en permanence la qualité des services et la communication entre les différents éléments et leur pilotage. Il faut alors prendre garde à l'interprétation de ces messages de signalisation.

2.1.1.4 Importance de la signalisation

Les paragraphes précédents décrivent de manière simplifiée l'architecture d'un réseau cellulaire qui héberge plusieurs technologies. Mais comment assurer un fonctionnement optimal entre la partie « physique » du réseau qui permet l'accès radio et le réseau cœur, la partie « intelligente »? Ce mécanisme de communications entre les différents sous-systèmes et entre les multiples éléments qui composent ces sous-systèmes repose sur le principe de messages spécifiques qui ne contiennent que les informations nécessaires à transmettre sur un lien entre deux éléments. En effet, pour limiter l'encombrement de la bande passante de chacun des liens, le contenu des messages est optimisé et réduit à un ensemble garant du dialogue entre éléments et/ou entre sous-systèmes.

En effet, une des fonctions principales des réseaux cellulaires est l'itinérance. L'itinérance permet de connaître à tout instant la position d'un abonné. Cette connaissance est nécessaire pour pouvoir joindre cet abonné. Elle est assurée via le découpage du territoire en zones de localisation et d'une signalisation appropriée (AKYILDIZ, et al., 1995). Afin de réduire les coûts en bande passante, en énergie et en puissance de calcul nécessaire pour transférer un appel vers un téléphone mobile, la mise à jour de la zone de localisation dans laquelle se trouve chacun des mobiles est nécessaire. Ainsi, de manière périodique ou si le mobile se déplace, la zone de localisation est mise à jour. Cette procédure permet de réduire les coûts de paging, c'est-à-dire de recherche d'un mobile dans le « territoire mobile » afin de lui transférer une communication le plus rapidement possible. Une mise à jour de localisation à la cellule n'était pas envisageable en raison d'un flux de signalisation qui serait trop élevé. De la même manière, une communication doit être assurée tout au long d'un déplacement sur le territoire mobile. Pour permettre la gestion de ces différentes actions, des messages de signalisation transitent jusqu'au réseau cœur. De ce fait, la signalisation est l'ensemble des ordres et des informations échangés à l'intérieur d'un réseau qui garantissent l'acheminement rapide et la qualité des communications (les axes en vert sur la Figure 27 représentent les chemins empruntés par la signalisation au niveau des interfaces). Un abonné mobile va utiliser ces mécanismes en permanence et de manière transparente. La signalisation circule entre les éléments du réseau téléphonique, que ce soit au moment de la numérotation, de l'accès à une boite vocale, d'un déplacement, etc.

Afin de transmettre du trafic de signalisation pour ouvrir ou fermer des circuits ou des voies d'acheminement d'informations, une architecture standardisée constituée de protocoles

et de procédures est mise en place. Pour l'Europe il s'agit de l'architecture SS7 (Signalling System Number 7). Elle permet entre autre de transmettre du trafic de signalisation entre le réseau d'accès et le réseau cœur via les interfaces A et Iu-CS dans le domaine circuit, et via les interfaces Gb et Iu-Ps dans le domaine paquet.

2.1.2 **Présentation des évènements de signalisation**

De manière générale, le flux d'évènements sur les différentes interfaces du réseau du PLMN est capturé et interprété en temps réel via des sondes dont le rôle et le fonctionnement seront introduits dans le paragraphe 2.2.3.2. Tous les évènements contiennent les informations suivantes : un identifiant anonymisé d'un abonné, la nature de l'évènement, la cellule (2G ou 3G) où se produit l'événement, la zone de localisation dans laquelle se trouve cette cellule, la dernière zone de localisation enregistrée, le moment où se produit l'évènement (jour et heure à la milliseconde) et si la réalisation de l'évènement a connu des difficultés (rejet et raisons du rejet). Décrivons maintenant les différentes natures d'évènements

Les évènements présentés ici sont ceux disponibles sur les interfaces A et Iu (Iu-CS et Iu-PS). Ainsi, nous accèderons à des messages de signalisations dédiés à la gestion des communications de type voix en 2G et 3G et une partie des messages pour les communications de type data en 3G. Pour les deux technologies, nous récupèrerons l'ensemble de la signalisation de gestion de la mobilité. Nous présentons dans ce paragraphe les évènements de signalisation qui transitent via ces interfaces. Dans un premier paragraphe, nous décrirons les évènements tels qu'ils se produisent pour expliquer les conditions dans lesquelles ils se déclenchent, les informations qu'ils génèrent et les particularités relatives à la technologie. Dans un deuxième paragraphe, nous expliciterons les regroupements choisis pour la suite des travaux en introduisant des notations propres à cette thèse. Dans chacun des paragraphes, nous avons opté pour une présentation des évènements en les répartissant en deux groupes : les évènements dédiés à la gestion de la communication et les évènements dédiés à la gestion de la mobilité.

2.1.2.1 Description des événements de signalisation

2.1.2.1.1 Les évènements dédiés à la gestion des communications

Nous commençons par décrire les évènements de gestion des communications car ils sont « prioritaires » dans le fonctionnement d'un réseau cellulaire. En effet, le but premier du réseau est de fournir un service de communication. La gestion de la mobilité est en place pour assurer la qualité et la rapidité de l'acheminement des communications.

Attachement/ détachement au réseau

La première étape avant de pouvoir communiquer via son terminal mobile, est de se connecter au réseau. Une connexion à un PLMN s'établit lorsque l'on allume le terminal

mobile. Selon la technologie supportée par le terminal, le type d'abonnement et la « couche technologique » de la zone géographique dans laquelle se trouve le terminal au moment de sa mise en marche, la connexion au réseau se fera sur la « couche technologique 2G » ou sur la « couche technologique 3G ». Le mécanisme de signalisation d'attachement ou de détachement est similaire selon les technologies. Tout abonné ayant souscrit un forfait 3G sans modifier le paramétrage par défaut de son terminal mobile va s'attacher prioritairement à la « couche mobile 3G » lorsque celle-ci propose une qualité du lien radio suffisante, et va donc générer un événement sur l'interface Iu.

Communications

On distingue trois natures de communication : la communication vocale (appel « classique »), la communication via un échange de données (data) et la communication via SMS (Short Message Service). Ainsi, une signalisation différente est requise. Comme mentionné dans le paragraphe 2.1.1.2, la voix et les SMS, et les données empruntent des circuits différents du réseau cœur. Ceci entraine une signalisation adaptée à la nature de la communication. Une notion de sens est également associée à la communication. En effet, la signalisation indique si la communication est reçue par un mobile ou émise. Dans le cas d'une communication reçue, un évènement de paging est déclenché. Il correspond à une déclaration de présence au niveau d'une cellule par un mobile que le réseau recherche sur une zone de localisation pour lui transmettre une communication. L'évènement de communication reçu se produit même si l'appel est rejeté par l'abonné ou en cas de basculement vers la messagerie. La notion de sens intervient également pour les communications via SMS et les communications de données. Typiquement, les mises à jour, ou les rafraichissements de boites mails entrainent des communications de données reçues de manière périodique.

Communication en mobilité

Le fonctionnement du réseau cellulaire doit permettre d'assurer la continuité de la communication quand un mobile se déplace. Pour cela, il existe un mécanisme appelé handover qui déclenche des basculements de cellules de rattachement tout au long d'un déplacement pour assurer une qualité optimale à tout moment. En 2G, la transition entre deux cellules est abrupte et doit être très courte pour être transparente vis-à-vis de l'abonné. Ainsi, le mécanisme de handover se doit d'être prioritaire. Parmi les évolutions de la 3G par rapport à la 2G, on compte la possibilité pour un mobile d'être connecté à deux cellules en même temps. Ainsi, on parle de « soft handover » car contrairement au cas 2G, le mobile est connecté en permanence à au moins une cellule. Cette différence se ressent dans la signalisation. En effet, en 2G le mécanisme de handover est permis grâce à un échange de signalisation entre le réseau d'accès et le réseau cœur. Tandis qu'en 3G, une signalisation n'est pas nécessaire. Ainsi, tant qu'il n'y a pas changement de zone de localisation, aucune information de localisation sur le « territoire mobile » n'est remontée au réseau cœur 3G, sauf

dans certains cas particuliers où il n'existe pas d'interface Iur entre les deux RNC. Dans les exemples d'études présentés, cela ne sera pas le cas et nous n'observons pas de message de type handover en 3G.

2.1.2.1.2 Les évènements de gestion de la mobilité

En plus de son rôle d'échelon spatial dans le « territoire mobile », une cellule sera considérée comme le point d'accès radio par lequel un terminal mobile est connecté au réseau cellulaire. Un mobile allumé est constamment connecté par un lien radio à la cellule qui offre la meilleure couverture de la zone géographique dans laquelle il se trouve. Afin de ne pas surcharger le trafic sur le réseau, la signalisation est optimisée. Ainsi, à tout instant, le réseau cœur a connaissance de la position d'un mobile allumé à l'échelle de la zone de localisation mais pas nécessairement à la cellule. Ainsi, la mobilité est gérée à l'échelle de la zone de localisation. Une catégorie d'évènements est dédiée à la mise à jour de cette zone qui peut se produire si un terminal mobile non engagé dans une communication se déplace d'une zone de localisation vers une autre. De plus, afin de s'assurer de l'exactitude de cette information de localisation, une mise à jour périodique est utilisée. Comme mentionné précédemment, à chaque événement, quel que soit sa nature, l'information de zone de localisation après réalisation de l'évènement et l'information de zone de localisation avant l'évènement sont transmises. Alors, en l'absence d'évènement déclenché depuis 3 heures, un évènement de mise à jour de localisation périodique est généré.

2.1.2.2 Classification des événements et notations retenues

Nous présentons dans ce paragraphe les regroupements de types d'évènements que nous avons choisis pour notre étude ainsi que la notation attribuée.

2.1.2.2.1 Les évènements dédiés à la gestion des communications

De manière générale, la distinction entre les messages de signalisation à destination du domaine CS et du domaine PS se fera par l'ajout de l'acronyme **GMM** (GPRS Mobility Management) devant les événements relatifs à la partie PS du réseau cœur en 3G.

Attachement/ détachement au réseau

Les événements d'attachement au domaine CS du réseau cœur sont notés **ATT1** indépendamment de la technologie. De la même manière, les détachements au domaine CS du réseau cœur sont notés **ATT0**. Cependant, la connaissance de la technologie n'est pas perdue car les informations de cellules et de zone de localisation sont transmises en même temps que la nature de l'évènement. Or une paire cellule/zone de localisation est propre à une « couche technologique ». Les attachements et détachements au domaine PS du réseau cœur sont notés respectivement **GMM_AT** et **GMM_DT**. Ces évènements peuvent se produire

lorsqu'un abonné active ou désactive l'accès aux données depuis son téléphone sans pour autant l'allumer ou l'éteindre.

Communications

Les communications vocales ou par SMS sont notées **COM1** lorsqu'elles sont émises et **COM0** lorsqu'elles sont reçues. Quant au transfert de données, le sens n'a pas vraiment d'importance pour l'étude de la mobilité. Ainsi, tout échange de données est noté **GMM_SERVICE**.

Communication en mobilité

Les handovers en 2G sont notés **HO**, et n'existent pas dans les messages de signalisations 3G étudiés.

2.1.2.2.2 Les évènements de gestion de la mobilité

La mise à jour de localisation normale est notée **LAUN** et la mise à jour périodique **LAUP**. Pour la transmission de données, un découpage similaire à la zone de localisation est réalisé. Ainsi, il existe un découpage en zone de routage (Routing Area) pour optimiser les communications de type data. Alors les évènements de mise à jour de zone de routage sont notés **GMM_RAUN** et **GMM_RAUP**. Ces évènements GMM sont également porteurs de l'information de zone de localisation.

2.2 Méthodologie de collecte dans le cadre légal français

2.2.1 Présentation du contexte légal

La terminologie « donnée personnelle » concerne toute donnée permettant d'identifier directement ou indirectement une personne physique. Les données personnelles ne peuvent être traitées ou stockées sans le consentement explicite d'une personne et ce pour chaque utilisation qui sera faite de cette donnée, pour une durée déterminée et avec un droit de retrait. D'une manière générale, toute base de données contenant des données personnelles est soumise aux obligations définies par la CNIL. La Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL) est une autorité administrative française indépendante chargée de veiller à ce que l'informatique soit au service du citoyen et qu'elle ne porte atteinte ni à l'identité humaine, ni aux droits de l'homme, ni à la vie privée, ni aux libertés individuelles ou publiques. Ainsi, d'après l'article N°2 de la loi "Informatique et libertés" : « Constitue une donnée à caractère personnel toute information relative à une personne physique identifiée ou qui peut être identifiée, directement ou indirectement, par référence à un numéro d'identification ou à un ou plusieurs éléments qui lui sont propres. Pour déterminer si une personne est identifiable, il convient de considérer l'ensemble des moyens en vue de permettre son identification dont dispose ou auxquels peut avoir accès le responsable du

traitement ou toute autre personne »[12]. Le point de vue de la CNIL se résume de la manière suivante : des données sont estimées « à caractère personnel » dès qu'elles sont relatives à des personnes physiques identifiées directement ou indirectement. Ainsi, des données qui permettent des recoupements d'informations grâce à une identification d'habitudes et de goûts par exemple sont aussi peu anonymes que des données contenant le nom d'une personne, ou d'autres informations personnelles (adresse IP, numéro d'immatriculation, numéro de téléphone, photographie, etc.).

2.2.2 **Précision sur l'identification directe et indirecte**

Les données de signalisation qui circulent dans le réseau de télécommunications apparaissent comme des « données à caractère personnel ». En effet, dans le cadre du fonctionnement technique du réseau, on se réfère au paragraphe V de l'article L34-1 du Code des postes et des communications électroniques : « Sans préjudice des dispositions du III (infractions pénales) et du IV (facturation) et sous réserve des nécessités des enquêtes judiciaires, les données permettant de localiser l'équipement terminal de l'utilisateur ne peuvent ni être utilisées pendant la communication à des fins autres que son acheminement, ni être conservées et traitées après l'achèvement de la communication que moyennant le consentement de l'abonné, dûment informé des catégories de données en cause, de la durée du traitement, de ses fins et du fait que ces données seront ou non transmises à des fournisseurs de services tiers. L'abonné peut retirer à tout moment et gratuitement, hormis les coûts liés à la transmission du retrait, son consentement. »

Alors, si l'on souhaite mesurer des déplacements à partir des données de signalisation, plusieurs obligations sont à tenir :

- **Sécurité des fichiers** : tout responsable de traitement informatique de données personnelles doit adopter des mesures de sécurité physiques (sécurité des locaux), logiques (sécurité des systèmes d'information) et adaptées à la nature des données et aux risques présentés par le traitement.
- **Confidentialité des données** : Seules les personnes autorisées peuvent accéder aux données personnelles contenues dans un fichier. Il s'agit des destinataires explicitement désignés pour en obtenir régulièrement communication et des «tiers autorisés» ayant qualité pour les recevoir de façon ponctuelle et motivée (ex. : la police, le fisc).
- **Durée de conservation des informations** : Les données personnelles ont une date de péremption. Le responsable d'un fichier fixe une durée de conservation raisonnable en fonction de l'objectif du fichier.
- **L'information des personnes :** Le responsable d'un fichier doit permettre aux personnes concernées par des informations qu'il détient, d'exercer pleinement leurs droits.

[12] Loi du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés (modifiée par la loi relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel du 6 août 2004), Commission nationale de l'informatique et des libertés

Pour cela, il doit leur communiquer son identité, la finalité de son traitement, le caractère obligatoire ou facultatif des réponses, les destinataires des informations, l'existence de droits, les transmissions envisagées.

- **Finalité des traitements** : Un fichier doit avoir un objectif précis. Les informations exploitées dans un fichier doivent être cohérentes par rapport à son objectif. Les informations ne peuvent pas être réutilisées de manière incompatible avec la finalité pour laquelle elles ont été collectées.
- **Autorisation CNIL** : Les traitements informatiques de données personnelles qui présentent des risques particuliers d'atteinte aux droits et aux libertés doivent, avant leur mise en œuvre, être soumis à l'autorisation de la CNIL.

Dans le cas de notre étude, comment respecter la législation en vigueur en évitant de recourir à l'utilisation de données personnelles ? L'utilisation de données personnelles entrainerait l'obligation de l'accord de tous les abonnés d'un PLMN. Ceci induirait un biais statistique et diminuerait l'avantage de cette méthode concernant la taille de l'échantillon. Il existe deux manières d'identifier une personne, de manière directe ou de manière indirecte. Dans les deux cas, l'identification sort du cadre légal français. Cependant, la méthode de collecte via un réseau de sondes sur les interfaces A et Iu d'un PLMN ne permet pas l'accès explicite à des informations personnelles sur l'abonné. En effet, afin d'identifier un mobile sur le réseau, un numéro appelé IMSI pour International Mobile Subscriber Identity est échangé. Ce numéro est stocké au niveau de la carte SIM. Néanmoins, il n'est pas possible d'associer nommément un abonné à partir d'un IMSI à ce niveau de l'architecture. Ainsi, il n'est pas possible d'identifier directement un abonné avec ce numéro d'IMSI. Et on peut ajouter qu'un cryptage avec jet de la clé de chiffrement est aisément réalisable.

De plus, un ensemble de données numériques qui apparait comme une masse floue et homogène n'est en réalité qu'un agrégat dissécable de traces individuelles. Les experts du traitement de ces importants volumes de données, connus aujourd'hui sous l'appellation « Big Data », sont à même d'identifier de manière indirecte les individus qui les composent. En effet, les traces numériques de notre mobilité (CDR, applications pour SmartPhone, réseau sociaux, données transactionnelles de carte bancaires ou de cartes de transport) illustrent une façon unique pour un individu de se déplacer. Ces données sont souvent comparées à des empreintes digitales numériques. En effet, 4 traces spatio-temporelles avec une précision spatiale à la cellule et une fréquence de mise à jour de la position chaque heure permettent une identification unique de 95% des individus d'un jeu de données de 1 500 000 unités (DE MONTJOYE, et al., 2013). L'identification indirecte est d'autant plus compliquée que la résolution spatiale et/ou temporelle baisse. Néanmoins, les routines journalières ont une dimension identifiante car elles sont propres à un individu. Des déductions sur nos comportements permettent d'en apprendre plus sur qui nous sommes. L'univers du « Big Data » repose sur l'identification de corrélations qui permettent de construire de l'information non disponible directement. Alors, anonymiser de telles données est plus complexe que simplement crypter des numéros de téléphone, des IMSI, des noms, etc. Plusieurs méthodes existent pour empêcher l'identification des unités individuelles qui constituent ces masses de

données. Tout d'abord, il est possible de créer artificiellement des collisions qui détruisent l'unicité des schémas individuels. Ensuite, il est possible d'alimenter des compteurs à partir de flux d'informations temps réel, et n'avoir à disposition que des agrégats non divisibles. Enfin, une solution hybride peut être envisagée.

Dans cette thèse nous souhaitons nous affranchir des contraintes suivantes des enquêtes actives : la représentativité (taille de l'échantillon et caractéristiques des personnes acceptant de participer à l'enquête) et l'aspect statique. Nous souhaitons pouvoir traiter l'ensemble des traces de signalisation transitant dans le réseau. L'objet de notre étude porte sur l'analyse et la quantification de comportements de mobilité d'une population éventuellement segmentée et non l'observation de trajectoires individuelles. Ainsi, la méthode utilisée dans cette thèse et présentée ci-après s'appuie sur une agrégation paramétrable des informations disponibles au niveau des sondes. Par construction de cette méthode et sous couvert de l'exploitation en temps réel, sans conservation de la signalisation en transit, nous avons veillé à ce qu'il ne soit pas possible de reconstruire des données personnelles.

2.2.3 **Méthodologie de production des données**

2.2.3.1 Conséquences des contraintes légales

Dans cette thèse, nous avons constitué une base de données prétraitées avec la méthode développée par Orange. Cette méthode permet la transformation de la source brute de messages de signalisation en un jeu de données d'étude qui respectent les engagements pris par Orange vis-à-vis de la CNIL. La description détaillée de la méthode est confidentielle. Nous présentons quelques éléments de principe qui seront nécessaires à la compréhension de ce qui va suivre.

Les flux de signalisation qui circulent au niveau des interfaces A et Iu (Iu-CS et Iu-PS) sont traités en temps réel. Certaines informations contenues dans ces flux sont exploitées afin d'incrémenter des « compteurs paramétrables ». Les paramètres sont basés sur les informations présentes dans une trame. Un compteur peut être par exemple le nombre de mobiles ayant généré au moins un évènement au niveau d'une cellule pendant une plage de temps T. Il est possible avec la solution de fabriquer un compteur de flux entre 2 zones. Par exemple, on peut compter le nombre de mobiles ayant fait au moins un événement au niveau d'un groupe de cellules d'origine O (C_1, C_2, C_3) dans la plage de temps $T_o + \Delta_{to}$ puis au moins un événement au niveau d'un groupe de cellules de destination D (C_4, C_5) dans la plage de temps $T_d + \Delta_{td}$ avec $T_o + \Delta_{to} < T_d + \Delta_{td}$. On peut composer des groupes de trajectoires à partir de 3 zones géographiques de taille suffisante pour garantir la non-identification des mobiles.

De manière générale, si le résultat du comptage est trop faible (en nombre de mobiles), la mesure est inaccessible. De plus, les IMSI sont cryptés avec suppression de la clé.

2.2.3.2 Collection de la signalisation via des sondes

2.2.3.2.1 Intérêt des sondes

L'utilité première des sondes est de gérer la qualité des flux dans le réseau afin de mieux le maitriser et d'en évaluer la qualité (DZOUNDOU, 2009). En effet, les résultats en monitoring et en optimisation des réseaux font partie des facteurs clés pour évaluer la qualité des réseaux. Pour les opérateurs, ces besoins vont continuer à croître de manière significative sous les effets conjugués de la migration des réseaux vers de nouvelles technologies, de la démographie croissante et localisée, et surtout d'une complexité des architectures des réseaux accrue par la mixité des technologies. Le monitoring apparait nécessaire face à l'accroissement du trafic, des évolutions technologiques, du développement de nouveaux services et des mutations des usages de ces services mobiles en corrélation avec les changements des pratiques de mobilité. La qualité de service est un des objectifs majeur des opérateurs de téléphonie mobile. Ainsi, tout dysfonctionnement du réseau entrainant une détérioration de la qualité de service est analysé grâce aux données en transit sur les interfaces (liens en vert sur la Figure 27). Cela permet d'une part une analyse radio fine et d'autre part une surveillance des mécanismes de communication interne au réseau, c'est-à-dire la signalisation. On notera que ce besoin d'observation fine sur les réseaux de télécommunications et les problématiques qui font naitre ce besoin, ne sont pas sans rappeler les enjeux des réseaux de transport.

Des sondes peuvent être placées à différents niveaux du réseau d'accès, soit au niveau des interfaces Abis et Iub, soit au niveau des interfaces A, Gb, Iu-CS et Iu-PS entre le sous-système radio et le sous-système d'acheminement. Les captures au plus proche du terminal mobile génèrent des informations relatives à la couche physique de transmission radio (puissance du signal émis/reçu, canal de communication, etc.). Inversement, les captures au niveau des couches supérieures du réseau contiennent des informations pauvres en mesures physiques mais riches en traces protocolaires. Ainsi, un premier groupe de sondes est placé au niveau des interfaces Abis (2G) et Iub (3G) pour la collecte des informations physiques (voir partie état de l'art 2.2 au point de collecte B). Le deuxième groupe de sonde est placé au niveau des interfaces A, Gb, Iu-CS et Iu-PS afin d' « écouter » la signalisation. Nos travaux portent sur les éléments capturés au niveau de ce deuxième groupe. En 3G, les sondes mutualisent leur écoute sur les interfaces Iu-CS et Iu-PS qui se fondent en une interface Iu. Ce n'est pas le cas en 2G qui a connu deux phases architecturales, une première phase où seules les communications vocales et par SMS étaient possibles et une deuxième phase où les communications data sont apparues. Ainsi, deux sondes sont nécessaires, une sur l'interface A et une sur l'interface Gb. Cependant, la couverture en sondes sur ces deux interfaces n'est pas la même (Figure 29). Le taux de disponibilité des données transitant sur l'interface Gb en Ile-de-France étant compris entre 40% et 60%, nous avons préféré ne pas utiliser les flux de signalisation. De plus, la couverture de l'Ile-de-France (qui sera notre zone géographique de travail) en antennes 3G est proche de 100% et les abonnés qui font usage du transfert de données possèdent majoritairement des terminaux mobiles compatibles avec la 3G. Dès lors,

la perte d'informations de signalisation à observer est négligeable par rapport au biais qu'aurait entrainé la prise en compte des sondes de capture sur l'interface Gb.

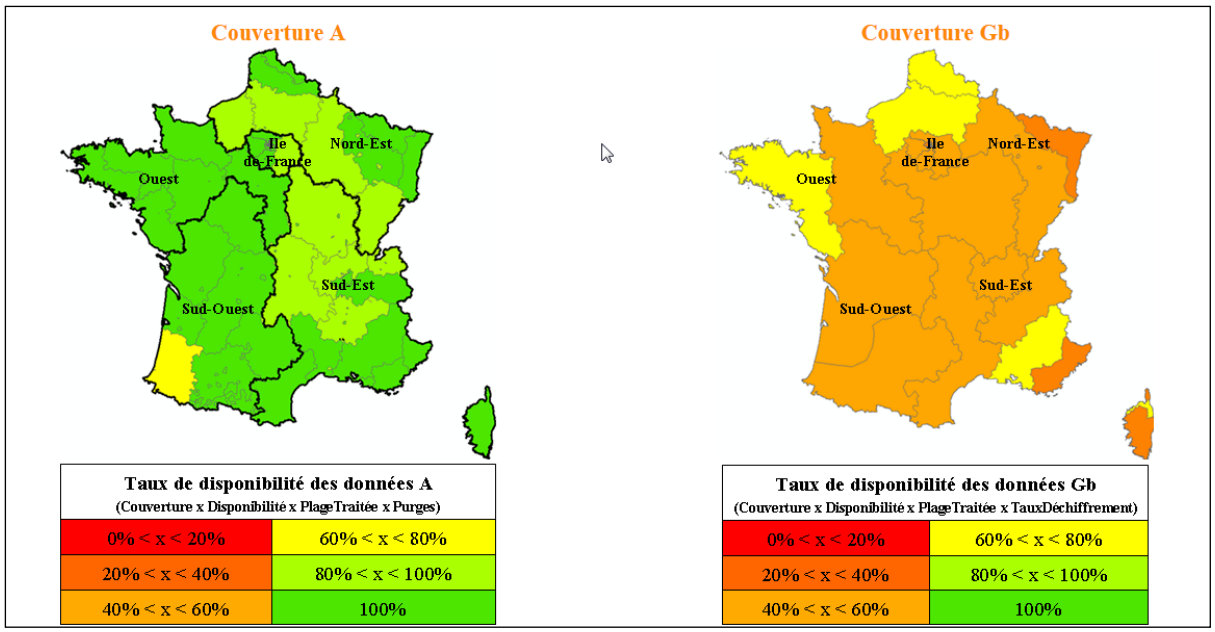


Figure 29 : disponibilité des sondes sur les interfaces A et Gb du réseau mobile opéré par Orange à l'échelle de la France en 2011 - source interne Orange

Les sondes produisent en temps réel des statistiques sur la signalisation générée par une procédure d'évènements entre un terminal mobile et le réseau. Une procédure est composée d'un nombre variable de messages protocolaires transportant diverses informations qu'un logiciel va exploiter pour en extraire des informations. Le contenu de la trame extraite est plus ou moins riche selon la procédure d'évènements considérée. Une trame est constituée à chaque procédure pour une cellule. Une procédure correspond à un changement d'état du terminal mobile (mobilité ou communication). En cas de mobilité du terminal lors d'une procédure, il y aura autant de trames générées que de cellules visitées. Par exemple, c'est le cas d'un mobile exécutant une succession de handovers sur la « couche technologique 2G ».

2.2.3.2.2 Lien entre événement et trame mesurée par la sonde

Sur chaque cellule « trafique » un certain nombre de terminaux mobiles. Lorsque ces terminaux se déplacent ou communiquent, une voie de communication dédiée à la signalisation s'ouvre entre les terminaux et le réseau cœur via une antenne (associée à une cellule). Cette voie de communication transporte une signalisation bidirectionnelle interprétée sous forme d'une trame par la sonde. Cette trame contient les informations liées à l'évènement à générer. Parmi l'ensemble des évènements capturables, on se concentre sur ceux décrits dans le paragraphe 2.1.2. Ces trames contiennent des informations:

- Sur le moment où la voie de communication se ferme, c'est-à-dire à la fin de l'évènement : **H**. La précision temporelle est à la milliseconde
- Un identifiant d'abonné anonymisé : **M**
- La cellule dans laquelle a débuté l'évènement : **C**. Pour les évènements de mobilité, il existe quelques règles spécifiques. Dans le cas des HO, il s'agit de la cellule quittée. C'est le fait de quitter une cellule en communication qui déclenche l'évènement. Dans le cas des LAUN, il s'agit de la cellule d'entrée de la nouvelle zone de localisation. C'est le fait d'entrer dans une cellule appartenant à une zone de localisation différente de celle enregistrée qui déclenche l'évènement.
- Le code de la zone de localisation à laquelle appartient la cellule **C** : **LAC** (Location Area Code)
- Le code de la zone de localisation précédemment enregistré par le réseau : **OLAC** (Old Location Area Code)
- La nature de l'évènement déclenché : **E** parmi {ATT0, ATT1, COM0, COM1, HO, LAUN, LAUP, GMM_SERVICE, GMM_RAUN, GMM_RAUP}.
- Si l'évènement a abouti ou les causes du rejet.

De manière générale, la durée des évènements est très courte (environ 1 seconde), sauf pour les appels vocaux dont la durée est celle de l'appel. La gestion des communications étant prioritaire, les handovers sont prioritaires à la mise à jour de localisation. Ainsi, les LAUN interviennent après les communications.

3 Conclusion

Ce premier chapitre de la partie technique nous a permis de montrer les avantages qu'offrent les sources numériques par rapport aux sources traditionnelles statiques en terme de coût, de mise en œuvre, de fréquence de renouvellement des enquêtes et de finesses spatiales et temporelles accessibles. Concernant les systèmes de capture de déplacements passifs, nous avons conclu qu'il serait plus intéressant d'explorer le potentiel des messages de signalisation remontés via le réseau de télécommunications car ils proposent un ensemble de traces géolocalisées et horodatées porteuses d'informations contextuelles d'usage des réseaux de télécommunications et de transport au travers des évènements dédiés à la gestion de la mobilité. En effet, la source de données de signalisation, semble répondre aux problématiques posées dans la première partie en terme de description des comportements grâce à la finesse temporelle et spatiale des mesures, mais également à la possibilité d'une acquisition dynamique. Néanmoins, le cadre légal de traitement des « données personnelles » ne nous permet pas à priori d'accéder à des paramètres sociodémographiques des individus. Ces mesures de déplacement réalisées à partir de la signalisation pourraient être un complément de l'observation des dynamiques et des variations fines des enquêtes traditionnelles qui donneraient les tendances des pratiques de déplacements selon des paramètres socioéconomiques et démographiques. De plus, la précision spatiale à l'échelle

d'une cellule peut sembler limitante. Néanmoins, pour des besoins d'absorption du trafic radio, les nouvelles générations de réseaux mobiles tendent à découper le « territoire mobile » en des cellules de plus en plus réduites en termes de couverture. La contrainte juridique n'est pas un frein dans cette thèse qui porte sur la quantification de facteurs explicatifs des phénomènes impactant le fonctionnement des réseaux, c'est-à-dire ceux pratiqués par une densité élevée de passagers. L'approche individuelle est nécessaire, mais tout résultat *in fine* sur un individu particulier n'est pas l'aboutissement souhaité. Nous ne cherchons pas à étudier les comportements individuels, mais plutôt la distribution des comportements de segments de population. La finesse de la source utilisée permet une telle segmentation. Elle ne porte pas sur la taille du segment, mais sur ses paramètres (temporel, spatial, motif).

Enfin, ce chapitre a permis d'introduire les concepts, vocabulaire et notations qui serviront dans la suite du document. Notamment, dans le chapitre suivant, nous détaillerons les méthodes que nous avons développées pour construire différents indicateurs de qualité de service du point de vue de l'usager du système de transport en commun ferré d'Ile- de-France, et plus particulièrement de la ligne A du RER.

Chapitre 5 : La signalisation des téléphones mobiles: Une source adaptée à la mesure des déplacements ?

Introduction

Ce chapitre présente une première qualification du système de mesures de déplacements à partir des remontées de signalisation des réseaux radio-mobiles. En effet, nous cherchons à reproduire des mesures de déplacements et d'indicateurs qui sont estimables à partir d'autres sources de données et nous les confrontons pour faire ressortir les avantages et limites. Comme exemple d'application, nous avons choisi d'étudier un système de transport en commun ferré : la ligne A du RER dont la section centrale dessert Paris intra-muros. Ce choix est motivé par deux aspects. D'une part, nous voulions réduire la complexité des mécanismes d'exploration de la signalisation. Le « territoire mobile » autour du tronçon central a été construit de manière particulière et assure des déclenchements d'évènements des mobiles pour tout déplacement d'une section souterraine vers une section aérienne et inversement. De plus, la superposition des « territoire mobile » et « territoire géographique » est quasi-directe dans ce cas. D'autre part, La partie 1 nous a montré les difficultés actuelles de l'exploitation des réseaux et les besoins d'une connaissance fine temporellement et spatialement des dynamiques de comportements des usagers qui nous amène à s'intéresser à des mesures de déplacements à partir de sources digitales. Des travaux ont déjà montré que l'emploi de données de type AFC (Automated Fare Collection) permet de mesurer des déplacements et des indicateurs pour des réseaux de transports en commun. Est-ce que la source que nous proposons est également adaptée à cet exercice ?

Nous avons construit ce chapitre de la manière suivante. Nous commencerons par la description dans une première section de la démarche expérimentale que nous avons suivie, puis nous décrirons les données additionnelles dont nous avons disposées pour la

qualification des résultats produits et nous ferons une analyse de la source radio-mobile pour en faire ressortir les mécanismes de fonctionnement dans le cas particulier de ce périmètre d'étude. Cela nous a permis aussi de repérer quelques comportements qui seront plus délicats à interpréter. La deuxième section est consacrée à la construction d'indicateurs de qualité de service de la ligne selon une perception de l'usager qui seront utiles pour les acteurs de l'offre. On construira notamment un indicateur de densité de voyageurs par rames, un indicateur de fiabilité sous la forme de densité des retards sur la ligne, et une mesure des volumes de voyageurs par paire de stations. Ce dernier indicateur est également construit à partir des données billettiques pour alimenter le processus de qualification.

1 Protocole exploratoire

Le protocole exploratoire est présenté ici en trois étapes. Tout d'abord, nous présentons la démarche expérimentale conçue et suivie par l'auteure. Puis, nous proposons une description du périmètre d'étude dans son aspect transport et son aspect télécom grâce à une étude menée sur le terrain. Enfin, nous pourrons décrire les différentes sources de données exploitées dans cette étude.

1.1 **Démarche expérimentale**

L'objectif de mon travail de thèse est de développer des méthodes de traitement des messages de signalisation collectés sur le réseau de téléphonie mobile d'Orange dans le but de mesurer des déplacements sur les réseaux de transport. Ainsi, ce paragraphe décrit les différentes étapes de la démarche expérimentale que j'ai mise en place, pour proposer les résultats présentés dans ce chapitre. Cette démarche se décompose en trois étapes principales :

- le choix du périmètre d'étude et la compréhension de son fonctionnement d'un point de vue télécoms et d'un point de vue transport,
- la production de premiers indicateurs adaptés aux besoins d'analyse du système de transport et la qualification des méthodes de traitement de la signalisation
- la production d'indicateurs supplémentaires à partir de la mise en place d'une nouvelle campagne de collecte de messages de signalisation. Les méthodes de traitement et le périmètre de collecte ont pu être perfectionnés par la connaissance acquise lors de la production des premiers indicateurs et par la collecte de données de comparaison qui permettent de qualifier nos méthodes.

Le choix du périmètre d'étude repose sur des contraintes relatives à la maitrise des mécanismes de signalisation, aux besoins des acteurs des transports et à la superposition des observations réalisées sur le « territoire mobile » sur le « territoire géographique ». Tout d'abord, le paragraphe 2.1 du chapitre 4 montre la sophistication de l'architecture des réseaux de télécommunications et des mécanismes de signalisation ainsi que les échelles spatiales et temporelles de déclenchement des évènements. J'ai choisi de réduire artificiellement la

complexité du fonctionnement des mécanismes de signalisation en cherchant des espaces du « territoire géographique » couverts par une seule couche technologique et pour lesquels les procédures de signalisation se superposaient à des comportements de mobilité. En transport, ces derniers peuvent être mesurés à partir d'enquête cordons (cf. Chapitre 4 §2.1.1.4). Or, les cellules frontières d'une zone de localisation s'apparentent à un cordon de cette zone. Il fallait chercher un périmètre dont le réseau de télécommunications offrait « un cordon de cellules ». Toutefois, l'architecture du « territoire mobile » n'était pas la seule contrainte fixée. En effet, les besoins des acteurs des transports ont été présentés dans la partie 1. Dans le cadre de la favorisation des transports en commun en ville pour fluidifier la circulation automobile et réduire les impacts environnementaux, l'attractivité de ce mode de transport est un effort à mener en milieu urbain. Je me suis alors intéressée aux indicateurs de qualité de service des systèmes de transport publics du point de vue de l'usager. La dernière étape du choix de périmètre a donc été de trouver un réseau de transport public d'une grande agglomération française dont la couverture par le réseau de téléphonie mobile répondait aux contraintes énoncées. En effet, une des difficultés principales induite par cette méthode de capture, provient des difficultés de projection du « territoire mobile » sur le territoire géographique. Afin de limiter les complications relatives aux projections, une portion du « territoire mobile » dont le découpage cellulaire réduisait les ambiguïtés de superposition des deux territoires a été choisie. Un tel découpage existe sur l'ensemble des sections souterraines du système de transport en commun ferré d'Ile de France. En effet, ce système de transport est couvert par des cellules regroupées en une seule zone de localisation dédiée aux parties souterraines. Les cellules qui couvrent les parties aériennes du système de transport sont regroupées dans des zones de localisation distinctes. Ainsi, un évènement sera déclenché à l'entrée et à la sortie de la portion souterraine. Pour la majorité des stations souterraines, un site est affecté à la couverture des plateformes et des tunnels adjacents pour chacune des lignes. Ceci se vérifie particulièrement pour les stations du tronçon central de la ligne A du RER. Alors, les terminaux mobiles générant un événement au niveau des cellules couvrant les stations souterraines, ont une probabilité élevée d'être localisés au niveau de plateformes ou dans les tunnels en étant à bord du train. De plus, au commencement de l'étude, en 2011, les sections souterraines ne proposaient qu'une couverture GSM, bornant ainsi la collecte des événements aux sondes 2G pour l'étude en souterrain. Enfin, les comportements de déplacements au niveau du système de transport ne sont pas équivoques sur ce système de transport. Effectivement, les personnes présentes dans les tunnels du système de transport sont pour une large majorité en train d'utiliser ce réseau.

Le 7 avril 2011, j'ai parcouru ce tronçon avec un équipement de mesure de champ reçu par un mobile – appelé mobile à trace – pour constituer des mesures de l'environnement radioélectriques de déclenchement des évènements et constituer une échantillon du comportement d'un mobile à bord d'un train. Le même jour, une première collecte sur le périmètre des cellules couvrant les stations du RERA de Vincennes à La Défense, a été menée. Ce premier jeu de données de signalisation contenait l'activité de signalisation uniquement au niveau de la zone de localisation souterraine. Cette restriction a permis de limiter le volume d'acquisition et donc de simplifier l'exploration du jeu de données. Le

choix du jour d'acquisition s'est porté sur un jour ouvré moyen afin d'observer les migrations pendulaires classiquement étudiées dans les analyses des déplacements. Une enquête terrain s'est également déroulée le même jour et s'est focalisée sur l'activité du territoire géographique. Elle a été réalisée par des observateurs positionnés au niveau des quais des stations et a permis la constitution d'un jeu d'observations centrées sur les passages de train. La confrontation des différentes bases de données a permis de guider et de qualifier les méthodes d'observation des déplacements. Des premiers indicateurs de qualité de service comme le taux de charge des trains ou encore la fiabilité ont pu être produits. Cette première étude a montré le potentiel d'une telle source de données et a guidé la définition d'une nouvelle campagne de mesure sur un « périmètre mobile » contenant également les cellules couvrant les parties aériennes des stations afin d'observer les entrées et les sorties de la portion du système de transport considéré.

Cette deuxième collecte s'est déroulée le jeudi 13 octobre 2011. Les 7 mois qui séparent les deux enquêtes sont imputables aux délais de dépouillement des résultats et de définition des nouveaux paramètres de la collecte, mais surtout au retour d'un jour ouvré moyen, c'est-à-dire éloigné des périodes estivales. J'avais fixé deux objectifs. D'une part, compléter les méthodes de collectes et de traitement et d'autre part qualifier ces méthodologies de mesures de déplacements en comparant les volumes estimés à partir de la signalisation avec des quantités estimées à partir d'une autre source utilisée pour la mesure des déplacements. Une revue de la bibliographie concernant la mesure des déplacements dans les systèmes de transport en commun a montré que les données billettiques sont adaptées à la mesure de flux de déplacements (BERTINI, et al., 2003). Ainsi, nous avons coordonné une nouvelle journée d'acquisition avec le STIF afin de constituer des jeux de données comparables.

1.2 Description de la zone d'étude

Le choix de la zone d'étude a été orienté par le découpage particulier du « territoire mobile » et des comportements non équivoques des déplacements sur le mode de transport. Ce paragraphe vise à présenter de manière plus détaillée, le système de transport en commun ferré d'Ile-de-France sous deux angles, celui des conditions d'opération transport et celui des conditions d'opération télécoms.

1.2.1 Aspect transport de la zone d'étude

Le réseau de transport en commun d'Ile-de-France est composé de sous-systèmes interconnectés : le réseau bus, le réseau de tramway et le réseau ferré regroupant le réseau de chemin de fer métropolitain (métro) et le Réseau Express Régional (RER). Nous nous limiterons à l'étude de ces deux derniers modes dédiés au transport urbain et péri-urbain.

Premièrement, le Métro de Paris dessert principalement Paris et son agglomération. Il est composé de 16 lignes en site propre, pour la plupart souterraines, de 302 stations et s'étend sur plus de 200km de voies. Il est exploité par la RATP. En 2011, 4,13 millions de voyageurs étaient transportés par jour grâce au métro (1.5 milliard par an) (STIF, 2011). Le

réseau métropolitain de Paris a été conçu pour assurer une desserte fine de Paris intra-muros grâce à un quadrillage serré. Les stations dans Paris sont très rapprochées (548 m en moyenne avec une variation selon les lignes – plus d'1km pour la ligne 14). Le service est assuré de 5h30 environ à 1h15 le lendemain matin. Le service est prolongé jusqu'à 2h15 les fins de semaine et certaines veilles de fêtes. La fréquence moyenne est d'une rame toutes les 2 minutes aux heures de pointe et de 4 minutes aux heures creuses. Ces 10 dernières années, le Métro a connu des évolutions relatives à des augmentations du trafic à écouler et aux mutations des comportements des voyageurs. On constate notamment, une augmentation des voyages en fins de semaine, une forte concentration de l'heure de pointe du matin entre 8h30 et 9h00 et un rallongement de la pointe du soir jusqu'à 20h30. Ceci a engendré, entre autre, une dégradation des conditions de transport lors des périodes de pointe. Enfin, le métro ne dessert les proches banlieues que par des prolongements de lignes. De ce fait, un trajet d'une commune de proche banlieue à une autre impose un itinétaire via Paris intra-muros. En raison de la faible vitesse commerciale et de capacité des rames réduites, ce mode ne permet pas la desserte de la grande couronne de Paris.

Le Réseau Express Régional (RER) a été développé pour répondre au besoin de meilleure desserte des banlieues. En 2006, le RER accueillait 2,8 millions de voyageurs par jour dont 35% sur la ligne A et 57% sur les lignes A et B (RAIL PASSION, novembre 2006). Il s'agit d'un moyen de transport ferré hybride qui a permis l'intégration de lignes de banlieue préexistantes à un réseau souterrain à grand gabarit ferroviaire traversant le centre-ville. De multiples connexions avec le Métro sont possibles. Le RER est constitué de cinq lignes et comporte 257 points d'arrêt, dont 33 à Paris, pour 587 km de voies, dont 76,5 km en souterrain. Les sections souterraines sont situées principalement dans Paris intra-muros. Il est co-opéré par la RATP et la SNCF. En heure creuse, la fréquence des rames est de l'ordre de la dizaine de minutes autour de Paris et de l'ordre de la vingtaine de minutes pour les stations éloignées de plus de 40km de Paris. Les fréquences sont généralement doublées aux heures de pointe. La fréquence cible en heure de pointe pour les stations de Paris intra-muros est inférieure à 5 minutes.

Nous nous sommes restreints à l'étude de deux lignes de ce réseau de transport : la ligne A du RER et la ligne 1 du Métro car cette dernière offre un itinéraire alternatif à la ligne A du RER pour la traversée est-ouest de Paris intra-muros. Le choix a été motivé d'une part par le découpage du « territoire mobile » de la ligne A et d'autre part par les conditions difficiles d'opération de la ligne A du RER. En effet, l'importance du trafic est-ouest entraine des phénomènes de congestion récurrents. Une explication possible d'un tel trafic est le déséquilibre régional entre des emplois majoritairement situés à l'ouest (exemple du quartier de la Défense) et les zones résidentielles en expansion à l'est. Dans la suite du paragraphe, nous présenterons quelques caractéristiques des conditions d'opération de ces deux lignes.

La ligne A du RER

L'agglomération parisienne est traversée d'Est en Ouest par la ligne A du RER (RERA) et du Nord au Sud par la ligne B (RERB). La ligne A est de loin la plus chargée du

réseau (voir Figure 30). En effet, on comptabilise 1.14 millions de voyageurs par jour ouvrable, soit près de 310 millions de voyageurs au total en 2011. Ce nombre conséquent de voyageurs amène régulièrement la ligne dans une situation proche de la saturation (STIF, 9 février 2011). Ainsi, la ligne A fait partie des lignes les plus denses d'Europe et du monde. En deuxième position, la ligne B transportait 900 000 voyageurs par jour ouvrable en 2009 (STIF, 3 novembre 2009). On peut comparer le trafic de la ligne B à celui des lignes de métro les plus chargées (STIF, 2005). Depuis les années 2000, la saturation récurrente de ces deux lignes principales entraine une forte dégradation de leur fonctionnement. En effet, l'indice de régularité pour ces deux lignes est passé de 90.1% en 2007 à 88.4% en 2008[13] . Cet indice de régularité se définie pour le RER comme le pourcentage de voyageurs n'ayant pas subi de retard sur l'ensemble de la journée ou ayant subi un retad inférieur à 5 minutes sur le nombre total de voyageurs. En 2008, parmi les 10 des stations RER les plus fréquentées, 7 sont des stations du RERA et 3 du RERB[14] . La station de Châtelet–les Halles est comptée à la fois pour la ligne A et pour la ligne B car elle permet leur interconnection.

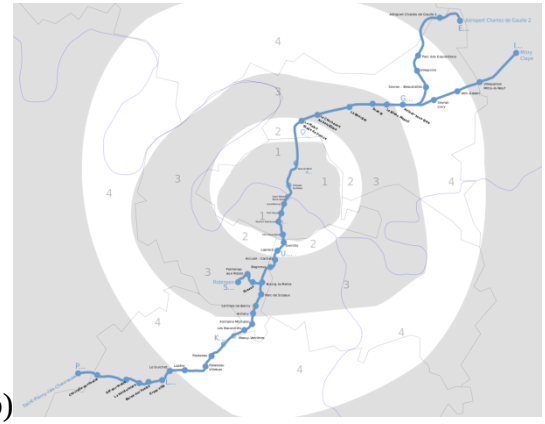
a) b) 

Figure 30: Tracé des lignes A (a) et B (b) du RER (auteur Benoir Mortagt)

Aux extémités de la section centrale qui traverse Paris, une division en branches permet la desserte de Saint-Germain-en-Laye (A1), Poissy (A5) et Cergy (A3) à l'Est et celle de Boissy-Saint-Léger (A2) et Marne-la-Vallée-Chessy (A4) à l'Ouest. Elle dessert ainsi 41 communes de 5h00 à 1h20 le jour suivant. La ligne A dispose de 46 points d'arrêts -35 opérés par la RATP et 11 par la SNCF-, sur 109 km total de voies dont 26 km en souterrain. Ces sections sont situées majoritairement au niveau du tronçon central. La section du tronçon centrale entre Châtelet-les Halles et Auber est la plus chargée avec près de 50 000 voyageurs par heure et par sens pendant les heures de pointe. La fréquence des trains visée par l'opérateur est d'un train toutes les 2 minutes dans un sens, c'est-à-dire 30 trains par heure (STIF, 31 janvier 2008). Par la suite, nous appelerons tronçon central du RERA les stations

[13] www.paris.fr, les transports en commun, 2008

[14] www.paris.fr, les transports en commun, 2008

de la ligne comprises entre Vincennes et La Défense, ces dernières étant incluses. Toutes ces stations et les sections inter-stations sont souterraines à l'exception des sections qui entourent Vincennes. La liste de ces stations est énoncée pour un sens de parcours de la ligne Est-Ouest :

- Vincennes
- Nation, connectée au réseau métropolitain par les lignes 1, 2, 6, et 9
- Gare de Lyon, connectée au réseau métropolitain par les lignes 1 et 14
- Châtelet-les-Halles, connectée au réseau métropolitain par les lignes 1, 4, 7, 11 et 14
- Auber, connectée au réseau métropolitain par les lignes, 3, 7, 8 et 9
- Charles-de-Gaulle-Etoile, connectée au réseau métropolitain par les lignes 1, 2 et 6
- La Défense, connectée au réseau métropolitain par la ligne 1

La ligne A est pratiquée pour différents motifs de déplacements. En effet, elle est empruntée dans le cadre des migrations pendulaires en reliant les banlieues résidentielles à Paris, et notamment au quartier de la Défense. Mais elle dessert également le parc Disneyland Paris et divers complexes commerciaux comme « Val d'Europe » ou les « 4 temps ». Ainsi, depuis 2002, les trains du week-end sont systématiquement prolongés à *Marne-la-Vallée-Chessy* pour faire face à l'important trafic que draine le nouveau quartier du *Val d'Europe* (METROPOLE, 29 août 2002). La Figure 31 illustre l'évolution du nombre moyen de voyages effectués en RER un jour ouvrable (bleu) et du nombre moyen de voyages effectués en RER le samedi et le dimanche cumulé (rouge)[15]. On remarque une augmentation significative du nombre de voyages de fin de semaine. Cette tendance a fortement réduit l'écart entre les volumes des jours ouvrés et du cumul des volumes du week-end.

[15] www.paris.fr, les transports en commun, 2008

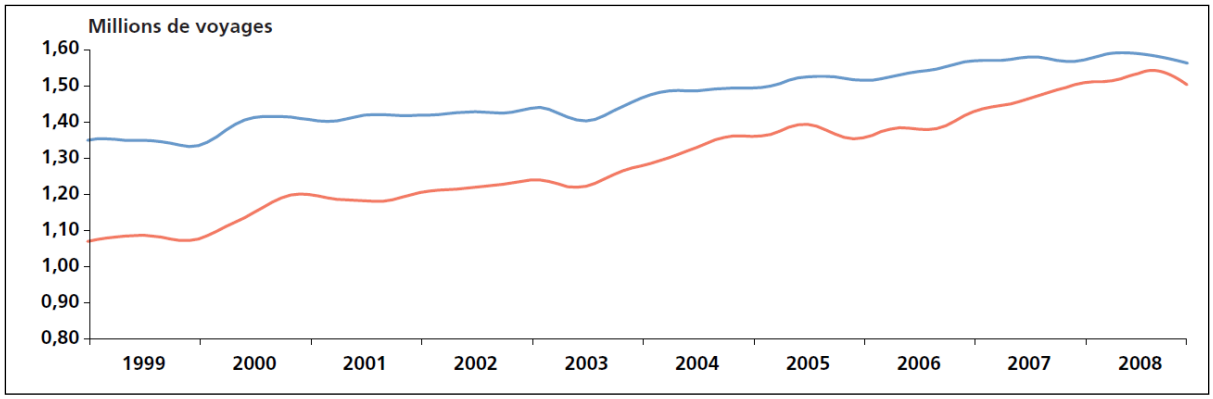


Figure 31: évolutions du nombre de voyages effectués un jour ouvrable en bleu et en fin de semaine en rouge (les volumes de trafic du samedi et du dimanche sont cumulés) de 1999 à 2008 d'après un recensement RATP.[16]

Ligne 1 du Métro : une alternative pour la desserte Est-Ouest de Paris

Notre choix s'est porté sur la ligne 1 car elle traverse Paris d'Est en Ouest en longeant la ligne A du RER. D'ailleurs ces deux lignes partagent 5 stations (Nation, Gare de Lyon, Châtelet-les Halles, Charles-de-Gaulle-Etoile et la Défense). Ainsi la question de la compétition d'itinéraire est posée (STIF, 8 février 2012). Cette idée est renforcée par des propositions de prolongement de la ligne 1 vers Val de Fontenay à l'Est et vers Nanterre à l'Ouest (METROPOLE) (STIF). La ligne 1 du réseau métropolitain fait partie des lignes les plus chargées avec 4 de ses stations appartenant aux 10 stations de Métro les plus fréquentées en 2008[17]. En 2012, le trafic quotidien atteint une moyenne de 715 000 voyageurs par jour ouvré.

Elle comprend 25 stations sur une longueur de voies de 16km. Il faut environ 36 minutes pour parcourir la ligne en entier. La fréquence des rames varie de 4 à 8 minutes selon le moment de la journée. En heure de pointe, une rame d'une capacité de 720 voyageurs, dont 242 assis, passe toutes les 1 min 45. Néanmoins, la ligne reste particulièrement chargée aux heures de pointe.

1.2.2 Aspect télécom de la zone d'étude

1.2.2.1 Un découpage particulier du « territoire mobile »

Les parties souterraines du réseau de transport en commun ferré sont couvertes par un « territoire mobile » particulier. Ces particularités sont à l'origine du choix de ce premier périmètre d'étude. En effet, chaque station est équipée de sites dont le groupe de cellules couvrent les quais et les tunnels adjacents des lignes à l'étude. La proportion des portions de

[16] www.paris.fr

[17] www.paris.fr, les transports en commun, 2008

tunnels couvertes, dépend de la distance inter-station, du rayon de courbure du tunnel, de la présence ou non de répéteurs dans le tunnel, de l'emplacement des sites et de la puissance d'émission de l'antenne. Les stations offrant de multiples connections avec le réseau RER et/ou le réseau métropolitain, sont construites sur plusieurs étages afin de séparer chaque ligne. Dès lors, pour des raisons de forte atténuation du signal radio par les étages, chaque étage est équipé de sites. Ainsi, selon les stations, un groupe de cellules est dédié à une ligne spécifique de la station. L'association groupe de cellules/lignes est unique pour chaque station du tronçon central du RERA, à l'exception de La Défense. De plus, toutes ces cellules dédiées aux stations souterraines font partie de la même zone de localisation que nous nommerons **LA_souterraine** par la suite. Ces conditions permettent l'observation des événements de mobilité en entrée et en sortie du réseau souterrain. La dernière particularité de ce « territoire mobile» est qu'il est, au moment de l'étude, composé d'une seule « couche technologique », la couche 2G.

Ce découpage particulier offre alors deux avantages principaux pour la mesure des déplacements. D'une part, il se produira un déclenchement systématique d'un évènement de mobilité de type **LAUN** à chaque transition extérieur/souterrain. Ceci permet notamment de mesurer les entrées et sorties au niveau du tronçon central mais aussi d'avoir des points de mesures intermédiaires lorsque le train change de type de section (souterraine/aérienne). D'autre part, la précision spatiale à la cellule de notre système de capture ne sera pas une limitation. En effet, un événement localisé au niveau d'une cellule de la **LA_souterraine** ne laisse que deux possibilités pour la position du mobile : il est soit à quai, soit dans un des tunnels adjacents. Par la suite, nous ne ferons pas la distinction et indiquerons seulement que le mobile était présent au niveau de la station S de la ligne L.

1.2.2.2 Nature des événements de signalisation

Les particularités de « territoire mobile 2G » dédié au système de transport souterrain d'Ile de France nous incitent à nous concentrer uniquement sur les événements de mobilité de type **LAUN**. Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons tout d'abord mesuré la distribution des types d'évènement sur l'ensemble des cellules souterraines qui couvrent la ligne RERA. En effet, sur l'ensemble des 2 millions d'évènements qui ont été capturés le 7 avril 2011, 77% étaient des LAUN, 8% des appels ou des SMS reçus (COM0), 6% des HO, 5% des SMS envoyés et 4% des évènements autres (ATT0, ATT1, LAUP). Afin de mieux comprendre les conditions de déclenchement de ces évènements, nous avons procédé à des mesures de champ reçu par un mobile à bord d'un train circulant sur la ligne A sur RER.

1.2.2.3 Conditions radioélectriques d'un train parcourant la ligne A

Protocole

Nous cherchons à mesurer le champ reçu par un mobile installé dans le train à différents emplacements (tête, milieu et queue de rame). Nous avons alors parcouru trois fois le tronçon central Vincennes- la Défense du RERA en heure creuses le jeudi 7 avril 2011.

Nous nous sommes munis du matériel suivant pour les mesures des signaux radioélectriques:

- Un mobile à traces synchronisé temporellement sur le réseau mobile. Il permet d'enregistrer le champ reçu à chaque instant par le mobile
- Une caméra dont l'horaire est synchronisée avec le mobile qui permet une capture de l'environnement et surtout d'identifier les portions souterraines et les quais.

Parallèlement, afin d'acquérir une meilleure compréhension des conditions de déclenchement des évènements de signalisation dans lesquelles se trouve un mobile voyageant à bord du RERA, nous avons comptabilisé les LAUN qui se sont produits au niveau de cellules souterraines par plage d'une seconde. Ces valeurs sont obtenues à partir du jeu de données collectées le 7 avril 2011 que nous avons mentionné dans le paragraphe 1.2.2.2. Nous allons observer la confrontation des mesures de champs reçus par un mobile à bord du train avec l'ensemble des évènements LAUN capturés par notre système de collecte qui ont été générés par des mobiles allumés et autorisés à se connecter au réseau opéré par Orange, et dont le mobile à traces fait partie.

Résultat

La position dans le train n'entraine pas de modifications significatives sur le champ reçu par le mobile ni sur le mécanisme de déclenchement des évènements.

La Figure 32 montre le niveau de champ enregistré par le mobile lors d'un trajet de Vincennes vers La Défense sur la ligne A. Nous observons la puissance du signal radio émise par les différentes antennes au long du trajet et mesurée par le mobile. Lorsque la rame circule, le mobile va changer de cellule selon un mécanisme basé sur la meilleure serveuse, c'est-à-dire l'antenne qui offre un niveau de champ reçu par le mobile le plus haut. Ce mécanisme de rattachement à la « meilleure cellule » se déclenche lorsque la cellule serveuse ne permet plus de garantir le service demandé. Les traits noirs séparent les parties souterraines des parties aériennes. Ainsi, en lisant la Figure 32 de gauche à droite, on a :

- l'évolution du champ émis par l'antenne qui couvre la station Vincennes et ses tunnels en rose
- l'évolution du champ émis par les 2 antennes qui couvrent la station Nation et ses tunnels en violet
- l'évolution du champ émis par les 2 antennes qui couvrent la station Gare de Lyon et ses tunnels en vert

- l'évolution du champ émis par les 4 antennes qui couvrent la station Châtelet-les-Halles et ses tunnels en bleu.
- l'évolution du champ émis par les 2 antennes qui couvrent la station Auber et ses tunnels en orange

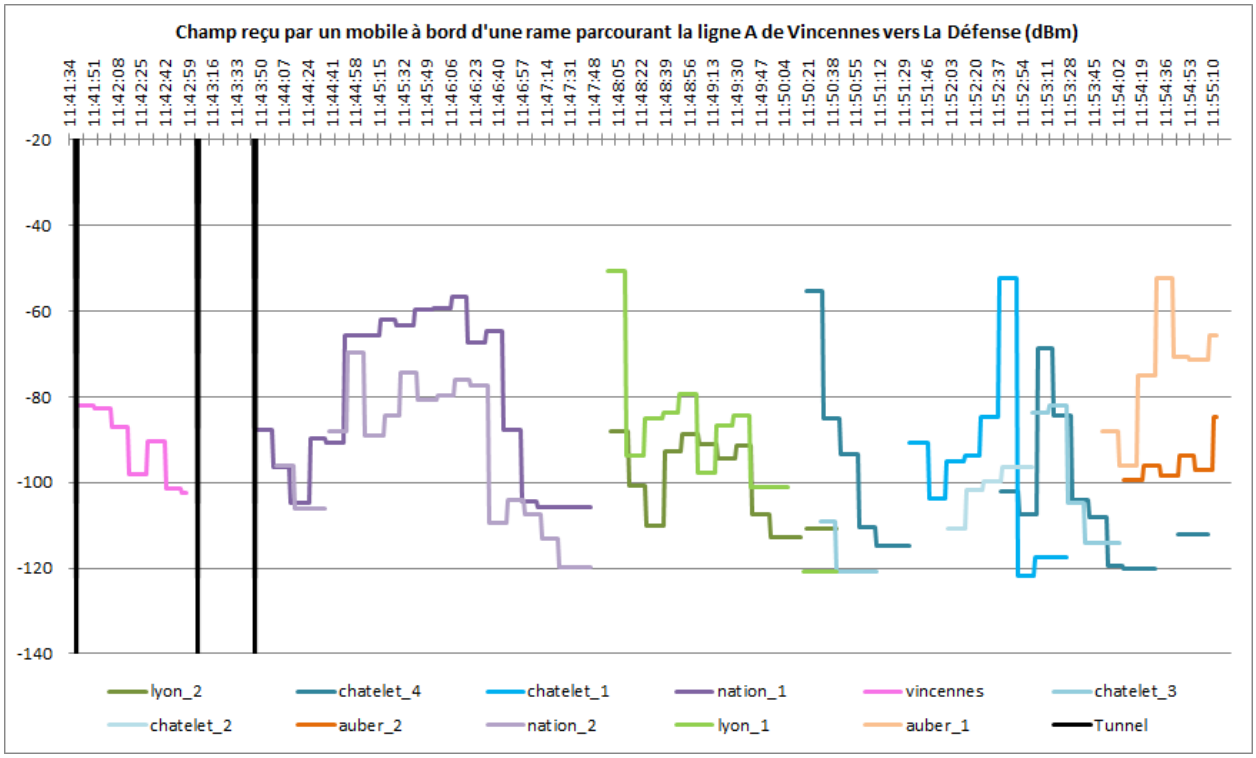


Figure 32 : champ reçu par un mobile présent à bord d'une rame de RER parcourant la ligne A de Vincennes vers Auber en heure creuse

Il semble, dans le cas de la station de Châtelet-les-Halles que les antennes fonctionnent par paires. En effet, une paire couvre le quai et une autre paire les tunnels. On considère qu'un mobile reçoit un niveau de champ suffisant d'une antenne pour se connecter à sa cellule si le niveau de champ est supérieur à -110dBm. On constate alors une discontinuité dans le niveau de champ minimum reçu par le mobile. Quelles en sont les conséquences au niveau des évènements ? Nous précisons que la discontinuité entre la deuxième et la troisième ligne verticale noire n'est qu'une discontinuité de couverture par des cellules souterraines. En effet, cette section est aérienne. Pour faciliter la lecture, nous avons choisi de ne pas représenter les champs reçus par les antennes aériennes.

Nous confrontons ici les distributions de LAUN autour des passages des trains au niveau de deux stations de configuration différente en terme de nature des sections voisines :Vincennes et Châtelet. La Figure 33 montre la distribution des LAUN autour du passage d'un train à Vincennes qui est une station souterraine entourée de portions de voies aériennes. La Figure 34 montre la distribution des LAUN autour du passage d'un train à

Châtelet qui est une station souterraine entourée de portions de voies souteraines et dont les stations voisines sont également entouréees de voies souterraines.

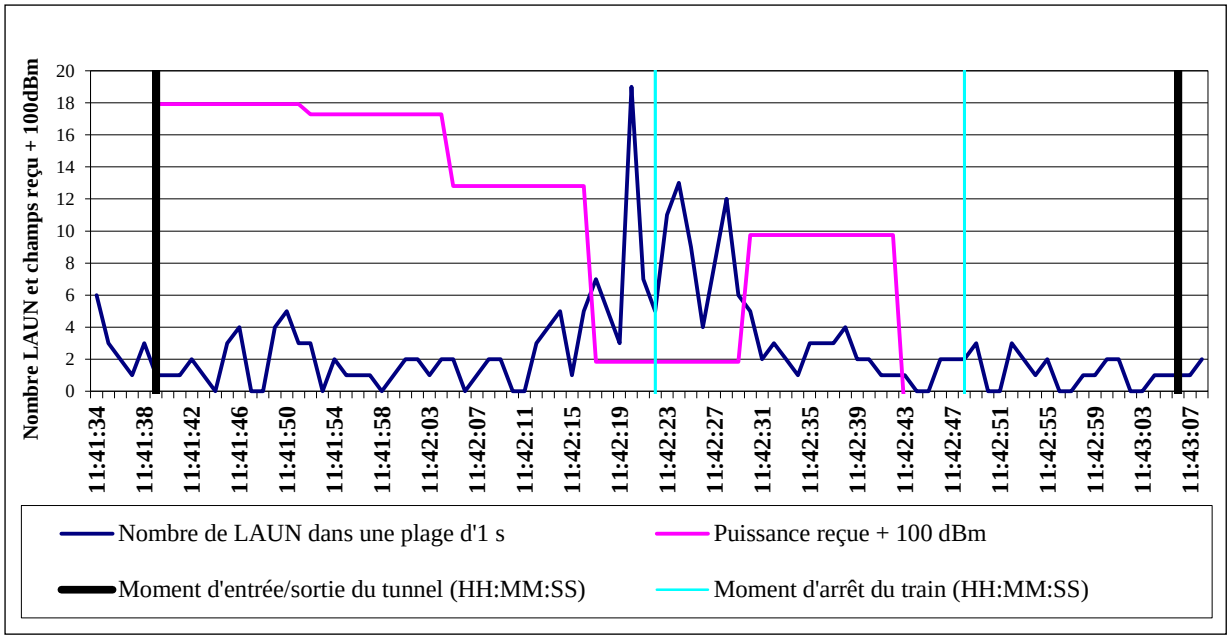


Figure 33 : Corrélation entre le champ reçu par un mobile et le déclenchement d'évènements LAUN par l'ensemble des mobiles connectés au niveau de la cellule qui couvre la station Vincennes (dBm +100)

Dans le cas de Vincennes, la plage de temps d'observation s'étend de 11h41 à 11h44. Les portes sont restées ouvertes pendant 26s. Sur une plage de temps de 60s autour de l'ouverture des portes, il s'est produit un total de 190 LAUN.

Dans le cas de Châtelet, la plage de temps d'observation s'étend de 11h50 à 11h55. Les portes sont restées ouvertes pendant 29s. Sur une plage de temps de 60s autour de l'ouverture des portes, il s'est produit un total de 160 LAUN.

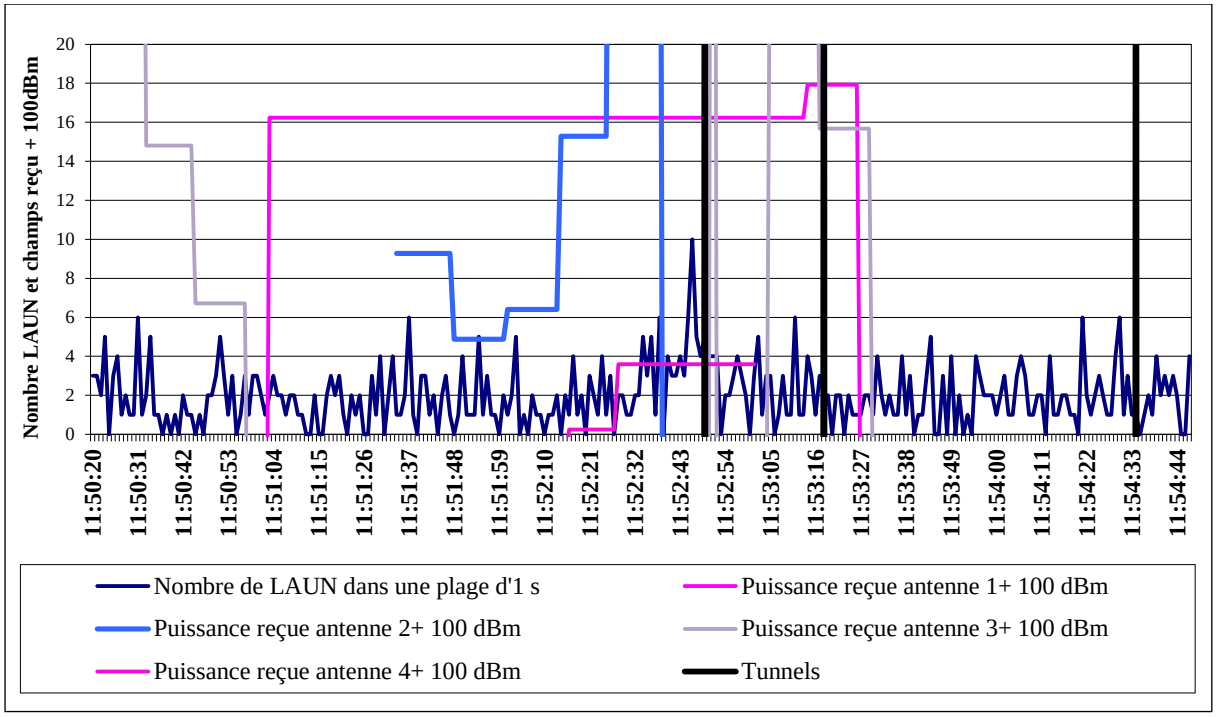


Figure 34 : Corrélation entre le champ reçu par un mobile et le déclenchement d'évènements LAUN par l'ensemble des mobiles connectés au niveau des cellules qui couvrent la station Châtelet (dBm +100)

Pour ces deux stations, on observe une distribution des LAUN qui se décompose en un « bruit de LAUN » et en un pic de LAUN autour de l'ouverture des portes du train. Le "bruit de LAUN" continu que l'on observe en dehors de l'arrivée du train en station est commun aux deux stations. Il correspond aux personnes entrant dans la station en mode piéton, que ce soit pour débuter un trajet ou pour effectuer une correspondance. Il est caractérisé par un étalement homogène et semble indépendant du passage des trains. Ceci est cohérent avec les résultats de l'étude menée par le STIF qui a montré qu'à partir d'une offre d'un train toutes les 8 minutes, plus de 50 % des voyageurs arrivent à la gare sans référence à l'horaire des trains (ROQUIGNY, 2013). En théorie, le pic de LAUN que l'on observe devrait correspondre à un important volume, par rapport au "bruit ambiant" de mobiles qui déclenchent un évènement dans une plage de temps resserré. Il est donc censé se produire de manière synchrone avec le passage des trains. C'est ce que l'on observe au niveau des deux stations autour de l'ouverture des portes. Ce résultat était attendu pour Vincennes en raison de sa configuration de station souterraine entourée de sections aériennes. En effet, tous les mobiles à bord du train vont signaler ce changement de zone de localisation par un LAUN dans une certaine plage de temps. Cette explication ne s'applique pas à Châtelet car il n'y a pas de changement de zone de localisation pour un mobile qui entre ou sort de cette station à bord d'un train. Cela montre qu'il existe un phénomène de déclenchement d'évènements supplémentaires par rapport aux attentes théoriques. Ce dernier peut s'expliquer par des besoins de renvoi de localisation des mobiles au réseau en raison des conditions de

couverture en souterrain. Enfin, l'ordre de grandeur semblable entre les pics de LAUN au niveau des deux stations tient de la fréquentation plus importante de la station Châtelet sur une plage horaire 11h-12h et non d'un déclenchement de l'ensemble des mobiles d'un évènement de localisation.

Conclusion

Ces premières mesures nous ont montré la faisabilité de capturer différents aspects de la mobilité des usagers des transports communs ferrés au niveau des zones RATP 1 et 2, c'est-à-dire Paris et proche banlieue. En effet, des évènements de mobilité sont déclenchés dans certaines situations particulières :

- L'entrée/sortie dans le système de transport au niveau des gares souterraines
- La circulation d'un train avec variation de type de sections (extérieur/souterrain)
- La circulation d'un train sans variation de type de sections.

Le premier comportement est illustré sur les figures précédentes au travers du "bruit" récurrent de LAUN. Les deux autres comportements s'observent au travers des pics de LAUN au moment des arrêts en station et d'ouverture des portes. Comment distinguer ces comportements du flux d'évènement capturé ? Pour cela, il faut prendre en considération quelques limitations du système de capture. En effet, la Figure 32, montre des zones sans couverture radio dans les tunnels. Ainsi, certains évènements peuvent être retardés, après rejet ou non, voire être déclenchés sans changement de zone de localisation mais après une perte trop longue de connexion au réseau impliquant une mise à jour de zone de localisation. En effet, le réseau informe le mobile de sa localisation dans le « territoire mobile » (numéro de zone de localisation) et ce dernier communique régulièrement sa dernière position enregistrée. Ainsi, si le réseau n'a pu « atteindre » le mobile pour lui communiquer la zone de localisation à enregistrer, celui-ci par défaut sauvegarde un numéro de zone de localisation invalide. Lorsque la connexion sera disponible à nouveau, le mobile cherchera à remettre sa zone de localisation à jour en demandant au réseau une mise à jour de zone de localisation. Ces mécanismes de retard d'évènements ou de création d'évènements supplémentaires ne concernent pas tous les mobiles. En effet, cela dépend des caractéristiques techniques du terminal mobile, notamment de la sensibilité au champ reçu, de l'environnement radio et du temps d'exposition à cet environnement. Typiquement, un train arrêté ou ralenti entre deux stations, dans une zone où la couverture des cellules de la station amont et de la station aval est faible aura une probabilité plus forte de générer des évènements de mise à jour de zone de localisation. Ce cas de figure apparait également lors d'une connexion entre deux lignes du réseau de transport en commun au niveau d'une station. En effet, tous les tunnels piétons ne sont pas couverts avec la même puissance de signal, et l'on recrée ainsi la conjoncture des sections de tunnel. Le nombre important d'événements collectés en chaque station offre un avantage statistique dans la mesure des déplacements si l'on est capable d'isoler les conditions qui les ont déclenchés.

1.3 Description des sources de données exploitées

Ce paragraphe permet de présenter les données que nous avons utilisées pour qualifier nos méthodes de mesures de déplacements à partir des messages de signalisation. Ces descriptions servent également à introduire les notations pour la suite du chapitre. Nous débuterons par décrire les sources complémentaires car elles sont nécessaires pour développer une première analyse de la source radio-mobile.

1.3.1 Jeux de données complémentaires

Nous présentons dans ce paragraphe, les jeux de données annexes constitués pour valider les résultats produits à l'aide de notre système de capture.

1.3.1.1 Observation à quai

Le 7 avril 2011, pendant l'heure de pointe du matin, de 7h15 à 9h03, 6 observateurs se sont tenus au centre des plateformes des stations Vincennes à Charles de Gaulle-Etoile de la ligne A. Ainsi, pour tous les trains circulant dans le sens Est vers Ouest, ils ont relevé le type de train, une estimation qualitative du taux d'occupation de la voiture en face d'eux à l'instant de l'arrêt du train, l'instant d'arrêt total du train, les instants d'ouverture/fermeture des portes et l'instant de départ du train. Le type de train est une donnée importante pour estimer le taux d'occupation. En effet, trois type de train sont opérés sur la ligne A faisant varier la capacité totale d'une rame entre 1760, 1900 et 2580 voyageurs pour une densité de voyageurs nominale de 4 personnes/m^2. Les capacités de places assises respectives sont de 432, 600 et 1056. L'échelle qualitative du taux d'occupation de la voiture est la suivante :

- **Faible (*low*):** places assises disponibles, aucun voyageur n'est debout
- **Moyenne (*medium*) :** toutes les places assises sont occupées et quelques voyageurs sont debout
- **Elevée (*high*) :** beaucoup de voyageurs sont debout
- **Très élevée (*very high*)** : les voyageurs debout sont pressés contre les portes.

1.3.1.2 Données billettiques

1.3.1.2.1 Présentation du jeu de données

Le jeu de données billettiques, fourni par le STIF, est composé de toutes les validations des cartes à puces d'abonnement au niveau de barrières de péage permettant l'accès à la ligne 1 du métro et au niveau des valideurs permettant l'accès et la sortie de la ligne A du RER, dans sa totalité, le jeudi 13 octobre 2011. Le STIF considère qu'en heure de pointe un jour ouvré moyen, 90% des voyageurs possèdent une carte d'abonnement (« pass Navigo »). Les conditions de déclenchement d'un événement billettique alimentant le jeu de données sont le passage de la carte devant une barrière de péage. Les règles de validation sont différentes pour l'utilisation du Métro et du RER. Dans le cas du RER, une validation est

requise à l'entrée, à la sortie et lors d'une connexion Métro vers RER. Dans le cas du Métro, une validation est requise seulement à l'entrée. Aucune validation n'est nécessaire dans le cas d'une connexion RER vers RER. A chaque validation, une ligne est ajoutée à la base de données billettiques. Elle contient un identifiant unique de carte d'abonnement ***id***, le code de la station ***cs*** et le moment de validation ***h*** (en seconde écoulées depuis minuit). Le code station est composé d'un identifiant de ligne, permettant de distinguer RER et Métro et d'un identifiant de station.

1.3.1.2.2 Sources d'erreurs du système de capture

Le système de mesure des déplacements est sujet également à la production d'erreurs d'interprétation des déplacements. On considère trois principales sources d'erreur : une source statistique, une source relative aux équipements d'accès et de sortie et une source relative au fonctionnement du système de transport. Premièrement, la représentativité des abonnés Navigo parmi les usagers du réseau de transport en commun ferré varie dans la journée et selon la paire Origine/Destination considérée. Néanmoins, l'approximation d'un taux de 90% d'usagers munis de « pass Navigo » en heure de pointe sur des paires Origine-Destination domicile – travail n'est pas irréaliste. Deuxièmement, le déclenchement d'un évènement billettique se produit lorsqu'une carte d'abonnement est présentée devant une des bornes de validation. L'horloge des bornes n'est pas synchronisée sur l'ensemble du réseau, voire même au niveau d'une station. Ces différences d'horloge entrainent une erreur à compenser lors de la production de temps de parcours. De plus, chaque borne contient l'information de station et de ligne. Les stations dont l'offre de transport est composée de plusieurs lignes sont équipées de plusieurs barrières contenant l'information de ligne. En pratique, les bornes qui forment les barrières produiront une information de ligne relative à celle qui est la plus proche en distance. Or, il est possible pour un usager d'entrer par une borne proche d'une ligne qui n'est pas celle qu'il va utiliser. Cette erreur quant à la station d'origine est quantifiée par l'observation de paires Origine/Destination. Cela permet la distinction entre Métro et RER et entre les lignes de RER. En effet, selon les informations de station d'origine et de station de destination, l'usager est affecté à la ligne la plus probable. En pratique, plus les stations sont éloignées, plus l'ensemble des lignes empruntées se réduit. Néanmoins, on ne peut établir de distinction entre les lignes de Métro par défaut d'évènement de sortie du réseau métropolitain. Troisièmement, il arrive que le fonctionnement du système de capture soit mis en défaut lorsque, pour des raisons d'opération, les barrières de sortie du RER sont « ouvertes » pendant une période donnée. Cela peut être le cas au niveau de stations « chargées » pour faciliter le flux de sortie de la station. D'après l'analyse des données AFC, aucune baisse significative de flux de sorties des stations n'a été observée le 13 octobre 2011.

1.3.2 **Exploration des événements de signalisation**

Ce paragraphe est consacré à une exploration préliminaire du jeu de données radio-mobile du 7 avril. Nous avons cherché à caractériser les possibilités de ce système pour la mesure de déplacements. Pour qualifier le système de capture, nous avons observé des trajectoires spatio-temporelles comprenant plus de 3 points. Néanmoins, ces trajectoires ne permettent pas de constituer des données personnelles car les points pris en considération sont restreints au tronçon central du RERA pendant l'heure de pointe du matin. Ainsi, étant donné le nombre de voyageurs (50 000 voyageurs/heure/sens) circulant sur ce tronçon pendant cette période, il est impossible de remonter à la notion d'individu.

Le but de cette analyse préliminaire est de confronter trois aspects du système de mesure: l'activité des mobiles, l'activité au niveau des stations et l'activité par paires de stations constituant les trajectoires des trains. Pour faciliter la lecture de ce paragraphe, nous faisons de temps à autre, l'amalgame entre station et groupe de cellules de la zone de localisation souterraine couvrant la ligne A du RER au niveau de cette station.

1.3.2.1 Activité des mobiles

Nous noterons **E_CRERA** l'ensemble de cellules couvrant les stations du tronçon central - entre Vincennes et La Défense - de la ligne du RER A. A partir des flux de signalisation « écoutés » par la sonde au niveau du MSC contenant les cellules de **E_CRERA**, nous avons compté le nombre d'évènements de type **LAUN** déclenchés au niveau de ces cellules lors de la journée du 7 avril 2011. Parmi, l'ensemble des mobiles ayant déclenché au moins un évènement sur **E_CRERA**, 11% ont généré 1 seul évènement, 6% 2 évènements, 3% 3 évènements et 1,6% plus de 10 évènements, pour une moyenne de 3,4 évènements générés par mobile au niveau sur **E_CRERA**. Ceci constitue un écart significatif avec les résultats théoriques. En effet, un évènement **LAUN** sur **E_CRERA** correspond à un déplacement sur le « territoire mobile » d'une des zones de localisation extérieures vers la zone de localisation souterraine. Dès lors, un évènement correspond soit à une entrée dans le système de transport au niveau du tronçon central, soit à un déplacement à bord d'un train arrivant depuis une section aérienne de la ligne. Sur la Figure 35, on trouve la configuration des trajets réalisables sur le RERA autour de notre périmètre d'étude entre La Défense et Vincennes. La nature des sections – souterraine et aérienne – est représentée pour notre périmètre.

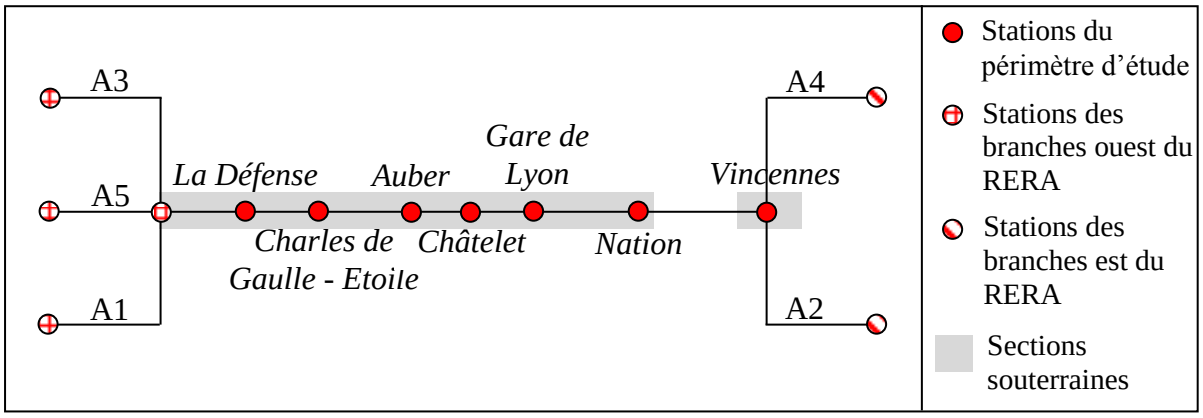


Figure 35 : schéma simplifié de la configuration des trajets réalisables par les usagers de la ligne A

A partir de cette Figure 35, nous proposons un tableau du nombre d'évènements LAUN qui seront générés en théorie pour des trajets O-D. Nous distinguons 5 groupes de stations pour constituer ces O-D. Le premier groupe, noté {A1, A3, A5} contient l'ensemble des stations des branches ouest du RERA ainsi que la station Nanterre-Préfecture. Le deuxième groupe, noté TC\{Vinc}, contient les stations du tronçon central, représentées par un cercle rouge plein sur la figure, à l'exception de Vincennes qui constitue le troisième groupe. Le quatrième groupe de station est composé des stations des branches Est et est noté {A2, A4}. Précisons que nous considérons ces origines et destinations comme les points d'entrée et de sortie du système de transport en commun ferré. Nous considèrerons alors un dernier groupe de correspondances au niveau des stations de TC\{Vincennes}, noté Corresp. Nous reportons dans le Tableau 3, le nombre théorique d'évènements LAUN attendus au niveau des cellules de E_CRERA pour des trajets entres les différentes groupes de stations proposés.

O\D	{A1, A3, A5}	TC\{Vinc}	Vincennes	{A2, A4}	Corresp
{A1, A3, A5}	X	0	1	1	0
TC\{Vinc}	1	X	2	2	1
Vincennes	2	2	X	1	2
{A2, A4}	2	2	1	X	2
Corresp	0	0	1	1	X

Tableau 3 : nombre d'évènements LAUN attendus au niveau des cellules de E_CRERA pour différents trajets sur la ligne A

Par groupe de deux cases du tableau, nous faisons apparaitre le nombre de LAUN théoriques attendus pour des migrations pendulaires sur le réseau de transport. Le nombre d'évènements attendus au niveau des cellules de E_CRERA se situe entre 0 et 4 évènements.

Alors comment expliquer la distribution du nombre d'évènements observée par mobiles qui montre que la majorité des mobiles a généré entre 4 et 9 événements ?

Ce décalage entre la théorie et la pratique peut s'expliquer par des hypothèses erronées. Les hypothèses que nous avons faites portent sur deux aspects. Premièrement, nous avons fait des hypothèses relatives à une connaissance à priori des comportements de déplacements au niveau du tronçon central de la ligne A du RER un jour ouvré moyen. Nous avons supposé d'une part que la majorité des déplacements étaient des migrations pendulaires domicile-travail (***H1***) et d'autre part que le classement des poids des stations ne comptait pas Vincennes comme l'une des stations générant le plus de flux (***H2***). Deuxièmement, nous avons supposé un fonctionnement théorique du système de capture basé sur le découpage particulier du « territoire mobile » décrit ci-avant (***H3***).

La vérification des hypothèses passe par une confrontation avec la source de données décrite en 2.3.1.2. Il s'agit de données de validations billettiques collectées par le STIF. La date de collecte n'est pas la même pour les deux sources. Cependant, elles ont toutes deux été produites un jour ouvré moyen. On supposera que les comportements globaux de déplacements pour motif domicile-travail sont comparables entre le 7 avril et le 13 octobre 2011.

Validation de H1

Testons tout d'abord l'hypothèse de comportement de déplacement. Est-il raisonnable d'assumer que la majorité des déplacements observés un jour ouvré moyen sur le tronçon central sont des migrations pendulaires ? Nous nous sommes donc intéressés aux plages horaires dans lesquelles la majorité des déplacements se sont produits. Nous définissons pour cela deux plages horaires. La première de 7h à 9h correspond à l'heure de pointe du matin (**HM**) et la deuxième de 17h à 20h correspond à celle du soir (**HS**).

Premièrement, nous quantifions la part des déplacements effectués dans ces plages horaires à partir du jeu de données billettique (voir paragraphe 1.3.1.2). La Figure 36 illustre la distribution par tranche de 30 minutes des validations sur l'ensemble des stations du tronçon central. Sur le tronçon central, 61% des validations ont lieu dans les plages horaires **HM** et **HS**. Il existe une symétrie dans le nombre de validations entre les deux périodes pour toutes les stations. Cependant, chacune des stations du tronçon central possède un fonctionnement propre. Par exemple, les stations Châtelet et Gare de Lyon génèrent moins de 60% de leur validations pendant les plages horaires **HM** et **HS**. A l'inverse, Auber, Charles de Gaulle-Etoile et La Défense comptabilisent plus de 65% de leurs validations pendant ces périodes. On trouve une explication dans le fait que Châtelet et Gare de Lyon sont des stations de connexion avec le réseau de transport en commun ferré ou d'autres modes ferrés (Gare de Lyon). De plus, Châtelet est une station centrale dans le réseau de transport car elle dessert une zone d'effervescence « d'activité de loisirs et d'achats » parisienne.

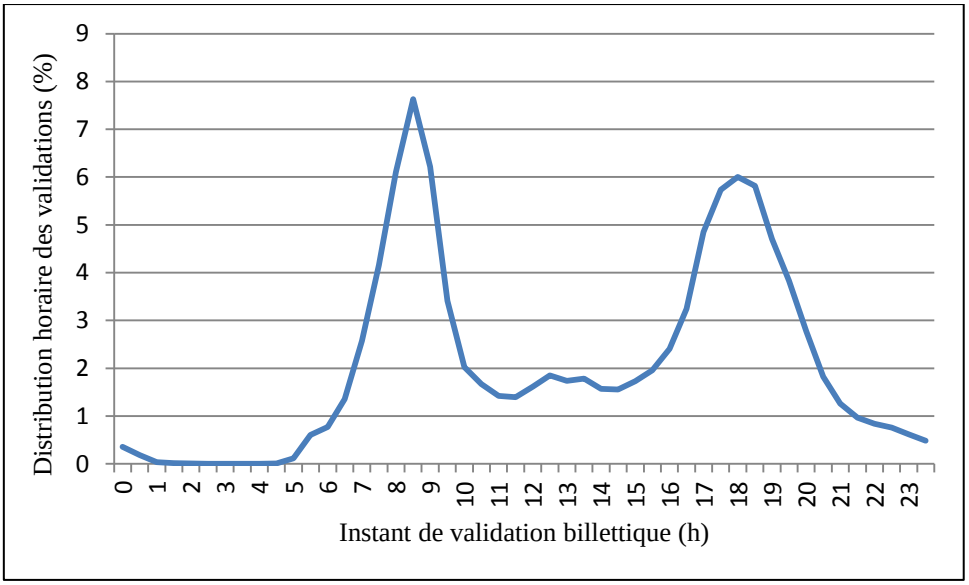


Figure 36 : distribution par tranche de 30 minutes des validations sur l'ensemble des stations du tronçon central obtenues à partir des données billettique

Deuxièmement, nous vérifions que la distribution horaire obtenue avec notre système de capture est similaire. Nous observons que 67% des **LAUN** au niveau des stations du tronçon central ont lieu dans les plages horaires **HM** et **HS**. La Figure 37 illustre la distribution des **LAUN** par tranche de 30 minutes sur le tronçon central à partir des données du 7 avril 2011. On observe également un fonctionnement propre à chacune des stations. En effet, les stations Châtelet, Gare le Lyon, Vincennes et La Défense déclenchent moins de 70% de leur **LAUN** pendant les plages horaires **HM** et **HS**. A l'inverse, Nation, Auber et Charles de Gaulle-Etoile produisent plus de 75% de leur **LAUN** pendant les périodes **HM** et **HS**. De plus, la symétrie du nombre de validations entre les deux périodes n'est plus vérifiée que pour Charles-de-Gaulle-Etoile.

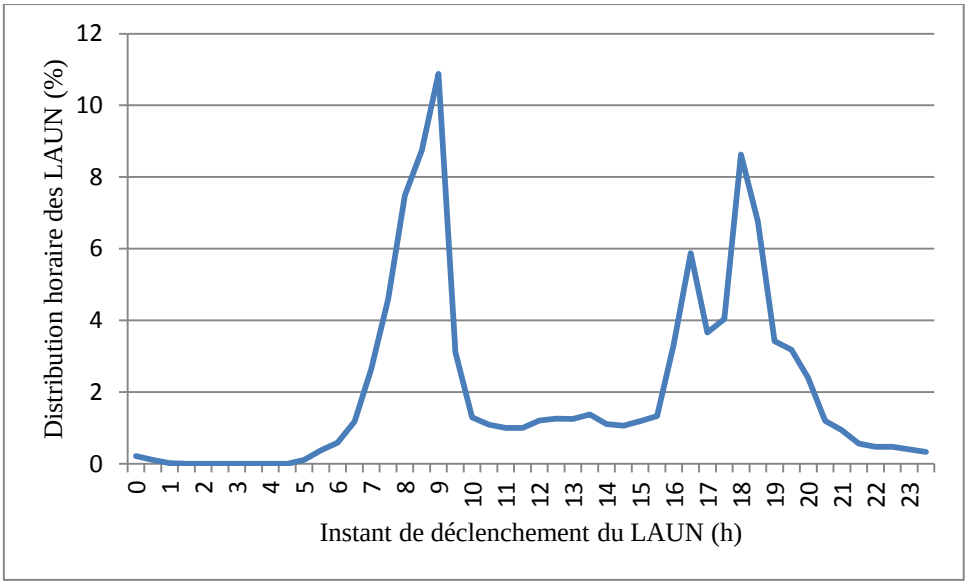


Figure 37 : Distribution des **LAUN** par tranche de 30 minutes sur le tronçon central à partir des données du 7 avril 2011

Ces deux distributions varient de manière similaire avec une concentration autour des heures de pointe. Les deux concordent avec l'hypothèse des migrations pendulaires. Les écarts entre les deux systèmes de mesure s'expliquent d'une part par le fait que la proportion d'abonnés Orange et celle d'abonnés STIF parmi les voyageurs ne varient pas de la même manière entre heures creuses et heures de pointe, et d'autre part par les méthodes de collecte et leur technologies qui diffèrent.

Validation de H2

Nous étudions l'hypothèse relative au comportement des stations quant à la production de déplacement. Est-il raisonnable d'assumer que le poids de la station de Vincennes dans la génération des déplacements est inférieur ou égal aux autres stations? Pour cela, nous nous sommes intéressés au nombre de validations par station dans le jeu de données billettique. Ainsi, nous avons produit le « poids naïf » de chacune des stations du tronçon central. Le qualificatif « naïf » est utilisé car nous considérons toutes les validations billettiques, ces dernières pouvant être soit des entrées, soit des sorties du système. Le Tableau 4, montre que la station Vincennes est celle qui a généré le moins de validation du tronçon central. Ces résultats « naïfs » seraient à redresser pour connaitre la proportion d'entrées dans le système au niveau de chaque station. Cependant, ce tableau reflète une qualification naïve du poids des stations et nous permet de valider l'hypothèse **H2**. La station Vincennes n'occupe pas la place la plus structurante dans la production des flux de déplacement du tronçon central.

Stations - S	Pourcentage du nombre de validations au niveau de S parmi toutes les validations du tronçon central
Vincennes	2,99 %
Nation	10,5 %
Charles De Gaulle – Etoile	11,1%
Auber	14,2%
La Défense	18,7%
Gare de Lyon	20,7%
Châtelet - Les Halles	21,8%

Tableau 4 : répartition des validations billettiques sur les stations du tronçon central

Validation de H3

Nous testons ici notre hypothèse de cohérence du système de capture radio-mobile par rapport au fonctionnement théorique de la signalisation au niveau d'un « territoire mobile » connu à priori. Plusieurs facteurs peuvent mettre en défaut cette hypothèse. Par exemple, la différence d'architecture des stations (taille, nombre de connexions ferroviaires et piétonnes) entraine à la fois une hétérogénéité des comportements de mobilité et des conditions dans lesquelles les ondes radioélectriques se propagent. Afin d'observer les phénomènes à l'œuvre, nous nous sommes intéressés à deux points qui feront l'objet des deux prochains paragraphes. Nous caractériserons l'activité au niveau des stations du tronçon central de la ligne A du RER puis l'activité au niveau de paires de stations.

1.3.2.2 Activité aux stations

Premièrement, nous avons regardé la distribution du nombre de **LAUN** par stations à partir du jeu du 7 avril 2011 (Figure 38). Cette figure montre un déséquilibre du « taux de capture » entre les stations.

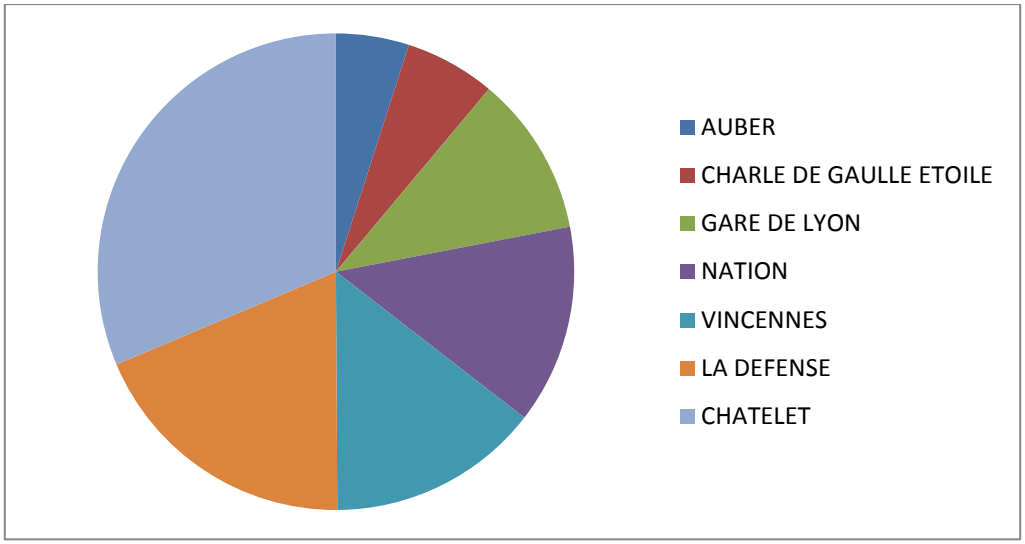


Figure 38 : distribution des LAUN collectés selon les stations du tronçon central

Ces écarts étaient prévisibles car la fréquentation des stations n'est pas homogène. Cependant, le Tableau 4 produit à partir des données billettiques, propose un tout autre classement de fréquentation. Deux phénomènes expliquent cette distribution. D'une part, les comportements de déplacement, et donc la densité de voyageurs varie selon les stations et d'autre part, le système de capture est sensible à la station considérée. En effet, la station Vincennes étant la seule station souterraine entourée de sections aériennes, tout mobilet passant par Vincennes (à bord d'un train ou en entrant dans le système de transport) va déclencher un événement **LAUN**. La station Nation est également particulière car elle est entourée d'une section de rail aérienne à l'est et d'une section souterraine à l'ouest. Ainsi, à Nation, les événements **LAUN** devraient se produire pour les mobiles à bord d'un train en provenance des branches Est du RERA et lors de l'entrée dans le système de transport. Le fonctionnenment théorique des autres stations est le suivant : un LAUN est généré si et seulement si un mobile entre dans le système de transport. La Figure 38 montre que 6 fois moins de personnes « entrent » dans le système de transport par Auber que par Châtelet. Ceci ne reflète pas le comportement transport théorique de ces deux stations. On peut supposer qu'un autre mécanisme relatif à notre compréhension du système de capture radio-mobile est à l'œuvre.

Deuxièmement, nous avons tracé l'évolution de cette distribution du nombre de **LAUN** par tranches temporelles de 30 minutes afin d'analyser les phénomènes temporels sous-jacents (Figure 39).

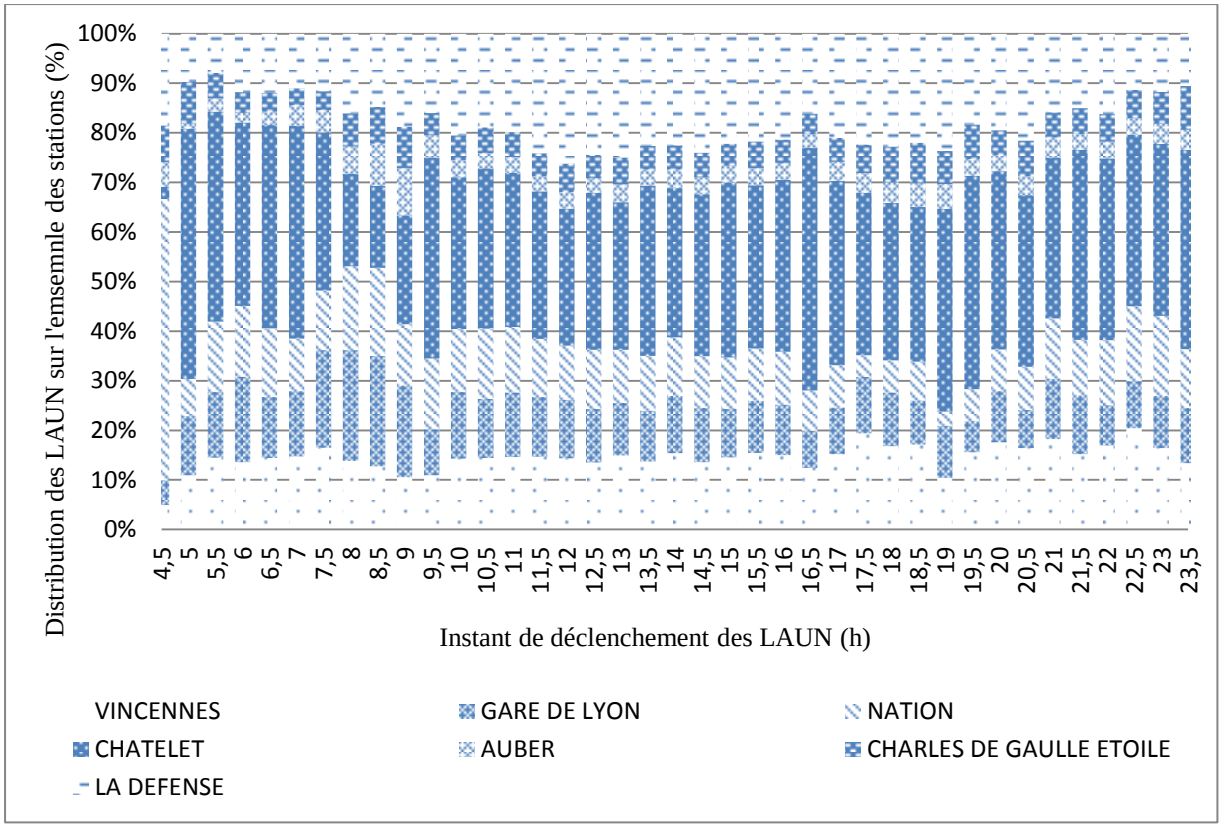


Figure 39 : évolution de la distribution des LAUN parmi les stations du tronçon central au cours de la journée du 7 avril 2011

La distribution varie avec le moment de la journée. Ces variations s'expliquent de manière différente selon les stations. En effet, on remarque que le « taux de capture » de La Défense diffère entre les périodes **HM** et **HS** tout en augmentant en heure creuse. On trouve deux explications à ce phénomène. D'une part, les antennes couvrant la ligne A du RER couvrent également la ligne 1 du métro au niveau de la station La Défense. D'autre part, cet écart entre **HM** et **HS** vient du fait que le système capture les entrées dans le système de transport souterrain et non les sorties. Ainsi, lorsque la destination du trajet domicile-travail est la Défense, nous mesurerons une activité au niveau de la Défense plus élevée lors du trajet retour du soir que lors du trajet aller du matin. Cette explication de variation de « taux de capture » entre **HM** et **HS** s'applique de manière identique au cas de la station Châtelet. On observe le phénomène inverse pour les stations Nation et Gare de Lyon dont le « taux de capture » est bien plus élevé le matin que le soir. Dans le cas de Nation, on remarque qu'après 20h, le « taux de capture » augmente significativement symétriquement à Vincennes. Il s'agit des trajets de retour depuis la banlieue Est. Quant aux stations Auber et Vincennes, elles conservent un « taux de capture » quasi-constant dans la journée.

Troisièmement, on observe la distribution selon le nombre d'évènements réalisés au niveau d'une station. Afin d'observer la symétrie des migrations pendulaires, pour chacune des stations, on a tracé sur la Figure 40, la proportion d'évènements ayant été répétés n fois

(pour n de 1 à >10) au niveau d'une même station parmi tous les événements s'étant produits au niveau de la station. Par exemple, sur tous les événements qui ont eu lieu à Châtelet, 18% sont des évènements répétés deux fois par un même mobile.

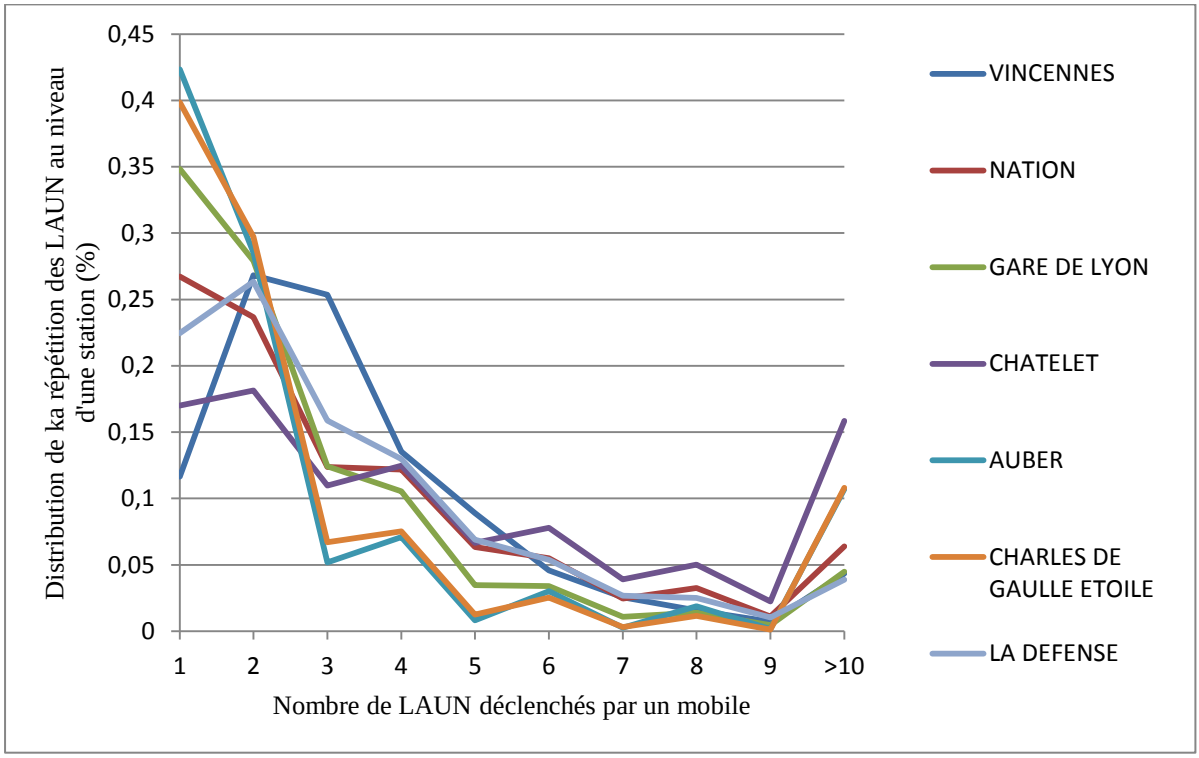


Figure 40 : distribution de la répétition des évènements au niveau d'une station

On s'attend à une allure de courbe décroissante avec un maximum pour 1 seul évènement réalisé. En effet, nous mesurons les entrées dans le système via une station d'origine. Dans le cas de trajets domicile-travail, deux entrées sont à mesurer : l'entrée proche du domicile le matin et l'entrée proche du travail le soir. Ceci se vérifie pour l'ensemble des stations à l'exception de Vincennes, Châtelet et La Défense qui présentent un maximum pour 2 évènements réalisés. L'explication pour le cas de Vincennes est évidente. Il s'agit d'une station souterraine entourée de portions aériennes, ainsi, tout accès vers Vincennes déclenche un **LAUN**. Cette explication ne tient pas pour Châtelet et La Défense entourées de portions souterraines. Sa seule particularité est la non-dissociation sur le « territoire mobile » entre la ligne de RER et la ligne de métro. Observons alors la distribution de l'écart temporel inter-évènements pour les mobiles ayant déclenché exactement 2 **LAUN** au niveau de la même station. Considérons deux classes de distance temporelle entre les événements, la classe des évènements se produisant à moins d'une heure d'intervalle et celle de ceux qui se produisent à plus d'une heure d'intervalle. Pour l'ensemble des stations, parmi les événements qui ont une distance temporelle inférieure à une heure, plus de 95% se produisent avec un écart inférieur ou égal à 15 minutes. Ce sont des évènements supplémentaires par rapport à ceux attendus en théorie. Une nouvelle

procédure de **LAUN** peut être demandée en réaction à l'échec d'une première tentative de mise à jour de localisation ou en cas de perte d'information de zone de localisation suite à une dégradation des conditions de couverture. Les tunnels des lignes de train ainsi que les tunnels de connexion piétonnes offrent des conditions de couverture radio particulièrement dégradées. Cela explique le pourcentage élevé de mobiles ayant réalisés plus de 10 **LAUN** à Châtelet. La proportion des mobiles qui ont déclenché exactement deux évènements au niveau d'une même station dans un intervalle de 15 minutes est de 32% à Vincennes alors qu'elle est comprise entre 80% et 90% pour les autres stations hormis La Défense. En effet, cette station se distingue des autres avec un taux de 70%. Intéressons-nous à la deuxième classe de mobile dont les 2 évènements générés sont espacés temporellement de plus d'une heure. Sur la Figure 41, on représente la distribution des distances temporelles inter-évènement par tranche d'une heure pour différentes stations lorsqu'un mobile a généré deux évènements LAUN au niveau de la même station dans un intervalle de temps supérieur à 15 minutes.

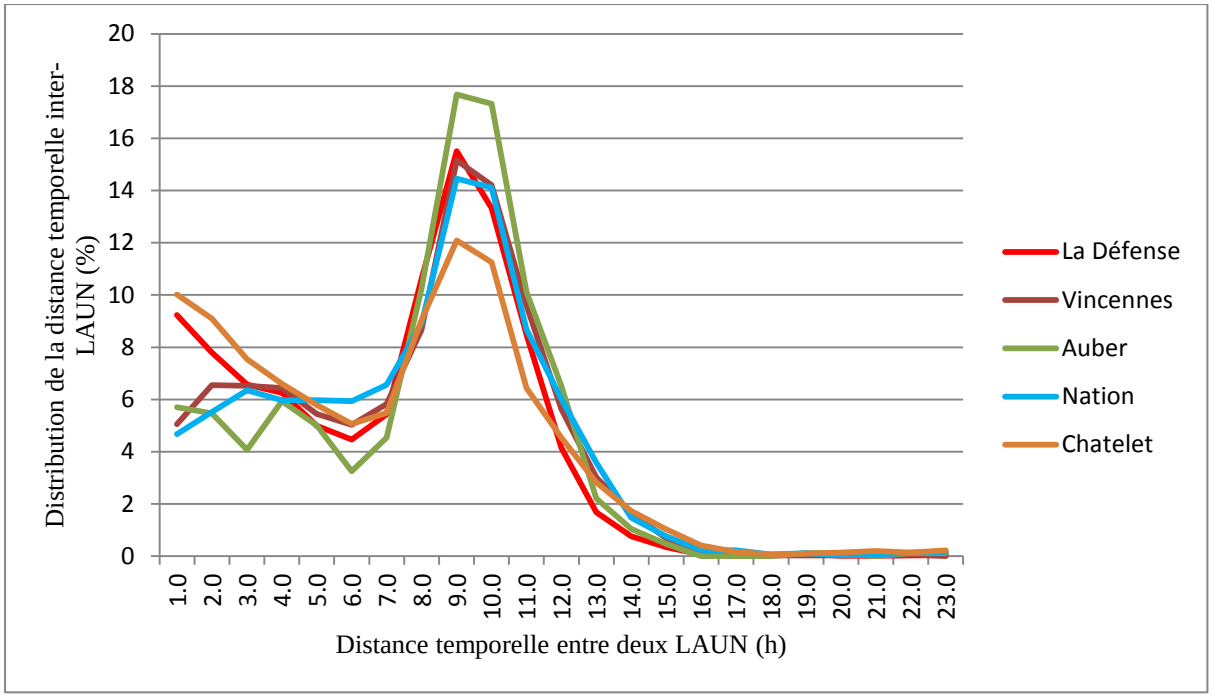


Figure 41: distribution des distances temporelles inter-évènements pour différentes stations

La majorité des mobiles qui ont réalisé deux évènements au niveau d'une même station, les ont espacé d'une journée de travail (entre 7h et 11h). On remarquera que les stations Châtelet et La Défense ont un pic pour une distance temporelle entre 1h et 2h. Ceci correspond plutôt à un comportement achats/loisirs. Les activités localisées à proximité d'une station influent sur les comportements de déplacements à destination de cette station.

Pour conclure cette analyse de l'activité au niveau des stations, nous constatons une dépendance de notre système de capture à la station considérée et au moment d'observation. Notre système de capture repose sur le déclenchement d'évènements lors de déplacements du téléphone mobile sur le « territoire mobile ». Ainsi, on peut distinguer deux causes creusant l'écart entre la théorie et la pratique. Tout d'abord, le « territoire mobile » est très sensible aux conditions de propagation des ondes radio-électiques. Ces conditions se dégradent facilement dans des environnements tels que des tunnels. Ensuite, certains comportements de mobilité vont placer des abonnés dans ces parties aux conditions de propagation dégradée. Typiquement, les couloirs piétons assurant les connexion entre les lignes du réseau de transport en commun et les sections ferrées entre deux stations sont des zones où la probabilité d'avoir une qualité de réception du signal radio-électrique détériorée est plus forte. Le fait que les comportements de mobilité varient selon le moment la journée entrainent une variation du « taux de capture » avec le temps. La conséquence directe est la déclenchement de **LAUN** supplémentaires par rapport à ceux attendus en pratique. Ces déclenchements « inattendus » dépendent eux même de la station. Plus précisement, il s'agit d'une dépendance à la localisation exacte, ou la succession de localisations, dans la station sur toute la durée de la procédure de **LAUN**. Ainsi, des **LAUN** peuvent se produire sans qu'ils ne correspondent à une entrée dans la zone de localisation souterraine. Dans certains cas, on observe une répétition de l'évènement au niveau d'un même groupe de cellules couvrant une ligne d'une station. Le déclenchement de ces évènements supplémentaires est un avantage car il permet d'augmenter la taille de l'échantillon. Cependant, la répétition de **LAUN** en situation de mobilité pourrait entrainer un décalage spatial dans le cas où le délai de succès de la procédure excède le temps de présence dans le groupe de cellules associées à une station. En effet, quelles sont les conséquences de la dépendance du système de capture aux stations sur l'étude des déplacements d'une station vers une autre ? La section suivante traite de l'impact de la paire de stations considérée dans l'étude des trajectoires par paires de stations.

1.3.2.3 Etude des trajectoires

Tout d'abord, définissons ce que nous appellerons la trajectoire d'un mobile. La trajectoire d'un mobile *m* est constituée de *n* points datés et localisés (*h*,*s*) avec $n \in [2, 7]$ car le périmètre de notre étude est constitué de 7 stations. Dans notre cas, la localisation est à la station *s*. Le temps *h* est celui du premier évènement **LAUN** au niveau de la station. Les points de la trajectoire sont ordonnés dans le temps. Ainsi, une trajectoire de taille *n* est constituée de la manière suivante :

$$\forall\, i \in [0,7], \qquad \forall\, h_n - h_1 \in [20,60]\ minutes,$$
$$(m_1 = \cdots = m_i = \cdots = m_n)\ \&\&\ (h_1 < \cdots < h_i < \cdots < h_n) \&\&\ (s_1 < \cdots < s_i < \cdots < s_n) \quad (15)$$

L'ordre des stations dépend du sens de parcours de la ligne. L'intervalle de temps pour le parcours de la ligne depuis Vincennes vers La Défense est de 23 minutes selon le site de l'opérateur RATP. Nous gardons une marge de temps afin de prévenir des décalages entre notre système de capture d'entrée en souterrain, des comportements d'arrivée en station avancée par rapport au passage du train et des phénomènes perturbant la ligne qui augmentent les temps de parcours.

Observation de la trajectoire des trains

Nous débutons cette étude par l'observation de trajectoires de taille 2 entre les stations Vincennes (S_V) et Nation (S_N), c'est-à-dire l'ensemble des trajectoires des mobiles telles que

$$\forall\, |h_N - h_V| < 24\ heures,$$

$$(m_N = m_V)\ \&\ \{\ (h_N < h_V)\&\&\ (s_N < s_V)\ ||\ (h_N > h_V)\&\&\ (s_N > s_V)\}\ (16)$$

Nous observons alors les trajectoires entre ces deux stations pour les deux directions de Vincennes vers Nation et de Nation vers Vincennes à l'échelle de la journée. Nous représentons ces trajectoires sur la Figure 42 qui présente en abscisse l'instant de l'évènement à Vincennes et en ordonnée l'instant de l'évènement à Nation.

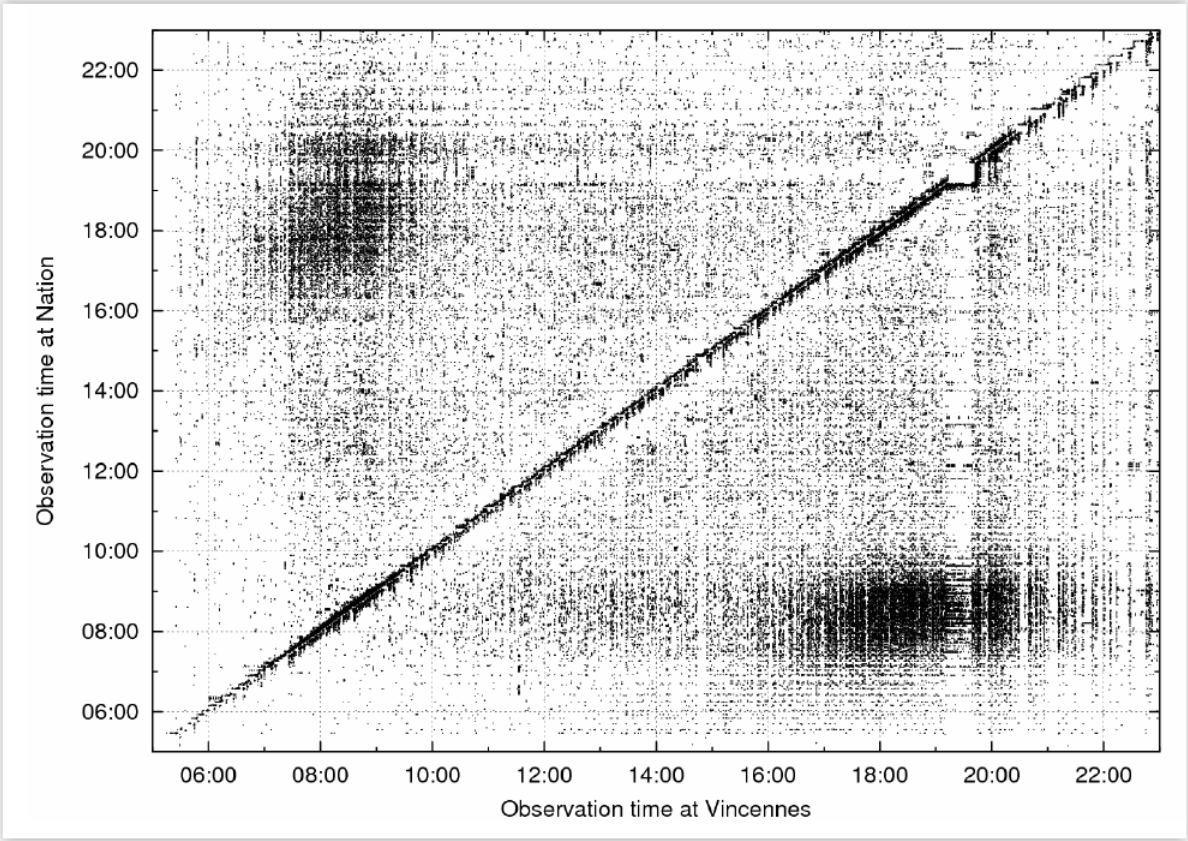


Figure 42 : trajectoires de taille 2 entre Vincennes et Nation à l'échelle de la journée

Cette construction de trajectoires permet notamment d'observer les comportements de déplacements des usagers de la ligne A à l'échelle des migrations pendulaires Cette figure confirme l'hypothèse 1 énoncée au début du paragraphe 1.3.1.1 sur les motifs de déplacement. En effet, les zones elliptiques correspondent à l'observation des migrations pendulaires, c'est-à-dire une entrée au niveau d'une des deux stations le matin et une entrée au niveau de l'autre station le soir.

La diagonale correspond au passage des trains. On peut observer la signature particulière du mode de transport ferré sous forme de « paquets ». La Figure 43 représente la distribution des **LAUN** entre Vincennes et Nation entre 8h00 et 9h00 le 7 avril 2011 et propose un zoom sur cette signature particulière des trains sur la signalisation. Les carrés gris au-dessus de la diagonale sont les trains circulant de Vincennes vers Nation. La partie verticale des carrés est à assimiler au temps à quai et la partie horizontale au temps d'arrivée en station avant le passage du train. Des croix rouges sont placées selon les indications d'heure d'arrivée des trains à Nation observées par l'équipe d'enquête terrain (voir 2.3.2.1 pour une description de la source). On capture bien le passage de trains, et donc la fréquence de desserte de la ligne. Néanmoins, on constate également sur cette figure, l'impact de la différence de qualité de capture entre les stations Nation et Vincennes. La densité des carrés sous la diagonale (sens Nation vers Vincennes) est en effet plus faible qu'au-dessus (sens

Vincennes vers Nation). Ceci s'explique par la dysmétrie de la station Nation, en terme de type de section permettant l'accès à la station à bord de la rame.

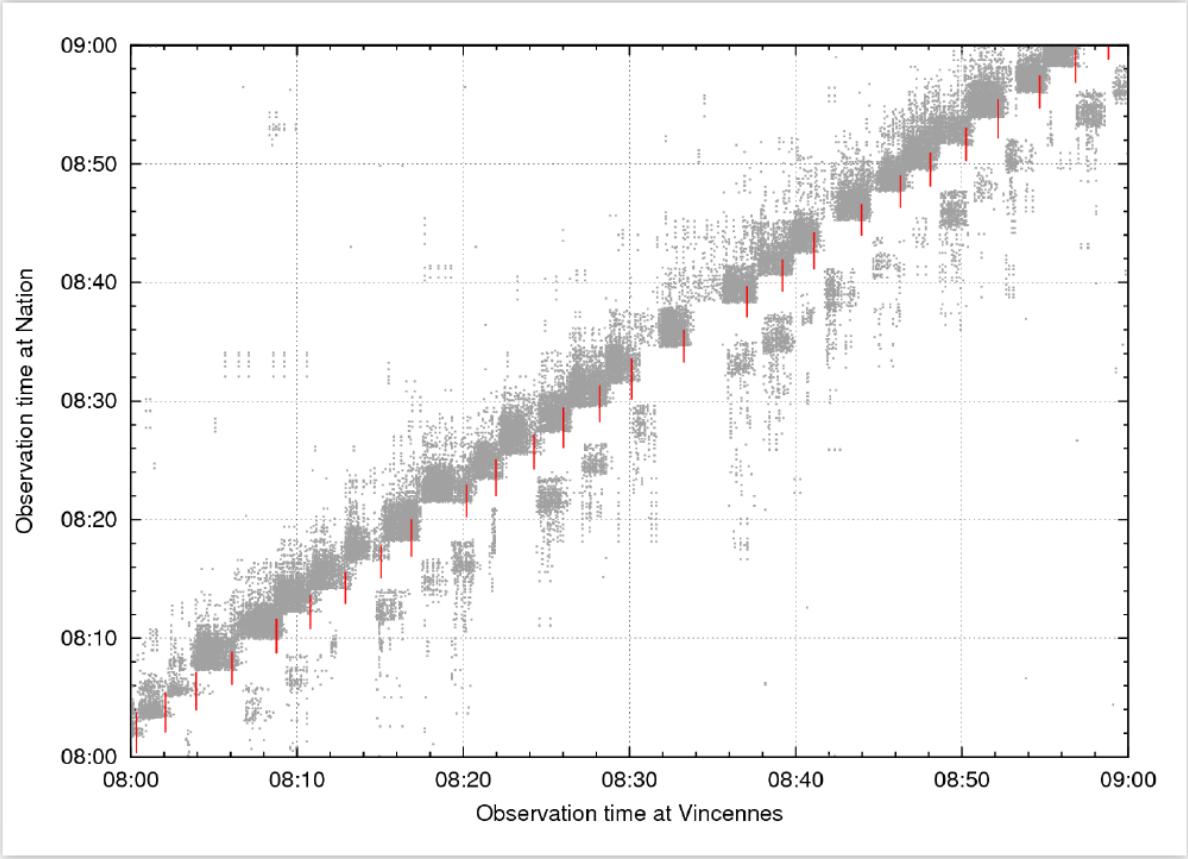


Figure 43 : trajectoires de taille 2 entre Vincennes et Nation entre 8h et 9h le 7 avril 2011

L'ensemble des trajectoires des mobiles permet de reconstruire la trajectoire des trains circulant sur la ligne A du RER. On observe sur la Figure 44 des trajectoires de taille 6 et des trajectoires de taille 3 lorsque la ligne est parcourue dans le sens Vincennes vers La Défense. Les traits noirs représentent les trajectoires des trains produites à partir des observations terrains et les grises celles produites à partir de notre système de capture. On remarque que plus *n* est grand, plus le nombre de trajectoires est faible. Ainsi, il ne sera pas utile pour nous de reconstruire des trajectoires de plus de 3 points. Les trajectoires mesurées suivent assez fidèlement les trajectoires observées depuis les quais avec un décalage temporel imputable à la taille des cellules qui couvrent également une portion des tunnels et une éventuelle désynchronisation entre les deux méthodes.

On observe une quantité de trajectoires grises qui peuvent être considérées comme des « sauts de trains » sur la figure du dessous. Cela ne correspond pas à une déficience du système de capture mais à un comportement de changements de missions. En effet, le RERA possède 3 branches à l'ouest qui sont desservies selon une permutation. Toutes les stations ne proposent pas le choix complet de mission. Ainsi, un usager sera amené à prendre un train

dont la branche de destination n'est pas celle désirée, puis descendre au niveau d'une autre station proposant sa mission d'intérêt et changer de train. Notre système de capture permet d'observer les stations privilégiées pour un changement de mission.

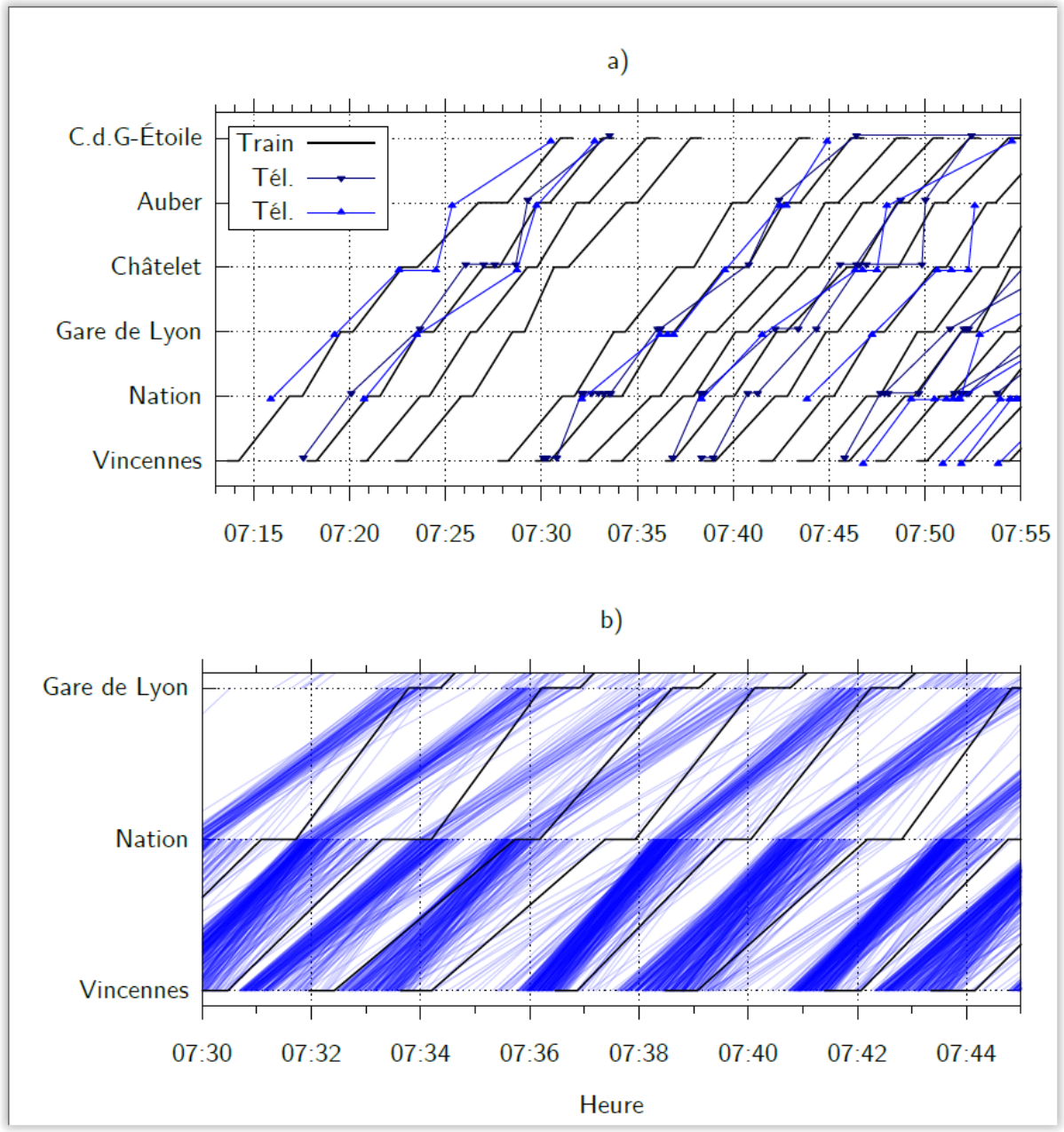


Figure 44 : trajectoires de taille 6 (a) et trajectoires de taille 3 (b)

Ces dernières figures montrent des groupes de trajectoires confinées dans un espace temporel qui semblent permettre une identification des trains. Il faut cependant prendre garde au recouvrement des « paquets » et au changement de mission. La Figure 45 présente une manière de représenter les trajectoires de taille 2 entre Vincennes et Nation par des points dans un espace à deux dimensions temporelles (moment du LAUN à Nation en ordonnée et

moment de LAUN à Vincennes en abscisse). Dans le cas de LAUN répétés au niveau de l'une ou l'autre des stations, le point représentant la trajectoire d'un mobile est choisi de telle sorte que l'écart temporel soit le minimum. La figure est constituée de carrés de 10 secondes de largeur. Un carré apparait s'il contient au moins une trajectoire. Un code de couleur est appliqué en fonction du débit de mobiles. Le bleu correspond à moins d'un mobile par seconde, jaune correspond à un nombre de mobile entre 1 et 2 par seconde et le rouge signifie que plus de deux mobiles ont leur trajectoire contenue dans une seconde. Les segments verticaux proviennent des observations à quai. Leurs extrémités sont l'instant où le train part de Vincennes et l'instant où le train quitte Nation.

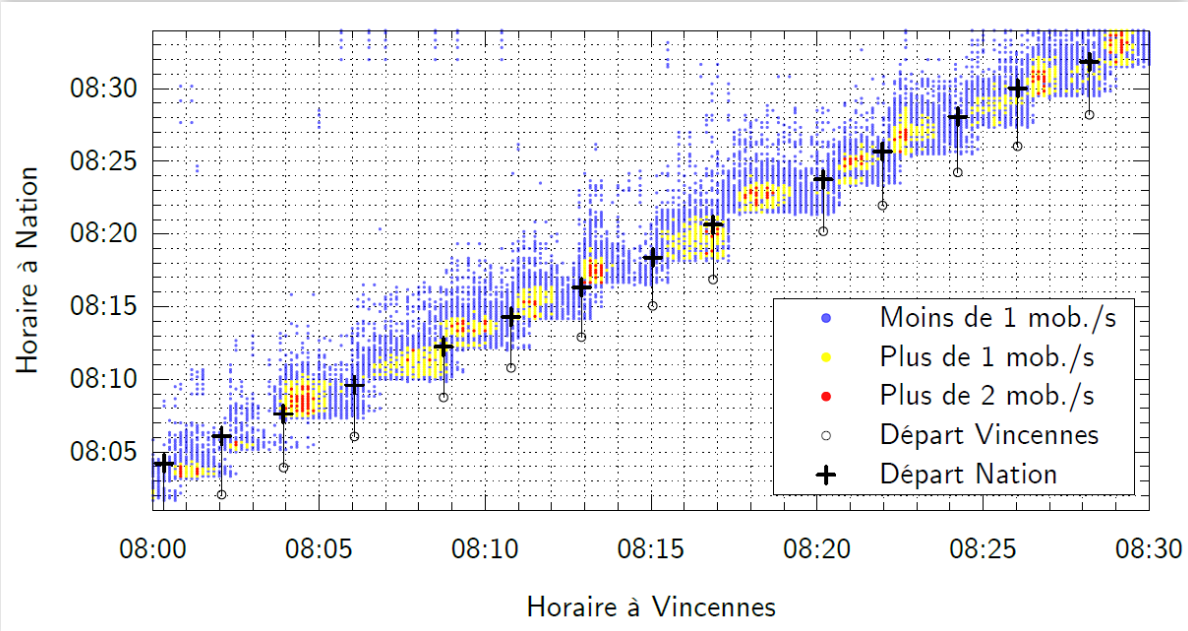


Figure 45: densité d'évènements pour des trajectoires de taille 2 entre Vincennes et Nation entre 8h et 9h le 7 avril 2011

Des techniques standard de segmentation, comme des méthodes de croissance des régions (region growing) ou des algorithmes de détection des contours à gradient (gradient based directed edge detection), permettraient le partitionnement de la carte des densités des mobiles ayant une trajectoire de taille 2. Chaque contour ainsi obtenu pourrait alors être associé à un train. Enfin, à chaque train T est rattaché un nombre de mobiles ayant produit une trajectoire entre deux stations consécutives ($n_{T,s}$). Néanmoins, nous avons vu en 2.3.1.1.2 que le taux de capture dépend fortement de la station considérée ainsi que du moment de la journée. Le paragraphe suivant propose une estimation du nombre de mobiles à bord d'un train T, notée $N_{T,s}$ ainsi qu'un estimateur de la probabilité de capture de trajectoires.

Estimateur de probabilité de capture

Posons tout d'abord les notations utilisées dans ce paragraphe ainsi que les hypothèses que nous ferons. Soit une station *s*, un point de mesure en *s* signifie qu'un **LAUN** a été déclenché au niveau d'une des cellules de **E_CRERA**. Soit s^+ et s^- les stations aval et amont de *s* pour un sens de parcours de la ligne donnée. Notons P(s) la probabilité de déclencher un **LAUN** en *s*. Nous supposerons que P(s), P(s^+) et P(s^-) sont indépendantes. Nous supposons également que ces probabilités dépendent du temps, bien que pour alléger les notations, cette dépendance n'apparaisse pas dans les transcriptions.

Soit les notations suivantes, $n_{T,s}$ est le nombre de trajectoires de taille 2 vers la station *s* qui ont été associées au train T et $N_{T,s}$ est le nombre de mobiles à bord du train T.

$$\text{Alors : } N_{T,s} = \frac{n_{T,s}}{P(s)*P(s^-)} \quad (17).$$

Pour produire un estimateur de P(s) nous utilisons l'hypothèse d'indépendance qui nous permet d'écrire de formule de Bayes pour les probabilités conditionnelles.

$$P(s) = P(s|s^+ \cap s^-) = \frac{P(s^+ \cap s \cap s^-)}{P(s^+ \cap s^-)} \quad (18)$$

En utilisant le jeu de trajectoires de taille 3 et dont les stations sont consécutives, on compte le nombre de mobiles ayant produit au moins un LAUN au niveau des 3 stations ($n_{s^+ \cap s \cap s^-}$) ainsi que le nombre de mobiles ayant produit au moins un LAUN au niveau des stations amont et aval ($n_{s^+ \cap s^-}$). Alors, $P^* = \frac{n_{s^+ \cap s \cap s^-}}{n_{s^+ \cap s^-}}$ est un estimateur de P(s), la probabilité pour un mobile de déclencher un LAUN au niveau de s. l'intervalle de confiance de cet estimateur est noté P_{95}(s) :

$$P_{95(s)} = P^* \pm 1.96\sqrt{\frac{P^*(1-P^*)}{n_{s^+ \cap s^-}}} \quad (19).$$

Cet estimateur est fortement dépendant de s, du sens de parcours de la ligne et du moment de la journée. La Figure 46 montre les variations de P_{95}(s) par tranche de 30 minutes sur la plage matinale [7h, 12h] pour un sens de parcours Est-Ouest de la ligne (Figure 46.a) et par tranche de 30 minutes pour la plage vespérale [16h, 21h] pour le sens de parcours opposé (Figure 46.b). Nous avons considéré les stations Nation, Gare de Lyon, Châtelet et Auber. On observe un comportement différent entre le matin dans le sens est-ouest et le soir dans le sens ouest-est. En effet, le matin, l'intervalle de confiance de P(s) reste autour de 1 pour la station Nation. Ceci est cohérent avec le fonctionnement théorique car Nation est séparée de sa station amont par une portion aérienne. Pour Auber et Gare de Lyon, P_{95}(s) est plus élevé pendant l'heure de pointe du matin avec un plat remarquable pour Auber autour de 0,6. L'intervalle de confiance de l'estimateur a le comportement inverse pour Châtelet avec une amplitude des variations entre 0,4 et 0,6. Ainsi, des éventuels ralentissements du temps de parcours pendant l'heure de pointe impacte plus les stations Auber et Gare de Lyon que Châtelet. Le soir, pour un sens de parcours inverse, P95(s) reste également quasi-constant pour Nation, mais sa valeur a chuté à 0,4. En effet, dans ce cas, la station amont est connectée par une section souterraine. Cette constance s'applique également à Auber avec une valeur

autour de 0,2 plus faible que le matin. $P_{95}(s)$ chute en heure de pointe pour Châtelet et Gare de Lyon.

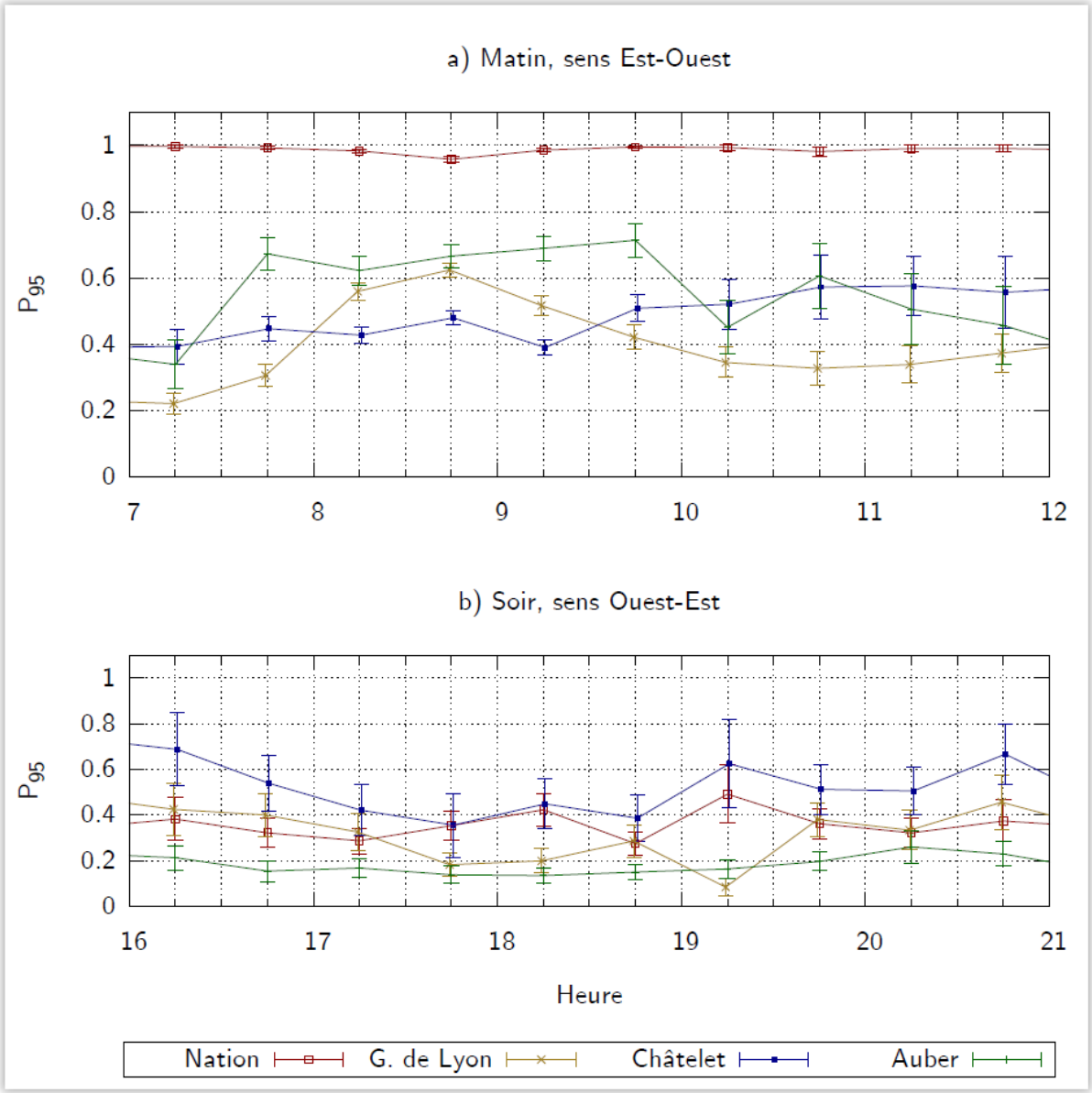


Figure 46 : variation de $P_{95}(s)$ pour différentes stations le matin pour un parcours de la ligne d'est en ouest (a) et le soir pour un parcours d'ouest en est

1.3.2.4 Conclusion

Pour conclure, le système de capture n'est pas parfait. Cependant, cette analyse préliminaire sur le jeu de données du 7 avril montre que ce système est perfectible. En effet, il est possible de corriger la dépendance de capture à la station, au sens de parcours de la ligne et au moment de la journée via un estimateur de P(s) en considérant des trajectoires de mobiles.

Les analyses préliminaires accomplies sur les évènements capturés le 7 avril 2011 ont montré que le « territoire mobile » de capture devait être agrandi pour prendre en compte les sorties du système de transport. A partir de ces constations, nous avons constitué un deuxième « périmètre mobile » contenant les cellules couvrant l'extérieur des bouches d'entrées/sorties des stations en plus des cellules de la **LA_souterraine**. Néanmoins, contrairement aux cellules souterraines qui sont dédiées à la couverture du quai et tunnels contigus, les cellules extérieures couvrent l'environnement autour des bouches d'entrée/sortie. De plus, ces points d'accès au système de transport souterrain sont multiples et répartis sur un large périmètre autour des stations. Sur la Figure 47, nous avons représenté en rouge certaines voies d'accès au système de transport au niveau de la station Nation. La simulation de la couverture radio pour les cellules appartenant à la « couche 2G-900Mhz » illustre la diversité des cellules de rattachement lorsque l'on sort du souterrain.

Figure 47 : simulation de la couverture radio (2G 900MHz) à 50m autour de la partie aérienne de la station Nation

La méthode suivante permet d'associer à chacune des stations son environnement mobile aérien immédiat, c'est-à-dire le groupe de cellules qui couvrent les entrées et sorties de la station. Soit C_s un groupe de cellules couvrant une station souterraine *s* et C_a l'ensemble des cellules extérieures. Pour chaque *s* de C_s, on construit l'ensemble T_a de trajectoires de taille 2 telle que l'origine appartienne à C_s, la destination à C_a et que ces évènements

consécutifs soient espacés temporellement de moins de 5 minutes, idéalement 3 minutes. Ce temps correspond à la durée moyenne de sortie d'une station utilisée traditionnellement dans les modèles dédiés à la modélisation des systèmes de transports en communs ferrés. Ainsi, on obtient l'ensemble $C_{s',a}$ des cellules de C_a qui satisfassent la construction de T_a. Cet ensemble de cellules constitue le voisinage proche des bouches de sorties de la station *s*. A titre d'exemple, 95% des trajectoires T_a pour la station La Défense ont une durée autour du temps moyen de sortie de la station, c'est à dire 3 minutes.

Enfin, la possibilité d'observer les trajectoires des trains prouve la faisabilité de mesurer des déplacements. Ainsi, dans la section suivante, nous exposerons les résultats de nos travaux sur les deux jeux de données en débutant par une présentation des indicateurs de qualité de service constructibles, puis nous estimerons les flux de voyageurs au niveau du tronçon central et validerons ces résultats au travers d'une comparaison avec des estimations produites avec des données de billettique.

2 Estimer des indicateurs de qualité de service

Ce paragraphe est consacré à la présentation des résultats produits à partir des différents jeux de données mobiles confrontés aux sources complémentaires. La production de ces résultats repose sur les analyses faites dans la section précédente. Nous divisons les productions en deux catégories. Premièrement, nous présenterons les indicateurs de qualité de service produits à partir des remontées d'évènements de signalisation du 7 avril (AGUILERA, et al., 2012). Deuxièmement, nous montrerons qu'à partir d'un « périmètre mobile » étendu à l'espace aérien à proximité du réseau de transport, les estimations des volumes de voyageurs sont comparables à celles produites à partir de données de billettique (AGUILERA, et al., 2014).

2.1 Des difficultés d'exploitation sur la ligne A

2.1.1 Les problèmes de congestion

La ligne de A du RER est sujette à un fort niveau d'irrégularité. La qualité de service offerte par la ligne est considérée comme faible en raison d'une forte congestion entrainant régulièrement des retards significatifs. Illustrons ces phénomènes à travers l'analyse statistique du temps de trajet et du temps d'attente à quai. Nous exploitons le calendrier de circulation des trains de la ligne A pour tous les jours ouvrés des mois d'octobre et de novembre 2011 reconstruit à partir de données du site de l'opérateur[18] par Vincent Benezech (AGUILERA, et al., 2012). Le site internet de l'opérateur RATP propose en temps réel les informations disponibles sur les écrans d'informations installés sur les quais, c'est-à-dire l'heure d'arrivée des prochains trains et les trains à quai. Le calendrier a été enrichi toutes les 4s pendant la période d'étude. Cette fréquence permet d'avoir une vision proche du temps

[18] http://www.ratp.fr

réel de l'activité remontée sur le site de l'opérateur. Nous avons fait les approximations suivantes : l'heure d'arrivée du train est le moment où le message « train à quai » apparait pour la première fois et l'heure de départ du train est celle où le message « train à quai » disparait. La Figure 48 présente deux distributions, celles des temps de parcours de Nation vers Auber pendant l'heure de pointe du matin (7h00 à 9h00) et celles des temps à quai en heure de pointe du matin pour les stations de Nation, Gare de Lyon, Châtelet, Auber et Charles de Gaulle-Etoile.

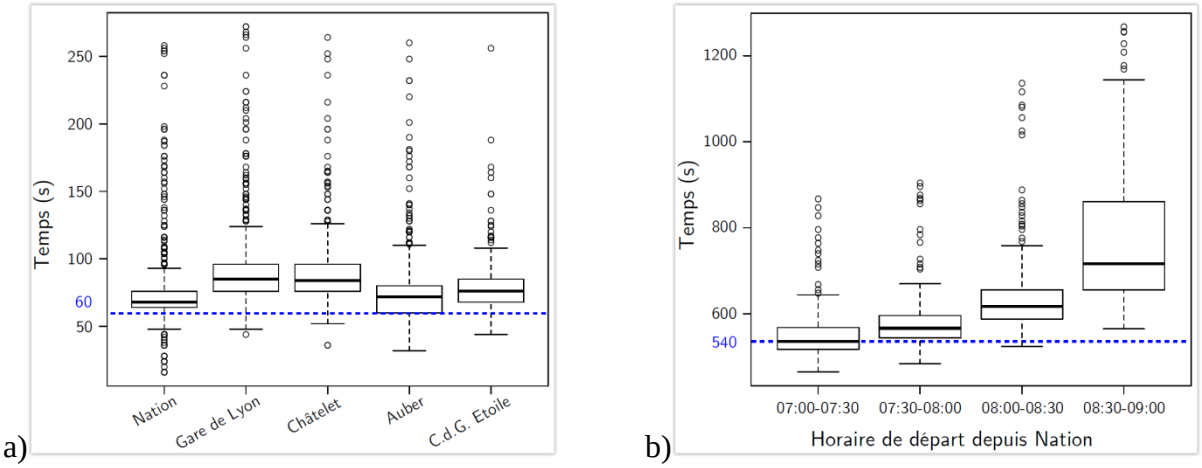


Figure 48 : distribution du temps de trajet de Nation vers Auber pendant l'heure de pointe du matin (a) et distribution du temps d'arrêt du train à quai sur une journée pour 5 stations sur tronçon central du RERA

Premièrement, la moyenne et la dispersion autour de la moyenne de la distribution des temps de parcours augmentent avec l'heure de départ à Nation. Les retards s'accumulent pendant toute la période de pointe du matin, augmentant ainsi le temps de trajet. La plus grande dégradation est observée entre 8h30 et 9h00. Pendant les deux mois d'observation, tous les trains avaient un temps de parcours supérieur au temps planifié par l'opérateur (540s) durant la période de 8h30 à 9h00. La moitié de ces trains ont parcouru le tronçon Nation-Auber en plus de 700s. Les autres stations du RER A présentent des distributions comparables. Deuxièmement, les temps à quai des trains des lignes non-automatisées sont influencés par les temps de montée et de descente des passagers et l'interaction entre ces deux flux. La valeur moyenne du temps à quai est maximum pour les stations Gare de Lyon et Châtelet. Elles sont toutes deux, des plaques tournantes importantes. Châtelet est connecté à la ligne B du RER et Gare de Lyon au réseau de trains régionaux et nationaux. Pour assurer une fréquence de 30 trains/heure, le temps à quai doit être inférieur à 60s. Ce n'est pas le cas en heure de pointe sur la ligne A. L'analyse statistique des temps de parcours et des temps à quai en heure de pointe les jours ouvrés, révèle les difficultés d'exploitation de la ligne s pour maintenir les objectifs d'opération. Les effets de la congestion sont très visibles en heure de pointe lorsque la demande excède l'offre. En conséquence, les quais sont surpeuplés, donc

des temps à quai trop importants pour assurer la fréquence cible. Le flux des trains diminue, réduisant l'offre et creusant l'écart entre offre et demande.

2.1.2 **Des besoins pour l'exploitation de la ligne A**

Le paragraphe précédent illustre les problèmes actuels d'exploitation de la ligne A du RER. Plusieurs solutions ont historiquement été mises en place pour améliorer la Qualité de Service de la ligne et pallier à la congestion de la ligne en heure de pointe. Ces différentes solutions se concentraient autour d'un objectif commun : augmenter le flux de voyageurs transportés pour répondre à la demande. Pour ce faire, trois actions ont été envisagées :

- augmenter la fréquence de trains ;
- reporter le flux vers des itinéraires alternatifs en créant de nouvelles lignes ;
- augmenter la capacité du matériel roulant

A l'origine, la ligne A du RER a été développée pour réduire la saturation des autres lignes de l'axe est-ouest de Paris. Victime de son succès, la ligne a dû faire face, quasiment dès son ouverture, à une surcharge chronique aux heures de pointe. Les solutions mises en œuvre pour maintenir un niveau de Qualité de Service satisfaisant, furent successivement, la mise en place du SACEM (Système d'Aide à la Conduite, à l'Exploitation et à la Maintenance), le prolongement de la ligne 1 du Métro en 1992 puis la mise en place de trains à deux niveaux. En effet, en 1989, le SACEM a permis d'augmenter le nombre de trains en circulation simultanée en réduisant l'intervalle minimal entre les trains à 2 minutes voire 90 secondes pour les trains courts, en maintenant un temps d'arrêt en gare cible de 50s[19]. Le temps d'arrêt en gare est un point critique pour assurer la fréquence cible. Ainsi, pour faciliter la montée/descente en station, des trains à deux niveaux avec des plateformes d'échange plus larges sont mis en circulation en 1997 (GEORGES, 2003). Ces mesures furent renforcées par la création des lignes 14 du Métro en 1998 et de la ligne E du RER en 1999 puis par la généralisation progressive des matériels roulants à deux niveaux (MI 2N) à la demande du président du STIF en 2008 dans le but d'accroître la capacité et améliorer la régularité de la ligne. Mais ces nombreux investissements n'ont fait que retarder la saturation totale de la ligne. En effet, à l'est de la région Ile de France, des secteurs résidentiels ne cessent de s'étendre. Parallèlement, l'expansion des bassins d'emploi se poursuit à l'ouest à l'image du quartier d'affaires de la Défense. Le 6 juin 2012, le conseil du STIF approuve le schéma directeur qui propose de retenir un scénario global d'amélioration de la ligne à court, moyen et long terme (STIF, 6 juin 2012). Les principaux axes d'amélioration de ce schéma porte sur :

- Le fonctionnement de la ligne par la création d'un centre de commandement RFF, SNCF et RATP envisagée à terme, la mise en place d'un dispositif de « pilotage automatique », la suppression de la relève systématique des conducteurs à Nanterre-Préfecture et l'accélération du renouvellement et de la modernisation du réseau.
- L'information destinée aux voyageurs (remplacement d'écrans dans les gares RATP).

[19] http://www.symbioz.net/index.php?id=43

- L’offre de transport avec des modifications concernant les débuts des horaires d'été qui seront plus tardifs et des prolongements de trains notamment sur la branche Marne-la-Vallée.
- La qualité de service au niveau de la désaturation, les accès aux quais et les flux dans certaines gares, de la rénovation des gares à fort trafic le nécessitant, et l'amélioration de la propreté des trains.

Ainsi, nous proposons de construire des indicateurs de qualité de service à partir des données de signalisation.

2.2 Indicateurs de qualité de service

Comme nous avons vu dans la première partie, la qualité de service est une des préoccupations essentielles, notamment au travers des recommandations portées par Le rapport (QUINET, 2013). L'intérêt pour la qualité de service est porté autant par les usagers des systèmes de transport en commun que par les opérateurs et les autorités organisatrices. Néanmoins, ils ne partagent pas la même vision de la qualité de service. En effet, à l’échelle d’un trajet, les usagers sont principalement concernés par le confort individuel ressenti et les retards. A une échelle temporelle supérieure, ils considéreront des indicateurs agrégés comme la fiabilité ou encore la disponibilité, la pertinence et la précision de l‘information en temps réel. Les opérateurs, et particulièrement les opérateurs ferroviaires, sont essentiellement intéressés par la conformité des horaires des trains qui peut être assez éloignée de la conformité aux horaires perçue par les usagers. Quant aux autorités organisatrices, elles sont de plus en plus demandeuses d’indicateurs qui sont le reflet de l’expérience à bord des passagers. Ainsi, les critères de confort, de retard et de fiabilité font partie du manuel référence de la Qualité de Service des systèmes de transport en commun, le TCQSM (TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM, 2003). Dans ce cadre, nous présentons dans ce paragraphe, une estimation d’indicateurs de qualité de service reflétant l’expérience des usagers à bord des trains, la densité de passager par train et les variations du temps de trajet.

2.2.1 Indicateur de densité de passagers par train

Nous avons construit un estimateur de la probabilité d’avoir une mesure au niveau d’une station dans le paragraphe 1.3.2.3. En reprenant, les notations de ce paragraphe, nous estimons le taux d’occupation d’un train $\tau_{s,t}$ circulant entre deux stations consécutives s^- et s de la manière suivante :

$$\tau_{S,T} = \frac{n_{T,S}}{\alpha * K_T * P_{95}(s) * P_{95}(s^-)} \quad (20)$$

avec α la part de marché d'Orange en 2011, soit 49.9% avec les MVNO[20] et K_T la capacité du train T relevé par l'équipe terrain. Nous traçons ce taux de charge inter-station pour chaque train ayant circulé dans le sens Est-ouest de 07h15 à 9h00 le jeudi 7 octobre. Nous reprenons les niveaux de confort présentés au paragraphe 1.3.1.1. Ils se distinguent sur la Figure 49 par l'épaisseur du trait. Ces résultats sont cohérents avec les observations à quai pour plus de 80% des segments inter-station représentés ici.

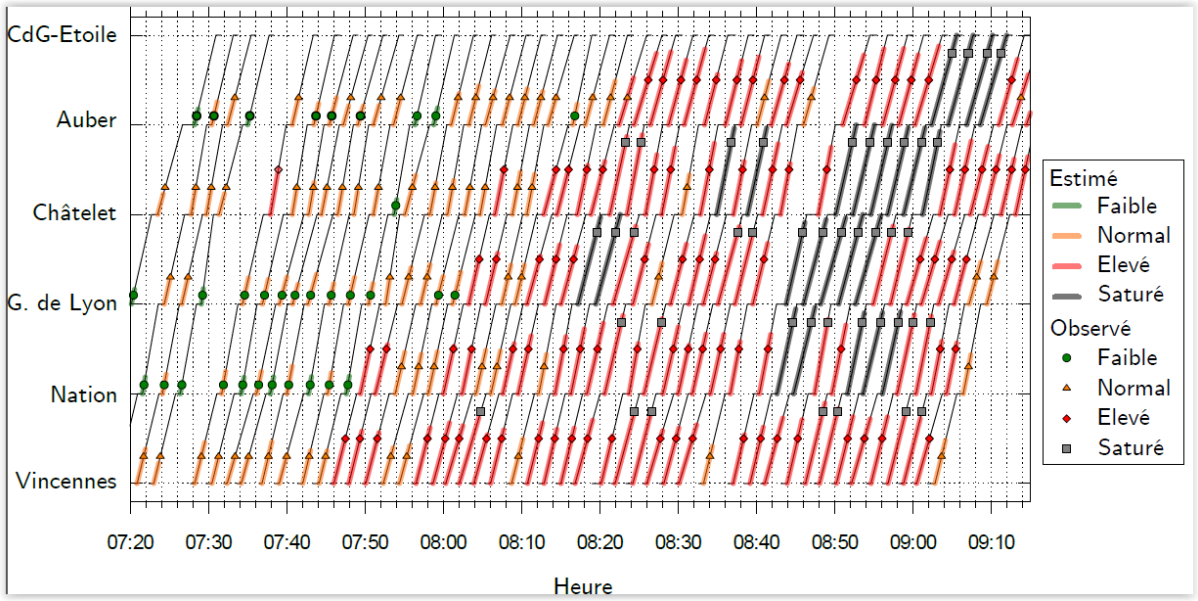


Figure 49 : estimation du taux de charge des trains circulant de Vincennes vers Charles-de-Gaulle-Etoile pendant l'heure de pointe du matin le 7 avril 2011

Cet indicateur de taux d'occupation des trains pour chaque tronçon de la ligne permettrait à l'opérateur de maintenir sa fréquence cible en réduisant les temps de montée/descente des rames. En effet, plus les rames sont chargées, plus le temps d'arrêt à quai se prolonge en raison des flux d'embarquement et de débarquement. Une utilisation appropriée de l'information destinée aux voyageurs en recommandant d'attendre le prochain train en cas de surcharge permettrait la régulation des flux d'embarquement, la réduction du temps à quai, et donc la régularité des trains. Une conséquence directe est l'amélioration du confort ressentie par les usagers voyageant dans les trains moins chargés. Les autorités organisatrices ont des besoins concernant la perception qu'ont les usagers de critères comme le confort. Nous nous intéresserons dans le chapitre suivant à la manière dont le confort connu à priori par l'usager impacte ses choix d'itinéraire.

[20] http://www.orange.com/fr/content/download/2907/26687/version/2/file/DDR2011_FR.pdf

2.2.2 **Indicateur de fiabilité**

Pour construire un indicateur de fiabilité de la ligne A, il s'agit d'estimer le retard des trains pour toutes les paires de stations en comparant les temps de trajet mesurés avec les temps de trajet ciblés par l'opérateur. A titre d'exemple la Figure 50 présente la variation des retards au cours de la journée du 7 avril 2011 pour la ligne A de Vincennes à Charles de Gaulle-Etoile pour les deux sens de parcours. L'abscisse correspond à l'heure de départ de la station. On observe un retard compris entre 0 et 5 minutes la majorité de la journée pour les deux sens de parcours de la ligne. Néanmoins, de 17h00 à 23h00 dans le sens Charles de Gaulle-Etoile vers Vincennes et de 19h00 à 23h00 dans le sens inverse, on observe un retard supérieur à 5 minutes atteignant des pointes de 15 minutes. Apparait également sur cette figure, la densité de retards des passagers. Elle correspond au retard multiplié par la densité de passagers sur la ligne. Les maxima sont atteints en heure de pointe au départ de Vincennes le matin et au départ de Charles de Gaulle-Etoile le soir. Cet indicateur permet de rendre compte de l'impact des retards. Pour l'opérateur, il permet l'analyse des causes des retards grâce à d'autres indicateurs comme la densité des trains et/ou par la connaissance de difficultés d'opération localisées spatialement et temporellement comme des incidents techniques.

Pour les autorités, la densité de retard passagers permet d'accéder à la quantité de passagers expérimentant des retards et à la façon dont est perçue la fiabilité du réseau de transport par la majorité des usagers.

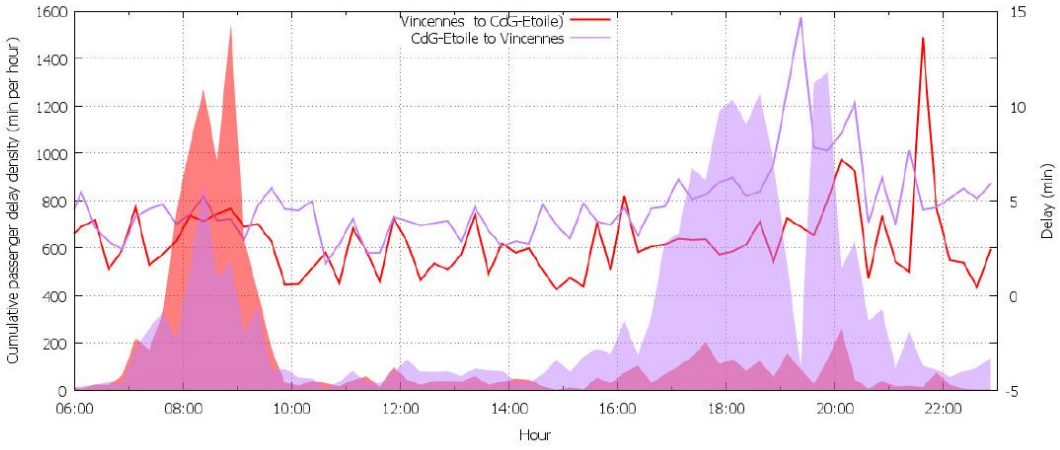


Figure 50 : Densité de retard cumulé sur le trajet entre Vincennes et Charles-de-Gaulle-Etoile sur la journée du 7 avril 2011

2.3 Indicateur de volume de trafic par paire de stations et confrontation avec une source billettique

Un autre indicateur de Qualité de Service intéressant est le flux de passagers écoulé par paire Origine-Destination. Cet indicateur est traditionnellement estimé par l'Autorité Organisatrice à partir des données de validations billettiques. Dans ce paragraphe, nous proposons de construire cet indicateur à partir des deux sources de données afin de comparer les résultats obtenus. Cette confrontation sera faite au travers de la mesure du débit horaire des mesures brutes, de l'estimation des temps de parcours pour aboutir à l'indicateur de volume. Par la suite, nous utiliserons le terme « évènement » aussi bien pour le déclenchement d'un message de signalisation **LAUN** que pour les validations détectées par le système billettique. Nous préciserons alors seulement la nature de la source de capture de l'évènement.

2.3.1 Comparaison des débits horaires

Tout d'abord comparons les débits horaires d'évènements pour les deux systèmes de capture pour chacune des stations. Précisons qu'il s'agit du débit horaire d'évènements bruts mesuré via les systèmes de capture et non le débit de voyageurs. En effet, le débit mesuré par le système radio-mobile représente le nombre d'événements **LAUN** vers les cellules souterraines qui couvrent la station et qui se sont produits sur une plage horaire de 15 minutes (trait fin de la Figure 51). Ces **LAUN** peuvent se produire pour l'ensemble des situations de mobilité suivantes : un voyageur entre dans le système de transport au niveau d'une section souterraine, un voyageur se situe aux environs d'une station à bord d'une rame ou un voyageur est présent dans la station (quai, tunnels piétons). Le débit mesuré par le système billettique représente le nombre d'événements de validation aux barrières de péages du système de transport sur une plage horaire de 15 minutes (trait gras de la Figure 51). Une validation correspond aux situations de mobilité suivantes : entrée dans le RER depuis l'extérieur ou depuis le Métro, sortie du RER et entrée dans le Métro.

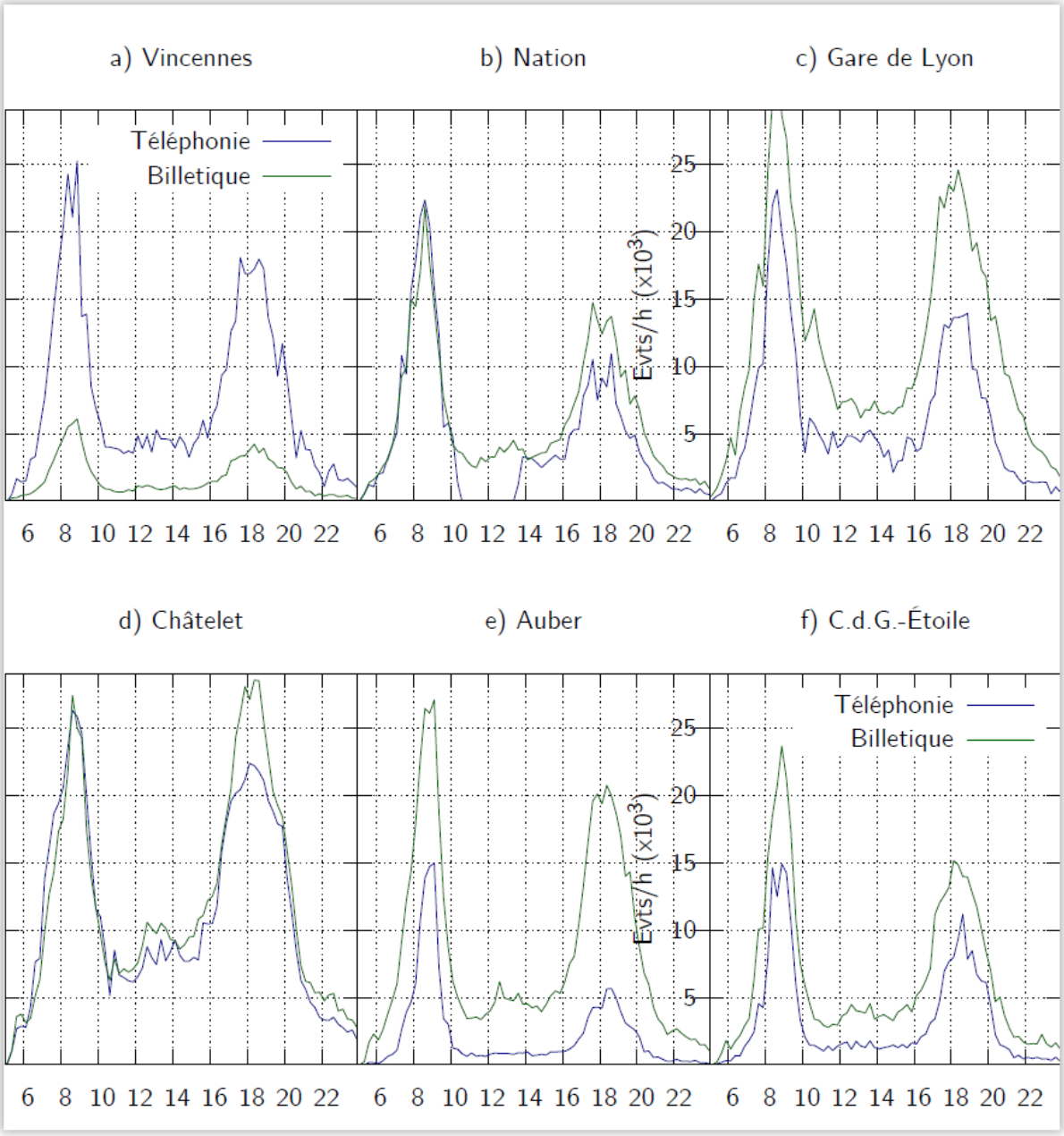


Figure 51: débit de collecte des données de signalisation et des données de billettiques par station

Pour chacune des stations du tronçon central, les variations du débit horaire fluctuent simultanément pour les deux systèmes de capture. Nous concluons que nous observons bien le même phénomène pendulaire avec les deux systèmes. Le coefficient de proportionnalité inter-système varie d'une station à l'autre et avec le moment de la journée. En effet, nous avons vu dans le paragraphe précédent que le « taux de capture » du système mobile dépend de la station considérée, du moment de la journée et du sens de parcours de la ligne. Le débit nul mesuré avec le système de capture mobile à Nation entre 12h et 14h est dû un problème de remontées de la signalisation pendant cette période. Il existe donc un coefficient de proportionnalité entre les volumes des deux méthodes de capture. Il est propre à chaque

station et varie dans le temps. Si l'on parvenait à estimer ce coefficient, il serait alors possible d'accéder à un débit estimé de voyageurs en appliquant la méthode développée pour le redressement des sources billettiques. Le redressement des captures billettiques dépend des biais technologiques de capture, du taux de pénétration des abonnements avec cartes à puce et du taux de fraudes.

2.3.2 **Analyse des temps de parcours**

Les deux systèmes de captures ont permis de constituer suffisamment de trajectoires entre paires de stations pour estimer la distribution des temps de parcours entre ces paires de stations le matin. La construction des trajectoires mobiles est faite à partir des **LAUN** vers deux stations souterraines en choisissant la plus courte distance temporelle dans le cas de répétition d'évènement au niveau d'une même station. On mesure alors majoritairement le temps de trajet à bord du train additionné du temps d'accès au quai et du temps d'attente du train. Cependant, la présence de **LAUN** additionnels en cours de trajet fait que l'on peut également mesurer le temps de parcours du train uniquement.

La construction des trajectoires billettique se fait entre deux validations, c'est-à-dire entre une entrée et une sortie du système de transport (sortie de RER). Ainsi, le temps de parcours mesuré comprend le temps d'accès au quai depuis la barrière de péage, le temps d'attente du train, le temps de parcours du train entre les deux stations et le temps d'accès à la barrière de péage depuis le quai. La Figure 52 montre la densité de la distribution des temps de trajets estimés par les deux systèmes de capture pour la matinée du 13 octobre 2011 pour deux paires de stations (Vincennes, Charles de Gaulle-Etoile) et (Nation, Auber).

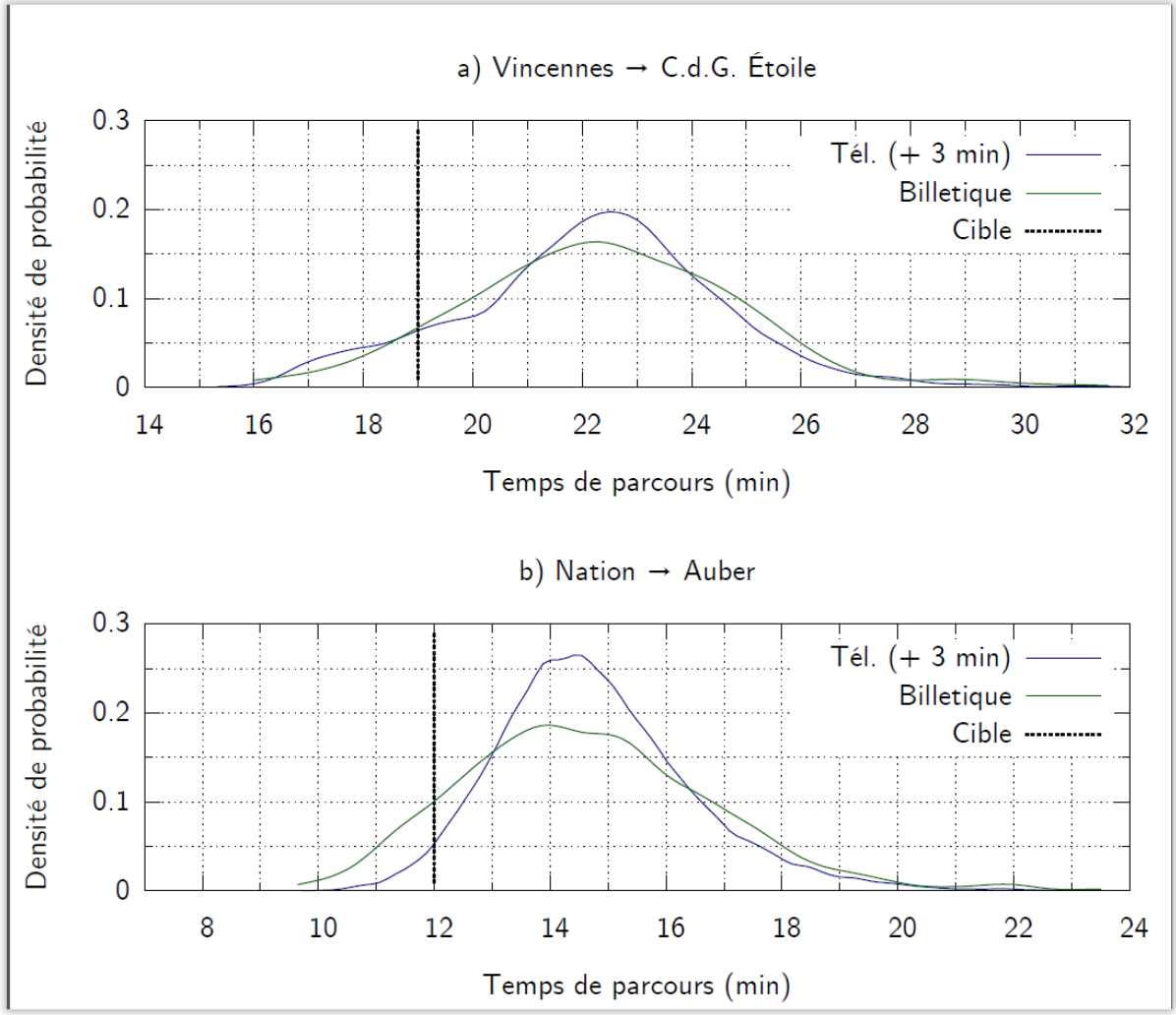


Figure 52 : distribution des temps de parcours par tranche de 30 minutes

On observe des densités similaires lorsque l'on ajoute 3 minutes à la distribution des temps de parcours des mobiles. Cette différence de 3 minutes correspond au temps d'accès moyen pour un piéton de l'extérieur de la station au quai. Selon la configuration des stations, ce temps d'accès aux quais varie. Cette valeur est utilisée par l'opérateur sur son site pour les simulations de temps de parcours (Figure 53 et Figure 54).

Figure 53 : Résultat d'une simulation de temps de parcours pour un trajet de Nation vers Auber un jeudi matin (06/03/14) réalisée sur le site de l'opérateur RATP

Les extremums de la distribution des temps de trajets observés sont très proches des durées totales annoncées par l'opérateur en heure de pointe un jour ouvré moyen, soit 22 minutes pour Vincennes vers Charles de Gaulle-Etoile et 16 minutes pour Nation vers Auber. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du trajet Vincennes vers Charles de Gaulle Etoile. Nous remarquons que les valeurs de temps de trajet estimées à partir des données radio-mobile coïncident avec la source billettique et les durées annoncées par l'opérateur lorsque l'on ajoute 3 minutes. Elles sont donc augmentées d'un temps d'accès ou d'évacuation des plateformes et non de la somme d'une durée d'accès et d'une durée d'évacuation. Nous pouvons formuler deux hypothèses. Soit notre système de capture est calibré sur les mêmes instants de déclenchement d'évènements que la source billettique et la majorité des trajets observés ont une seule extrémité correspondant à une entrée/sortie du système. Soit la majorité des déplacements est composé d'une entrée et d'une sortie du système (RER) et les moments de déclenchement des évènements sont retardés par rapport au système billettique. Il semble en toute vraisemblance qu'il s'agisse d'une composition des deux hypothèses dont la pondération fluctue avec le couple de station et le moment de la journée.
Les temps de trajet objectifs de l'opérateur sont tracés en pointillés sur la Figure 52. On observe que plus de 80% des usagers dont on a capturés une trajectoire ont vu leur temps de trajet supérieur au temps cible de l'opérateur. Pour plus de 40%, la durée du trajet a été allongée de 20% par rapport au temps cible.

Figure 54 : Résultat d'une simulation de temps de parcours pour un trajet de Vincennes vers Charles-de-Gaulle-Etoile un jeudi matin (06/03/14) réalisée sur le site de l'opérateur RATP

2.3.3 Estimation du flux de voyageurs sur le tronçon central

Nous souhaitons comparer le flux de voyageurs à destination de La Défense estimé à l'aide des deux systèmes de capture. Or, ce flux de voyageurs circulant sur la ligne A est composé de trois segments d'usagers :

- ***Segment 1*** : les voyageurs dont la station d'entrée S_{inRERA} dans le système de transport est une station du RERA et la station de destination $S_{outRERA}$ appartient à la ligne A du RER.
- ***Segment 2*** : les voyageurs dont la station de destination $S_{outRERA}$ est une station de la ligne A et dont la station d'entrée S_{in} est une tout autre station du système de transport (Métro et RER). Ils ont rejoint la ligne A par une connexion au niveau d'une station $S_{conRERA}$ appartenant à la ligne A du RER.
- ***Segment 3*** : les voyageurs dont la station de destination $S_{outRERA}$ n'est pas une station du RERA et dont la station d'entrée peut être n'importe quelle station.

Le dernier segment d'usagers ne peut être mesuré à partir du jeu de données du 13 octobre 2011 car nous n'avons pas collecté tous les évènements qui se sont produits au niveau des cellules qui couvrent toutes les sorties de souterrain de Paris. Notre périmètre de collecte était borné à la zone de couverture des périmètres de sorties des stations du tronçon central du RERA uniquement. Pour produire des estimations de flux correspondant aux usagers des segments 1 et 2, des étapes préliminaires sont nécessaires au traitement des évènements capturés via le système radio-mobile. Tout d'abord, nous devons définir les cellules aériennes à associer à $S_{outRERA}$. Ensuite, nous proposons une méthode naïve d'affectation des flux sur la ligne A pour prendre en compte les segments d'usager 1 et 2.

Enfin, nous pourrons confronter le flux de voyageurs vers la station La Défense estimés à partir des deux sources de données datées du 13 octobre 2011 : l'ensemble des évènements de signalisations de type LAUN et les validations billettiques.

2.3.3.1 Définir les cellules associées à $S_{outRERA}$

Les sections souterraines du système de transport sont couvertes par des antennes dédiées aux plateformes et aux portions de tunnels adjacentes. Le « territoire mobile » au niveau des portions aériennes n'a pas été dimensionné de la même manière, comme on l'observe sur la Figure 55, qui montre la simulation de la couverture par les antennes 2G-900MHz du périmètre de la Défense.

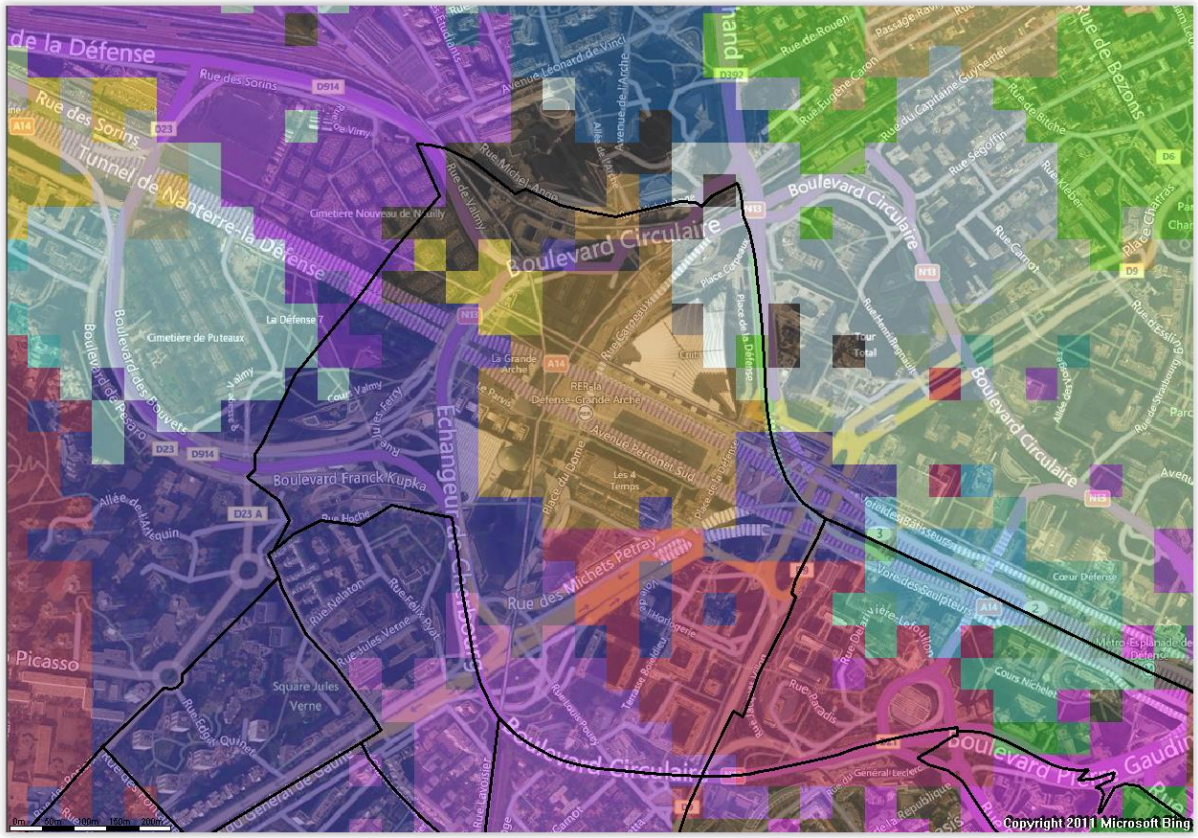


Figure 55 : simulation de la couverture radio (2G 900MHz) à 50m autour de la partie aérienne de la station La Défense (au centre)

Il faut alors définir l'ensemble des cellules que nous associerons à $S_{outRERA}$ au niveau de La Défense. Nous exploiterons la méthode proposée dans le paragraphe 1.3.2.4. Alors, nous avons observé l'ensemble des mobiles qui ont déclenché au moins un LAUN au niveau des cellules souterraines qui couvrent la station de La Défense puis qui ont généré d'autres LAUN aux niveaux de cellules dont la couverture s'étend aux alentours des sorties de la station dans un périmètre temporel de 3 minutes après le dernier LAUN en souterrain. Ce

périmètre temporel de 3 minutes correspond aux temps d'accès piéton moyen entre une plateforme et la sortie du système de transport utilisé par l'opérateur dans ces estimations de temps de trajet. 95% des mobiles du jeu de données du 13 octobre 2011 qui ont produit un évènement en extérieur autour de la station de La Défense, ont également généré des LAUN en souterrain. Alors, l'ensemble des cellules aériennes qui vérifient ces conditions de déclenchement d'évènements, constituent le voisinage immédiat de sortie de La Défense et font partie de $S_{outRERA}$. Par la suite, tout mobile repéré dans une section souterraine du système de transport qui va déclencher un LAUN au niveau des cellules du voisinage aérien proche de La Défense, aura la destination de son trajet affecté à cette station.

2.3.3.2 Méthode naïve d'affectation des flux de mobiles sur la ligne A

Selon le système de capture, les stations S_{inRERA}, $S_{conRERA}$ et S_{in} sont définies de manières différentes. Pour le système de capture billettique, S_{inRERA} et $S_{conRERA}$ correspondent à la station de la ligne A où se produit la validation précédent la validation à La Défense pour le segment 1 d'usagers et les usagers du segment 2 dont S_{in} est une station de Métro. Le jeu de données fourni pas le STIF ne contient que les événements de validations pour la ligne A du RER et la ligne 1 du Métro. Alors, nous ne pourrons inclure dans les flux mesurés, les usagers qui se sont connectés à la ligne A depuis la ligne B au niveau de Châtelet, depuis la ligne E au niveau d'Auber ou depuis la ligne D au niveau de Gare de Lyon.

Pour le système de capture basé sur les événements de signalisation, on considéra 2 **LAUN**, un premier déclenché au niveau de la station Origine et un deuxième déclenché au niveau de la station Destination (dans notre cas il s'agit de La Défense). Le **LAUN** de destination se produit vers une des cellules extérieures couvrant le voisinage proche des bouches d'entrée/sortie de la station la destination $S_{outRERA}$ (voir 3.3.3.1). Tandis que l'événement de destination billettique est précédé d'un seul événement, voire de deux dans le cas d'une connexion via le Métro, le nombre d'événements **LAUN** qui précèdent le **LAUN** de destination est variable en raison du nombre de transition extérieur/souterrain de l'itinéraire et des conditions qui produisent des **LAUN** supplémentaires. Ainsi, nous considérons l'événement **LAUN** d'origine comme celui qui offre le plus grand écart temporel avec le **LAUN** de destination sans que cet écart ne dépasse 1h. Alors, S_{inRERA} et S_{in} correspondent à la station de la ligne où se produit ce **LAUN** d'origine. La définition de S_{in} pour le système de capture mobile dans le cas où S_{in} n'est pas une station souterraine est modifiée pour que S_{in} soit la station d'entrée dans le réseau souterrain. Rappelons que la majorité des stations du système de transport de Paris intra-muros sont souterraines. Dans le cas d'une connexion avec la ligne A, nous devons déterminer au niveau de quelle station cette dernière s'est produite. Notons s* l'estimation de $S_{conRERA}$ et t_m le temps de trajet entre S_{in} et $S_{outRERA}$. Nous estimons s* comme celle qui produit l'écart quadratique minimum avec le temps de trajet t_m (voir Equation 21).

$$s^* = \underset{s}{\arg min}\{ (t_m - t_{mbis})^2 \} \text{ (Équation 21)}$$

$$tel\ que\ t_{mbis} = \left[\ t_{o,s}(o.h) + t_{s,d}\left(o.h + t_{o,s}(o.h)\right)\right] \text{ (Équation 22)}$$

$avec\ \ t_{o,s}(o.h)$ *le temps de trajet de o vers s pour une heure h de départ de o*
$avec\ t_{s,d}\left(o.h + t_{o,s}(o.h)\right)$ *le temps de trajet de s vers d pour une heure de départ de s qui correspond au moment de départ de o additioné au temps de parcours de o vers s*

Les trajets retenus sont ceux pour lesquels l'écart relatif entre le temps de trajet t_m et le temps de trajet t_{mbis} - en passant par s*- ne dépasse pas un seuil que nous avons arbitrairement fixé à 10%. Lorsque la condition de seuil est vérifiée pour s*, le trajet est associée à la paire Origine–Destination (s*, d), sinon le trajet est écarté. Il s'agit d'une affectation tout ou rien qui suffit dans le cas de l'approche naïve proposée ici. Néanmoins, une amélioration de la méthode passerait par l'utilisation de modèle logit à choix discret parmi un ensemble d'alternatives de stations de connexion.

L'affectation des stations d'origine se trouvant en dehors du tronçon central du RERA des usagers du segment 2 à des stations de connexions avec cette méthode a permis de construire les volumes de voyageurs présentés dans le paragraphe suivant.

2.3.3.3 Estimation des flux de voyageurs à destination de La Défense

Le choix de la destination vers le quartier d'affaire de La Défense assure un motif de déplacement de nature « travail ». De plus, la station de La Défense n'offre que deux connexions (ligne 1 du Métro et tramway). Ainsi, il est plus probable d'observer des sorties de la ligne A que des connexions. La Figure 56 présente le flux voyageurs estimés vers la Défense pour différentes origines de la ligne A pendant la matinée du 13/10/2011. Ces origines peuvent être des connexions. La figure montre le flux estimé depuis les validations billettiques et depuis les **LAUN**. En moyenne sur la matinée, le ratio entre le nombre de mobiles et le nombre de cartes est égal à 52%. Cette valeur est supérieure à la part de marché de l'opérateur Orange à date d'octobre 2011. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce résultat. Tout d'abord, les usagers qui se connectent à la ligne A depuis les RERE, RERD et surtout RERB ne sont pas pris en compte dans le système de mesure billettique. Ensuite, les excursionnistes vers la Défense ne se sont pas mesurés par le système billettique car ils ne possèdent pas d'abonnement. Enfin, la part de marché de l'opérateur Orange au niveau des abonnés travaillant à La Défense pourrait être supérieure à la moyenne nationale en raison de forte concentration de travailleurs de statut cadre supérieur.

Toutefois, pour chacune des tranches horaires matinales, les flux mesurés à l'aide des deux systèmes de captures sont proches. Néanmoins, certaines variations des flux de cartes ne se produisent pas au niveau de flux de téléphones. En effet, le volume total de voyageurs vers la Défense estimés à partir des cartes d'abonnement pendant la deuxième moitié de l'hyperpeak (9h00-9h30) est supérieur à celui de la première moitié (8h30-9h00). On observe l'inverse pour les téléphones. Cela vient-il des comportements du segment de voyageurs de type excursionniste ? De plus, le ratio des 50% est largement dépassé lorsque Châtelet est

l'origine. Ceci illustre l'impact des données billettique partielles dont nous disposons. La ligne B est la seconde ligne la plus chargée du Réseau Express Régional.

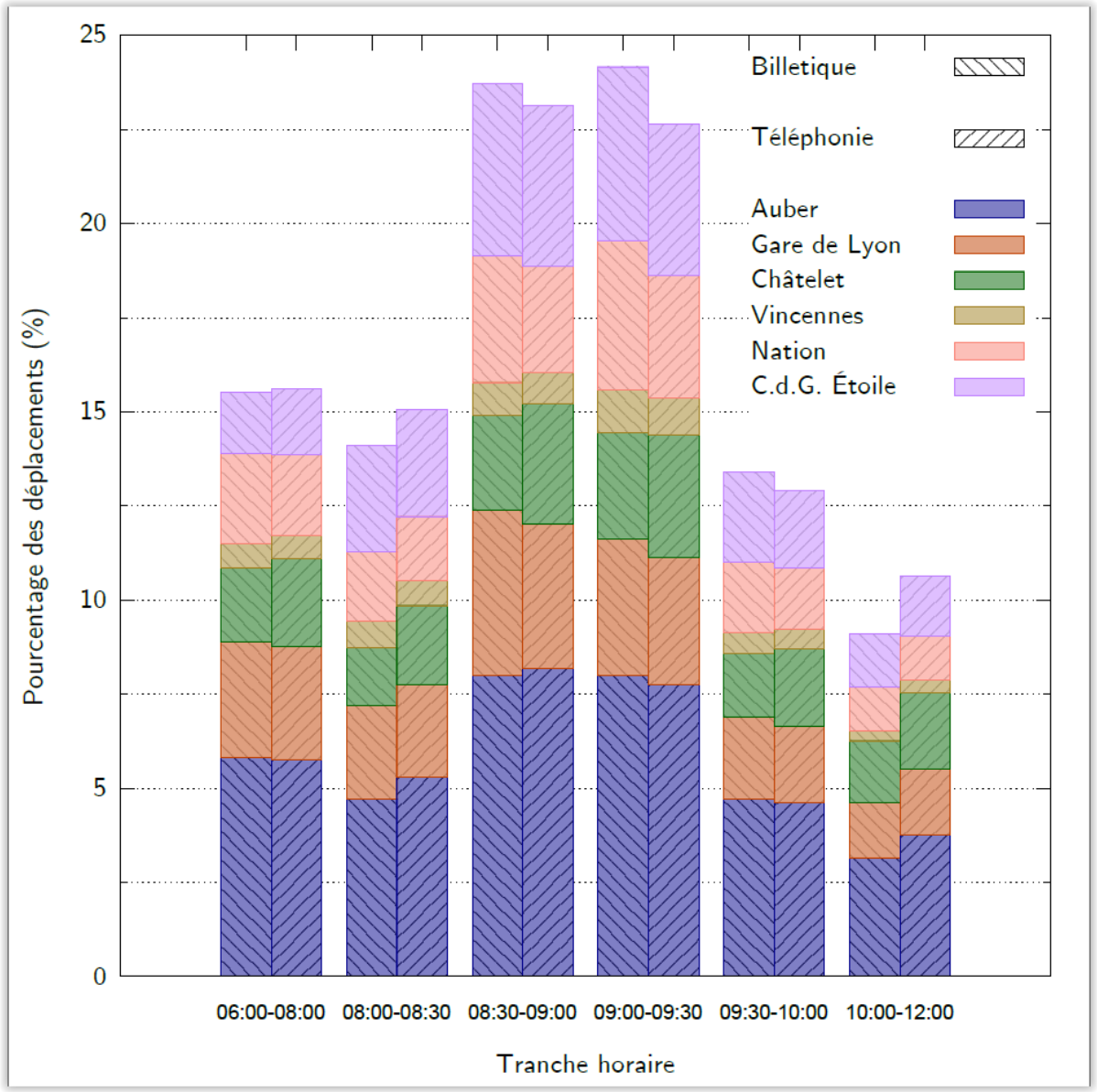


Figure 56 : estimation du flux de voyageurs à destination de la Défense pour différentes origines de la ligne A pendant la matinée du 13/10/2011 à partir des données billettique et des données de signalisation

3 Conclusion

Nous avons montré la consistance d'une source de données provenant de la signalisation des réseaux mobiles dans un cadre d'application particulier. Les tendances prédominantes des déplacements observées à partir des **LAUN** sont cohérentes avec celles mesurées par d'autres sources. Les variations entre les résultats produits proviennent majoritairement de biais introduits par une composition des échantillons qui varie de manière indépendante pour chacune des sources dans le temps et dans l'espace. En effet, le taux de pénétration des mobiles est connu à l'échelle d'un pays et même d'une région. Toutefois, les variations locales de ce taux introduisent des biais à quantifier. Ce constat s'applique également pour les systèmes billettiques car la proportion d'abonnements par carte dépend à la fois des Origine-Destination et du moment de la journée. Cela annonce un exercice de redressement par strate.

Un autre avantage de ces méthodologies basées sur la signalisation des mobiles vient du fait que ce système de mesure de déplacement repose sur un réseau de capture déjà déployé par les opérateurs de télécommunications pour leurs besoins propres. Il s'agit donc d'une méthodologie de collecte indépendante des opérateurs de transport qui va dans le sens du partage des informations auprès des différents acteurs de l'offre et de la demande de transport. De plus, les échantillons d'usagers enquêtés sont conséquents car il s'agit du nombre d'abonnés de chaque opérateur et des roamers autorisés. Cela permet l'observation de comportements subtils et inaccessibles lorsque les tailles d'échantillons sont trop réduites. La disponibilité en temps réel et en divers points le long d'une trajectoire dans un réseau de transport en commun présente un avantage par rapport au système billettique. Ces observations fines spatialement et temporellement portent aussi bien sur l'agrégation de trajectoires individuelles qui permet de produire des volumes de trafic par Origine-Destination cohérents à ceux estimés par les données de billettique ainsi que des densités de passagers au niveau d'une rame au travers de l'observation des trajectoires des trains qui sont plus délicates à approcher par des systèmes de captures « fixes » (voir chapitre 4 paragraphe 1.2).

Ainsi, il est possible de produire des indicateurs de qualité de service du point de vue des usagers qui seront utiles aux acteurs de l'offre pour adresser des problématiques d'exploitation ou de planification. D'une part, les mesures spatio-temporelles fines réalisables à partir des remontées d'évènements de signalisation permettent à l'opérateur de gérer de manière dynamique la charge de son réseau en optimisant son information dédiée aux voyageurs et/ou d'autres actions concernant son plan d'opération. Par exemple, un affichage de la densité de passagers présents à bord des trains dans les stations permettrait d'inciter les usagers à patienter pour monter dans un train moins chargé et ainsi réduire les temps de montée/descente extrêmement impactant en période de charge. Et d'autre part, ce système de capture permettrait d'analyser des phénomènes transitoires peu étudiés comme le comportement des usagers lors de perturbations ou encore les facteurs qui influencent les processus de choix d'attributs des déplacements telle que la variation temporelle du taux de charge apprise et perçue par l'usager. L'accès à l'estimation de telles grandeurs engendrerait

des progrès significatifs dans la conception et la calibration des nouvelles générations des modèles d'affectation pour les Transports en Commun. Le chapitre suivant sera en partie consacré à l'analyse et la quantification des variables explicatives des comportements de déplacements dans un système de transport en commun. L'autre partie du chapitre suivant traitera de la mesure des déplacements pour d'autres motifs que « domicile-travail » en se plaçant sur un « territoire mobile » générique.

Conclusion de partie

A l'issue de cette deuxième partie, nous avons montré l'intérêt d'exploiter une source de données radio-mobiles sous deux angles. D'une part, en s'appuyant sur un état de l'art des méthodes de mesures de déplacements à partir d'enquêtes passives ou actives, nous avons pu dégager les caractéristiques intéressantes qui répondraient aux besoins des évolutions de la modélisation depuis les fondements théoriques des processus de signalisation inhérents aux réseaux mobiles. D'autre part, l'exercice de construction d'indicateurs de qualité de service dans un réseau de transport en commun et la comparaison des estimations résultantes de deux méthodologies de traitement de source passive, la signalisation et les données billettiques, encouragent la poursuite des investigations.

En effet, les sources numériques offrent de nombreux avantages par rapport aux sources traditionnelles statiques en terme de coût, de mise en œuvre, de fréquence de renouvellement des enquêtes et de finesses spatiales et temporelles accessibles. De plus, l'analyse des messages de signalisation propose un ensemble de traces géolocalisées et horodatées porteuses d'informations contextuelles d'usage des réseaux qui semblent répondre aux problématiques posées dans la première partie en terme de description des comportements grâce à la finesse temporelle et spatiale des mesures, mais également à la possibilité d'une acquisition dynamique.

Nous avons choisi comme premier exemple d'étude, un périmètre particulier du point de vue du « territoire mobile » et de ses relations avec le « territoire géographique ». Cela nous a permis de valider une première approche méthodologique construite sur des conditions spécifiques à l'environnement de couverture souterrain du réseau parisien. Nous avons tout de même dégagé des difficultés d'analyse du fonctionnement des mécanismes du réseau mobile dans ce cadre d'application spécifique offrant un déclenchement d'évènement autour d'un « cordon de zone de localisation » qui se superposait idéalement aux transitions des déplacements. Toutefois, les résultats prometteurs d'estimation d'indicateurs de qualité de service, tels que le taux de charge d'un train, la fiabilité perçue par les usagers et les volumes estimés par paire Origine-Destination à une granularité temporelle fine, encouragent les efforts de maitrise de cette solution. En effet, ce système de mesure de déplacement est bâti à partir d'un réseau de capture déjà déployé par les opérateurs de télécommunications qui assure une collecte indépendante des opérateurs de transport assurant un partage équitable des mesures de déplacement auprès des différents acteurs de l'offre et de la demande. De plus, les tailles des échantillons d'usagers enquêtés semblent garantir l'observation de comportements subtils et inaccessibles lorsque les tailles d'échantillons sont trop réduites. Ensuite, nous avons montré que les indicateurs produits, reflètent aussi bien le point de vue des planificateurs, des opérateurs et des usagers. Ces mesures spatio-temporelles fines sont, par exemple, un outil d'intérêt pour les opérateurs pour une gestion dynamique de la charge de son réseau par exemple. Elles permettent également d'enrichir une information aux voyageurs utile pour les usagers. Enfin, il s'agit d'une source dont la capture est au plus proche des usagers facilitant les analyses des phénomènes transitoires peu étudiés comme le

comportement des usagers lors de perturbations ou encore des facteurs qui influencent les processus de choix d'attributs des déplacements tels que le taux de charge appris et perçu par l'usager. Ce sont des variables à fort intérêt au regard des recommandations décrites dans le chapitre 3.

Alors, dans la partie suivante, nous pousserons l'analyse technique d'exploration des potentialités d'une telle source de données vers une étude des facteurs explicatifs des processus de choix des attributs d'un déplacement. De plus, nous sortirons du périmètre particulier des réseaux souterrains pour étudier des déplacements moins analysés et pourtant dont le nombre s'accroit : les déplacements pour motifs loisirs et achats. La disponibilité des captures parait adaptée à l'étude de phénomènes non-récurrents ou avec une récurrence aléatoire qui peuvent s'inscrire dans une dimension spatio-temporelle réduite. Enfin, nous explorerons les volumes de « traces de signalisation », considérés comme des ensembles de données, pour en dégager des éléments initiant des démarches méthodologiques pour lever les limites spatiales et temporelles relatives à l'architecture et au fonctionnement des réseaux de télécommunications.

Partie III : De l'estimation de facteurs explicatifs des déplacements vers de nouvelles perspectives méthodologiques

Introduction

Si les résultats obtenus en partie II valident le potentiel d'utilisation des données de signalisation pour la mesure de déplacements, ils sont en l'état restreints à des mesures physiques sur les flux observés (ex : temps de parcours, volumes origine-destination) et bornés au contexte très particulier du milieu souterrain. Cette dernière partie présente les pistes que j'ai explorées pour aller au-delà. Deux chapitres la composent.

Le chapitre 6 s'intéresse à des facteurs explicatifs ou descriptifs du comportement de mobilité. Il comprend deux cas d'études détaillés qui ont fait l'objet de communications en conférences internationales (MILION, et al., May 2014) (AGUILERA, et al., 2014, April). Nous avons choisi d'aborder l'estimation de facteurs explicatifs ou descriptifs du comportement de mobilité à la fois importants pour la modélisation ou la connaissance de la mobilité et en même temps rarement étudiés car nécessitant d'importants moyens d'enquêtes classiques.

Le premier cas d'étude traite de la quantification du confort ressenti par un usager du réseau de transport public francilien. En restant dans le contexte du milieu souterrain, nous verrons qu'il est possible d'estimer les paramètres d'un modèle de choix d'itinéraire prenant en compte : temps de parcours et confort, et que le paramètre de valeur de confort obtenu est très proche de celui résultant d'une (lourde) étude classique, par préférences déclarées et préférences révélées, commanditée par le STIF.

Le deuxième cas d'étude traite, sur le territoire seine-et-marnais, d'indicateurs de mobilité des personnes, notamment pour les motifs loisirs ou achats. Les difficultés viennent de la sortie du contexte souterrain, de ce que les frontières du « territoire géographique » et du « territoire mobile » ne sont plus en coïncidence immédiate. Le « territoire géographique », support de l'activité humaine, de l'usage du sol et des modes de transport, est divisé en entités administratives. Le « territoire mobile », qui assure les services de téléphonie, est découpé en cellules dont la logique de répartition, à la fois spatiale et technologique (2G, 3G), est celle de l'opérateur : la densité des sites est corrélée à la densité des habitants ; les axes de transport principaux sont servis par des sites dédiés. Dans ce contexte, définir la notion de « déplacement pour un motif achat » est un exercice qui doit être mené avec précaution. Nous verrons comment ultérieurement. La conclusion du chapitre 6 dresse un bilan des enseignements tirés de ces deux cas d'études.

Le chapitre 7 propose des pistes pour améliorer l'appariement entre « territoire géographique » et « territoire mobile », ainsi qu'entre population observée et « ensemble de mobiles observés ». La question de l'appariement entre « territoire géographique » et « territoire mobile » est traitée en étudiant comment le profil d'activité d'une cellule téléphonique est corrélé à l'occupation du sol de la zone géographique de couverture de cette cellule. La question de l'appariement entre population observée et « ensemble de mobiles observés » est traitée par une analyse de la bibliographie et l'identification des travaux

complémentaires à mener pour effectuer un redressement statistique de ces indicateurs produits.

Chapitre 6 : Quantifier et qualifier les facteurs explicatifs de choix des déplacements

Introduction

Les méthodologies de traitement des données de signalisation présentées dans le chapitre 5 se sont révélées consistantes pour produire des indicateurs de mobilité avec une finesse spatiale et temporelle intéressante et à une fréquence approchée du temps réel. Après avoir validé la faisabilité d'observer des déplacements dans un cadre particulier au regard du fonctionnement du « territoire mobile », nous nous interrogeons maintenant sur la capacité de nos méthodes de traitement des données de signalisation pour extraire une quantification des variables explicatives de choix des attributs des déplacements. Nous traiterons cette problématique sur deux périmètres d'étude distincts. Tout d'abord, nous poursuivons nos efforts d'investigation sur la zone étudiée précédemment. Les terminaux mobiles sont embarqués au niveau de l'individu. Ainsi, ils reflètent la perception individuelle de la mobilité ressentie par le téléphone d'un individu. Alors, la première section se concentre sur la quantification des paramètres explicatifs des comportements de la mobilité propres aux usagers des transports publics tels que le confort. La deuxième section investigue la possibilité d'appliquer les méthodes développées pour la mesure des déplacements sur « un territoire mobile » classique. En effet, les résultats produits jusque-là profitent de la

configuration particulière du « territoire mobile » au niveau des sections souterraines du réseau de transport en commun ferré d'Ile-de-France. Alors, la méthodologie de captures de déplacement est-elle applicable quel que soit le « territoire géographique » ? Quelles seront les difficultés méthodologiques induites par les décalages entre les frontières cellulaires et les frontières du « territoire géographique » ?

Ce chapitre contient deux sections. La première propose une méthode d'estimation du confort perçu par un usager lors d'un déplacement en transport en commun. La deuxième explique les limites rencontrées lors d'un exercice de segmentation des déplacements dont le motif est loisir/achat selon différents attributs du déplacement tels que l'horaire d'arrivée, l'itinéraire et le mode de transport sur un « périmètre mobile » classique.

1 Démarche expérimentale

Afin de poursuivre le protocole exploratoire des méthodes de traitements et des résultats accessibles à partir de données de signalisation, débuté dans le paragraphe 1.1 du chapitre 5, je propose ici une démarche expérimentale en deux sections. Néanmoins ces deux sections, ont un objectif d'étude commun. Le chapitre 4 a montré que les méthodes de requêtes passives contiennent des informations précieuses à l'échelle individuelle, mais leur coût de mise en œuvre réduit la fréquence de production. Cet inconvénient des méthodes actives a soulevé l'intérêt des méthodes passives telles que l'exploitation des messages de signalisation. Toutefois, en plus de leur coût, de leur disponibilité et du caractère dynamique de cette source de données, ne pourrait-on pas développer des méthodes qui permettraient de répondre aux besoins techniques pour les analyses de mobilités évoqués dans la section 1 du chapitre 3 ? Parmi les constats émergents de notre synthèse des difficultés rencontrées dans le domaine des transports, il apparait que le niveau d'information est trop faible quant aux phénomènes complexes de choix de déplacement. En effet, d'une part, le chapitre 3 met en relief des recommandations appuyées sur le besoin d'un référentiel de valeurs unitaires qualifiant, voire quantifiant, le confort ressenti par les usagers des transports en commun. L'estimation du confort ressenti est un facteur explicatif complexe à mesurer, même au travers d'enquêtes à préférences déclarées, en raison d'un fort biais humain pour la représentation des conditions (EBOLI, et al., 2008). De plus, le seuil de niveau de confort qui va faire basculer un usager vers un itinéraire alternatif peut varier avec des facteurs ponctuels, qui sont à considérer individuellement ou de manière combinée. Ces derniers peuvent également entrainer une modification pérenne du comportement dans certains cas car ils incitent les usagers à modifier leurs habitudes de voyage. Ces derniers peuvent être des facteurs personnels (maladie, blessure, transport de bagages,…), des facteurs de conditions d'opérations du réseau de transport (report conseillé par l'opérateur en cas de difficulté, report obligatoire, ...) ou des facteurs sociétaux (connaissance par un tiers d'une solution plus « confortable » à tester). D'autre part, cette complexité est également portée par les déplacements pour motifs

loisirs ou achats en raison de la variabilité de leur fréquence de réalisation et de leur place souvent secondaire dans des chaines de déplacements.

Alors, dans une première section, je continue à investiguer le potentiel de mesure de comportements fins de déplacement sur le périmètre d'étude du système de transport en commun ferré d'Ile-de-France car il possède des caractéristiques simplificatrices grâce à sa configuration de « cordon de zone de localisation » calées sur le réseau de transport. En effet, le comportement de la signalisation sur ce « territoire mobile » spécifique assure le déclenchement d'évènements aux entrées et sorties des portions souterraines avec un décalage temporel faible entre la réalisation de l'action sur le « territoire géographique » et sa capture par le réseau mobile. Le chapitre 5 a montré qu'il est possible d'estimer des attributs des déplacements tels que les stations d'origines et de destinations, les horaires de départ et d'arrivée et l'itinéraire. Dans cette étude, le mode de transport est fixé par le périmètre d'étude et le motif de déplacement par le moment du déplacement. La possibilité d'estimer des volumes par paire Origine/Destination, les horaires de passage des trains ainsi que leurs taux de charge ont amené des questions sur les facteurs expliquant la répartition des flux de voyageurs sur les différentes lignes du système de transport ou encore les choix d'itinéraires. La quantification de tels paramètres semble essentielle pour comprendre, modéliser et prédire le comportement des usagers des transports en commun et ainsi mieux gérer la charge sur l'ensemble du réseau. Cela permet d'évaluer la finesse d'observation accessible au travers des méthodes de traitement de la signalisation collectée dans ce cas particulier de configuration du réseau de transport souterrain. Cela amène l'interrogation suivante : Cette finesse d'observation des déplacements est-elle garantie par le système de capture en lui-même ou par la configuration spécifique aux réseaux publics souterrains ? Alors, dans la deuxième section, je cherche à adapter ces méthodes dans un cas de configuration « standard » de superposition des découpages du « territoire mobile » et du « territoire géographique ». Le qualificatif « standard » s'applique autant du point des réseaux de télécommunications que du point de vue des réseaux de transport et d'usage du sol et de la relation de projection qui existe entre ces derniers. Cela signifie que le périmètre d'étude, auquel je vais m'intéresser dans cette seconde étape d'adaptation des méthodes de mesures de déplacement, présentera une variété d'usages du sol et modes de transports, que les frontières des territoires ne sont plus nécessairement superposées et que tous les évènements seront à considérer sur un « territoire mobile » proposant l'ensemble des couches technologiques disponibles au moment de l'étude (2G et 3G). Le but de cette démarche est de proposer des méthodes de mesures de déplacement généralisables à l'ensemble du territoire et d'en montrer les avantages et les limites.

La démarche suivie lors de la première section se découpe en 4 étapes pour aboutir à l'estimation d'un facteur explicatif de choix de lignes représentant le confort ressenti par un usager. Tout d'abord, j'ai choisi des lignes qui proposent une compétition d'itinéraires et dont l'une présente des conditions de voyages inconfortables, comme l'absence de places assises. Les indicateurs de taux de charge produits précédemment ont permis d'identifier les Origines-Destinations du tronçon central. Parmi ces Origines-Destination, la paire Nation-la Défense présente l'avantage d'un itinéraire direct alternatif sur la ligne 1. De plus, les quatre

stations de la ligne 1 en amont de Nation ne proposent aucune connexion avec le réseau ferré – hormis une avec le réseau de tramway. Cette configuration appuie des hypothèses sur les conditions de confort de voyage via les deux modes afin d'évaluer les méthodes d'estimation du confort ressentie à l'aide d'une fonction d'utilité simplifiée, dans le sens où seulement le temps de trajet et le confort sont considérés. Des éléments montrant une cohérence des hypothèses proposées sont illustrés. Les trois étapes suivantes sont basées sur ces hypothèses de voyage debout par le RERA et de voyage assis par la ligne 1 de Nation vers la Défense. Pour aboutir à la résolution des équations de la formulation de la fonction de coût, je propose tout d'abord une méthode d'affectation des mobiles à un itinéraire, puis observe la variation temporelle de la répartition entre ces deux lignes pendant l'heure de pointe du matin. A ce stade du protocole exploratoire, deux axes de poursuite des travaux étaient envisageables. Le premier porte sur la problématique du redressement pour estimer des volumes d'usagers et non de mobiles. Or des méthodes adaptées de redressement reposent sur une meilleure connaissance des phénomènes de signalisation et seraient uniquement adaptées à la configuration particulière du découpage du « territoire mobile » du périmètre d'étude. Ainsi, j'ai priorisé la poursuite de la compréhension de ces mécanismes dans un cadre général de configuration de découpage des « territoires ».

La démarche expérimentale poursuivie dans cette deuxième section de travaux repose sur deux objectifs. D'une part, la disponibilité des données est un atout majeur d'une méthode de collecte à partir des réseaux de téléphonie pour mesurer des déplacements sporadiques avec des schémas de réalisation complexes tels que les déplacements pour motifs loisirs ou achats. J'ai donc souhaité m'orienter sur de telles analyses de mobilité pour mettre en valeur cette caractéristique de la méthode de collecte passive par rapport aux enquêtes traditionnelles. D'autre part, afin d'approfondir mes connaissances sur les mécanismes de signalisation dans un cadre de configuration standard des réseaux, j'ai cherché à reproduire les méthodes d'estimation des attributs des déplacements sur un périmètre classique et apporter des éléments de compréhension empiriques aux limites théoriques attendues. En effet, je m'attendais à des difficultés reparties sur trois aspects, l'aspect spatial, l'aspect temporel et l'aspect d'identification des comportements sur les réseaux. Une analyse préliminaire de la théorie du fonctionnement des mécanismes de signalisation nous permet de jauger les différences par rapport au périmètre d'étude précédent. Sur le plan spatial, le confinement offert par l'épaisseur de la structure souterraine n'est plus disponible dans le cas standard. Alors la couverture des cellules s'étend sur le « territoire géographique » indépendamment des frontières de ce dernier. L'équivalence entre le découpage des deux territoires n'est plus évidente et la dimension d'une cellule impacte la précision spatiale. Sur le plan temporel, les évènements sont toujours remontés avec une grande précision. Néanmoins, tout changement d'état sur le réseau de transport (initialisation d'un déplacement, changement d'axes, connexion à un autre réseau, arrêt, etc.) est capturé sous réserve d'une action de communication (reçue ou émise) ou d'une superposition entre les territoires qui offrent un changement de zone de localisation (comme dans le cas du souterrain). On peut alors apprécier le décalage temporel induit par l'asynchronisme entre l'usage des deux territoires ainsi qu'une fréquence des évènements déterminée par l'activité sur les réseaux. En

cas d'inactivité sur le « territoire mobile », c'est-à-dire aucune communication et aucun changement de zone de localisation, le mobile génère un évènement toutes les 3 heures avec une précision spatiale à l'échelle de la cellule. Cependant, il s'agit d'un évènement d'immobilité à l'échelle d'une zone de localisation, qui peut correspondre à une zone dont la taille peut aller jusqu'à 1/8 de la superficie d'un département comme la Seine-et-Marne. Le système de capture sera alors aveugle à toute mobilité d'un mobile inactif à l'intérieur de cette zone de localisation, ce qui réduit nettement la connaissance de la mobilité accessible pendant cette période de 3 heures. Enfin, contrairement au réseau souterrain qui n'était couvert que par une « couche technologique 2G » en 2011, le périmètre d'étude standard supporte les « couches technologiques 2G et 3G » au moment de l'étude. Or, il existe une priorisation entre les couches selon les usages. Alors en fonction de la charge du réseau, des conditions locales de qualité du signal radio et du service demandé par l'abonné, une transition entre les « couches technologiques » va se produire. Nous rappelons qu'un mobile ne peut se situer que dans une seule « couche technologique » et fréquentielle à la fois. Ces mobilités entre couches sont elles aussi signalées. Cependant, elles peuvent se produire suite à un déplacement avéré sur le « territoire géographique » mais également en cas d'immobilité suite à une nouvelle distribution de la charge localisée du réseau de télécommunication ou encore d'une demande de service. Ces « fausse mobilités » sont à considérer avec le plus grand soin pour la mesure de déplacement. Cette première analyse des phénomènes de décalages spatiaux et temporels appuient la nécessité de connaissance de l'usage des réseaux de téléphonie et de son adéquation avec l'usage du sol pour connaitre la probabilité de capture d'un déplacement.

Ces considérations théoriques préliminaires orientent le choix du premier périmètre d'étude de cette deuxième section. Afin de fixer le motif de déplacements, le périmètre télécom doit être constitué d'antennes couvrant de manière quasi-exclusive un lieu n'entrainant aucune ambigüité vis-à-vis de la nature de l'activité qui y est réalisable. L'accent est alors mis sur l'estimation des attributs des déplacements pour motifs achats ou loisirs tels que l'origine ou la destination vers ou depuis le lieu d'activité, les horaires de départ et d'arrivée, l'itinéraire et le mode. Dans un premier temps, j'ai recherché un périmètre qui propose des conditions de captures semblables à celles de l'étude en souterrain en exploitant au maximum les corrélations entre le « territoire géographique » et la topologie du réseau de télécommunications afin de fixer le motif d'un part, mais également pour faciliter l'étude des impacts des décalages entre les territoires.

Ce chapitre présente les résultats obtenus autour des deux objectifs d'étude suivants : l'estimation du confort ressenti par l'usager dans le système de transport en commun francilien et ses conséquences sur le choix d'itinéraire, l'analyse des déplacements pour motifs loisirs et achats sur des points d'intérêt de Seine-et-Marne, le centre commercial Val d'Europe et le parc d'attraction Disneyland Paris.

2 Estimation du confort ressenti par l'usager dans un système de transport en commun

Cette section est dédiée à la poursuite des travaux du chapitre précédent en poussant les analyses sur l'estimation de facteurs explicatifs des déplacements en transport en commun. En effet, nous avons produit différents indicateurs de qualité de service, dont un indicateur de fiabilité. Le paragraphe 1 du chapitre 3 a montré que la fiabilité et le confort faisaient partie des valeurs unitaires à explorer. De plus, une analyse de la littérature montre l'intérêt de quantifier des paramètres tel que le confort notamment pour l'alimentation de modèles d'affectation qui se proposent de décrire finement les comportements des usagers.

Nous avons construit une étude soumise à des hypothèses fortes afin d'illustrer la faisabilité de quantification de facteurs explicatifs relatifs à la « valeur du temps » associée au confort. L'exemple traité porte sur la compétition d'itinéraires entre la station Nation et la station la Défense en période de pointe du matin. Les déplacements entre ces deux stations pendant les périodes de pointe du matin sont essentiellement motivés par le besoin de se rendre sur son lieu de travail. Nous cherchons à répondre à la question : quels facteurs expliquent la répartition entre ces deux lignes qui offrent un déplacement de Nation vers la Défense?

Cette section débute par une brève analyse bibliographique, puis présente notre méthode d'estimation du confort en trois étapes. La première détaille la méthode d'association des trajectoires des mobiles sur une ligne. La deuxième présente la dynamique de la répartition des usagers entre ces deux alternatives. La troisième conclut sur l'estimation du facteur de confort ressenti par l'usager.

2.1 Des besoins d'estimation des valeurs unitaires : cas du confort en transports en commun

La littérature dédiée à la problématique des choix d'itinéraires dans le contexte de l'affectation du trafic dans les systèmes de transport public est conséquente. En effet, des études récentes ont enrichi la compréhension des comportements de choix d'itinéraires grâce à la modélisation des dynamiques journalières en temps réel (COPPOLA, et al., 2009) (WAHBA, et al., 2009). Néanmoins, ces études se sont principalement concentrées sur des mesures de niveau de service (LOS, pour « Level of Service »), des systèmes de tarification du réseau et des paramètres de congestion du réseau. Le comportement individuel de l'usager y est incorporé de manière indirecte. A notre connaissance, peu de travaux empiriques à propos des comportements de choix d'itinéraire en transport public selon une perspective individuelle ont été conduits. Parmi ces travaux, on peut citer l'enquête réalisée auprès des membres, étudiants et personnels, de l'université McGill de Montréal. Elle concerne un échantillon d'environ 50.000 schémas domicile/travail. En particulier, cette étude a permis des investigations sur l'influence des performances des systèmes de transport publics sur les décisions d'itinéraires et sur les décisions de mode auprès d'un large échantillon d'individus. Les objectifs de cette étude étaient d'analyser les facteurs dissuadant les usagers de choisir les

transports publics et de déterminer les attributs influençant les choix modaux. En construisant un modèle de choix d'itinéraires et un modèle de choix de modes, (ELURU, et al., 2012), ils ont montré que les temps de trajet ont un impact fort sur la compétitivité des bus mais non des transports en commun ferrés. Toutefois, l'accessibilité piétonne augmente le coût de ces deux modes qui est déjà perçu comme onéreux par les usagers. Les auteurs soulèvent les recommandations de travaux à venir, suivantes. Tout d'abord, il s'agit d'investiguer les raisons d'inconfort apparentes ressentis par les usagers dont la sensibilité aux facteurs exogènes est très variable. Ensuite, l'impact de la fiabilité des modes sur le choix d'itinéraires et de modes est un sujet d'investigation qui permettrait une meilleure modélisation des comportements de choix de déplacement. Enfin, les matrices de niveau de service produites dans cette étude devraient être produites à un niveau individuel car elles devraient refléter la pénibilité ressentie par les usagers. De plus, dans le contexte des modèles d'affectation dynamiques en transport public, seuls les effets de congestion sont souvent considérés et aucune distinction n'est prise en compte entre le fait de voyager debout ou assis. Alors, (LEURENT, 2008) propose un modèle d'affectation pour les systèmes de transport en commun qui tient compte de la congestion en places assises. En effet, pour les usagers le fait de voyager debout ou assis entraine des coûts d'inconfort différents et peut influencer les choix d'itinéraires.

L'avantage des capteurs mobiles que nous exploitons est justement cet accès à la perception de l'usager. De plus, la taille des échantillons qu'il est possible de constituer, correspond à l'ensemble des abonnés d'Orange. Enfin, le caractère dynamique de la collecte de données offre la possibilité d'estimer les facteurs explicatifs de comportement de mobilité alimentant des modèles d'affectation à une fréquence proche du temps réel. Ainsi, en plus de la variation de ces facteurs en fonction de différentes situations, exceptionnelles ou récurrentes, il offre aux opérateurs des systèmes de transport des possibilités d'action de régulation immédiate, mais aussi sur du long terme.

2.2 Méthode et résultats

2.2.1 Présentation du périmètre et des hypothèses de l'étude

Ce paragraphe présente le périmètre d'étude et des éléments de justification du choix d'hypothèses sur lesquelles s'appuient les résultats proposés.

Ces travaux se basent sur les données et les résultats présentés dans le chapitre 5. Le périmètre d'étude est l'ensemble de déplacement de Nation vers la Défense le jeudi 13 octobre 2011 pendant l'heure de pointe du matin. Le choix du trajet d'étude est motivé par deux faits. Tout d'abord, la ligne 1 du Métro propose le seul itinéraire alternatif à la ligne A pour un trajet entre Nation et la Défense, sans ajouter de connections. Ensuite, la Défense propose un usage du sol non ambigu qui garantit un déplacement pour motif travail.

Les hypothèses suivantes ont été formulées :

- Le motif d'un déplacement de Nation vers la Défense est un motif travail (***H1***)
- Pendant l'heure de pointe du matin, un jour ouvré moyen, tout déplacement de Nation vers la Défense sur la ligne A du RER se fera débout (***H2***)

- Pendant l'heure de pointe du matin, un jour ouvré moyen, tout déplacement de Nation vers la Défense sur la ligne 1 du métro se fera assis (***H3***)

Les hypothèses ***H2*** et ***H3*** sont fortes, mais permettent une simplification de l'expression de la fonction d'utilité en ne considérant que l'impact du temps de trajet et du confort ressenti par l'usager. Ici, le confort est associé aux conditions d'espacement entre les voyeurs dans une rame et n'illustre par la perception de l'usager quant à la propreté, à l'état de détérioration du matériel, etc. Ces hypothèses nous permettent d'illustrer la faisabilité de quantifier des facteurs explicatifs, ici le confort, en utilisant une modélisation simple de choix de route. Des éléments de validation de la cohérence des hypothèses ***H2*** et ***H3*** sont développés en essayant de répondre à la question : Quels sont les paramètres pris en compte par un usager pour choisir entre ces deux alternatives ?

Tout d'abord, comparons les temps de parcours sur ces deux lignes. Le temps de parcours nominal de Nation vers La Défense s'élève à 36 minutes en Métro contre 23 minutes en RER. Ainsi, il semblerait qu'il soit plus « utile » pour un usager de choisir l'alternative RER. Néanmoins, nous avons vu qu'en heure de pointe le temps de parcours en RER peut être rallongé (cf. chap. 5, § 2.2.2). Il est raisonnable de supposer qu'un phénomène similaire se produit pour la ligne 1. Avec un écart de temps de parcours nominal supérieur à 10 minutes, il parait peu vraisemblable que le temps de trajet, même en période de pointe, soit un paramètre encourageant les usagers à préférer la ligne 1 pour effectuer un trajet Nation-La Défense. D'autres paramètres sont à considérer pour comprendre cette compétition.

Intéressons-nous alors aux conditions de transport. En période de pointe, la fréquence est semblable pour ces deux lignes sur le tronçon central, mais le taux de remplissage des rames à l'origine du trajet diffère. En effet, la Figure 57 montre qu'en période de pointe, la probabilité d'avoir une place assise dans le RER en débutant son trajet à Nation est très faible, voire nulle, avec des taux de remplissage qui varient entre *high* (beaucoup de voyageurs sont debouts) et *very high* (les voyageurs debouts sont pressés contre les portes) de 8h00 à 9h00.

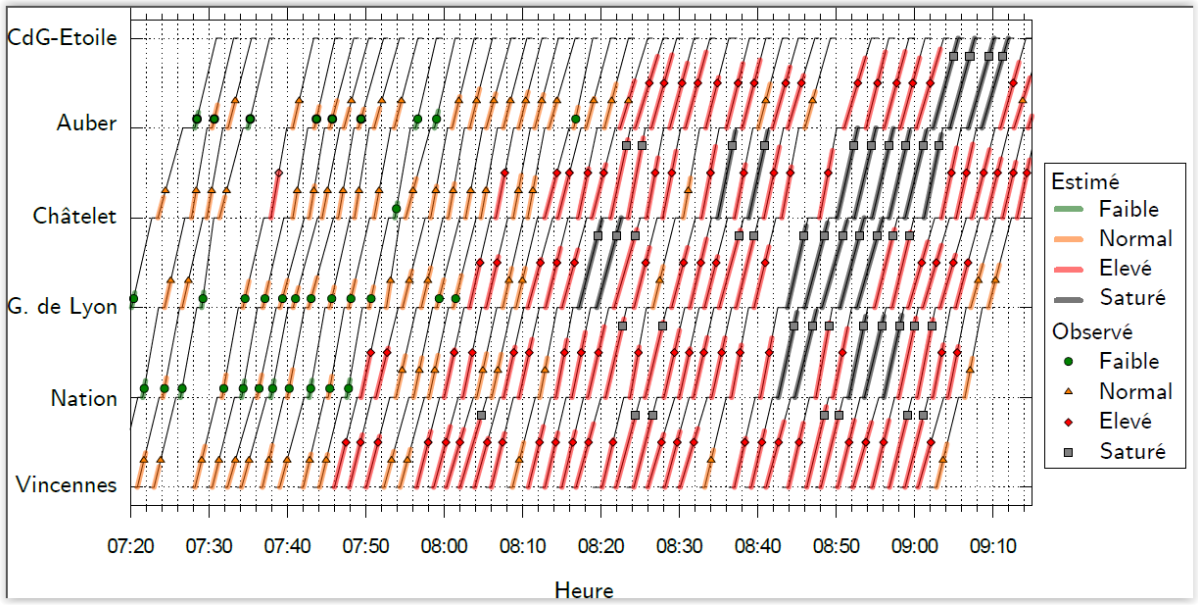


Figure 57 : estimation du taux de charge des trains circulant entre les stations Vincennes et Charles-de-Gaulle-Etoile pendant la montée en charge matinale le 7 avril 2011.

L'estimation du taux de charge du métro n'a pas été produite à partir des données de téléphonie. Nous faisons l'hypothèse raisonnable qu'un usager débutant son trajet en métro à Nation a une probabilité forte d'avoir une place assise. En effet, il n'y a que 4 stations en amont de Nation, dont 3 qui n'offrent aucune connexion avec le reste du réseau ferré de transport en commun d'Ile de France. La station précédant Nation, c'est-à-dire Porte-de-Vincennes, possède deux connections avec le tramway. Alors, nous observons le nombre de validations billettiques par heure au niveau des stations amont le 13 octobre 2011 (Tableau 5).

Tranche horaire de validation	Nombre de validations
6h00 – 7h00	815
7h00 – 8h00	3630
8h00 – 9h00	8161
9h00 – 10h00	4221

Tableau 5 : nombre de validations billettiques par tranche d'une heure au niveau de stations amont à Nation le 13 octobre 2011.

Les validations billettiques au niveau du métro ne permettent pas d'identifier le sens de parcours de la ligne (voir paragraphe 1.3.1.2 du chapitre 5), ainsi le nombre de validations présentées dans le tableau n'indique pas la proportion d'abonnés Navigo qui empruntent le sens vers la Défense. On remarque que de 8h00 à 9h00, le nombre de validations s'approche de la capacité en places assises d'une rame de métro qui est de 8.300 passagers/heure/sens et est nettement inférieure en dehors de cette tranche horaire. Ainsi, pendant l'hyperpointe,

l'hypothèse ***H3*** est un peu forte, bien qu'en toute vraisemblance, une partie des passagers montant à Nation trouveront néanmoins une place assise.

De plus, dans le cas d'un usager exceptionnel du réseau public qui souhaiterait effectuer ce trajet de Nation vers la Défense en journée, il serait orienté par le site de l'opérateur RATP vers l'utilisation du RER[21] . Il est alors raisonnable de supposer que les personnes préférant le trajet en Métro plutôt qu'en RER sont des habitués du système de transport. Ainsi, nous observons au travers de cette compétition entre itinéraires la propension d'un usager à choisir entre voyager assis et voyager plus vite pour des personnes informées des conditions de voyage. La méthode proposée a été présentée à la conférence Vehicular Technology Conference (VTC) 2014 (MILION, et al., May 2014). Elle repose sur les hypothèses ***H1***, ***H2*** et ***H3*** et se décompose en trois étapes :

- L'appariement des trajectoires mesurées à partir de la signalisation des mobiles à une des deux lignes d'intérêt.
- L'observation de la répartition des voyageurs par ligne et sa dynamique temporelle.
- L'estimation de la valeur du confort ressentie par les voyageurs.

2.2.2 **Associer les trajectoires des mobiles à une ligne du réseau de transport**

L'ensemble des trajectoires de Nation vers La Défense, noté $T_{N,D}$, est construit à partir des ensembles établis dans le chapitre 5. Il contient l'ensemble des trajectoires des usagers entrant (début de trajet ou connexion) à Nation, quelle que soit la ligne, et sortant (fin de trajet) à la Défense. Il s'agit donc de la jointure entre le sous-ensemble des mobiles détectés au niveau des cellules couvrant les portions souterraines de la station Nation T_{inN} et le sous-ensemble des mobiles générant un LAUN au niveau des cellules couvrant le voisinage immédiat de la station la Défense T_{outD} (cf. chap. 5, § 2.3.3.1), sachant que le moment de déclenchement de l'évènement à Nation doit être antérieur au moment de déclenchement de l'évènement à la Défense et que l'écart entre ces deux instants doit être inférieur à 1 heure. Ainsi, on définit $T_{N,D}$ comme :

$$T_{N,D} = \begin{Bmatrix} o \in T_{inN}, & d \in T_{outD} \\ o.m = d.m, & d.h - o.h \in [0, 1h] \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Le sous-ensemble T_{inN} a été construit en deux étapes, car il contient deux groupes d'usagers. Un premier groupe d'usagers est composé des passagers qui débutent leur trajet à Nation, et un deuxième groupe est composé des passagers qui se connectent au réseau au niveau de la station Nation. Alors, dans un premier temps, on construit l'ensemble des mobiles qui ont déclenché un LAUN vers les cellules qui couvrent les portions souterraines

[21] www.ratp.fr

de Nation. Notons que les cellules qui couvrent les quais de la ligne A et de la ligne 1 ne sont pas les mêmes. Deuxièmement, on construit grâce à la méthode d'assignation des stations de connexion (chap. 5, § 2.3.3.2), l'ensemble des mobiles qui ont déclenché un LAUN au niveau de l'une des autres stations souterraines du réseau de transport et que l'on peut assigner comme ayant fait une connexion avec la ligne A ou la ligne 1 au niveau de Nation. T_{inN} est donc l'union de ces deux ensembles de mobiles.

Une fois cet ensemble $T_{N,D}$ construit, il s'agit de réaliser l'affectation sur les lignes considérées. L'architecture du réseau de télécommunications ne permet pas une discrimination immédiate. En effet, la station de la Défense ne possède pas de site dédié à une couverture séparée des lignes 1 et A, alors les deux lignes sont couvertes par le même groupe de cellules. De plus, les cellules qui couvrent la ligne 1 du métro à Nation couvrent également d'autres lignes du métro. Une incertitude existe alors pour associer les trajectoires de $T_{N,D}$ à chaque ligne. On remarque que 36% des trajectoires contenues dans $T_{N,D}$ ont déclenché un évènement intermédiaire à Auber. Auber est une station du RER A qui ne possède pas de connexion avec la ligne 1 du métro. Ce sous-ensemble de $T_{N,D}$ constitue les trajectoires que l'on peut associer de manière certaine au RER A. Notons ce sous-ensemble RER_s. De la même manière, il existe des évènements intermédiaires sur un trajet en métro qui nous permettent de constituer le sous-ensemble M1_s. En effet, la ligne 1 du métro possède des sections aériennes à l'ouest. Alors des évènements LAUN d'entrée en souterrain doivent se produire au niveau des cellules qui couvrent les stations souterraines en aval des sections aériennes. Le sous-ensemble M1_s contient 10% des trajectoires de $T_{N,D}$. Le reste des trajectoires de $T_{N,D}$ ne peut être affecté à une ligne sans ambiguïté. Elles sont regroupées dans le sous-ensemble noté T_{un}.

Nous nous sommes alors intéressés au temps de parcours, qui selon le site de l'opérateur de transport est discriminant.

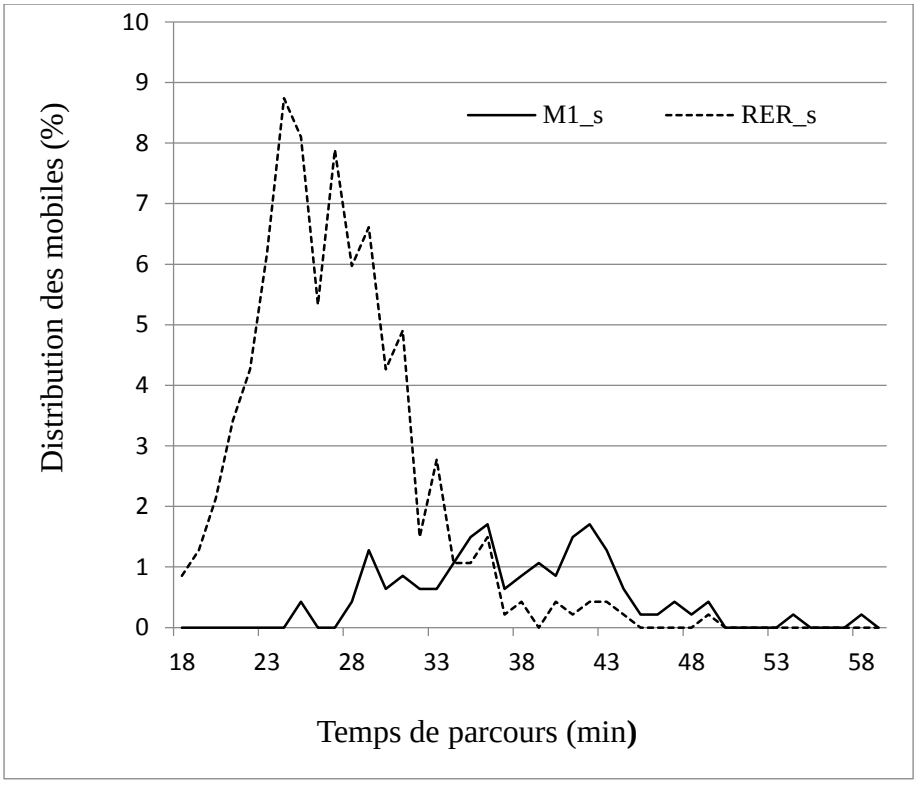


Figure 58 : distribution des temps de parcours pour les mobiles du sous-ensemble M1_s et du sous-ensemble RER_s en proportion de l'ensemble des mobiles

La Figure 58 montre la distribution des temps de parcours pour toutes les trajectoires RER_s et pour toutes les trajectoires M1_s. On notera que 95% des trajectoires M1_s ont un temps de parcours supérieur à 36 minutes et 95% des trajectoires RER_s ont un temps de parcours inférieur à 28 minutes. Ainsi, toutes les trajectoires de T_{un} dont le temps de parcours est supérieur à 36 minutes sont associées à M1_s et toutes celles dont le temps de parcours est inférieur à 28 minutes à RER_s. Le reste des trajectoires de T_{un} a été réparti selon la capacité d'écoulement de chacune des lignes. Les hypothèses ***H2*** et ***H3*** spécifient que les voyageurs ayant emprunté le RER A pour effectuer leur trajet ont une probabilité très forte de voyager debout tandis que les voyageurs ayant emprunté la ligne 1 du métro ont une probabilité très forte de voyager assis (voir §3.3). Ainsi, nous considérons les capacités d'écoulement des deux lignes dans le cadre de ces hypothèses. La capacité d'écoulement est de 50.000 passagers/heure/sens en RER si le taux de remplissage est maximal. La capacité d'écoulement de passagers assis du métro est de 8.300 passagers/heure/sens. Ainsi, parmi les trajectoires qui n'ont pas encore été associées à une ligne, nous en affecterons 94% au RER et 6% au métro pour respecter la distribution de capacité sous les hypothèses ***H2*** et ***H3***. Nous obtenons alors la distribution des temps de parcours (Fig. 59).

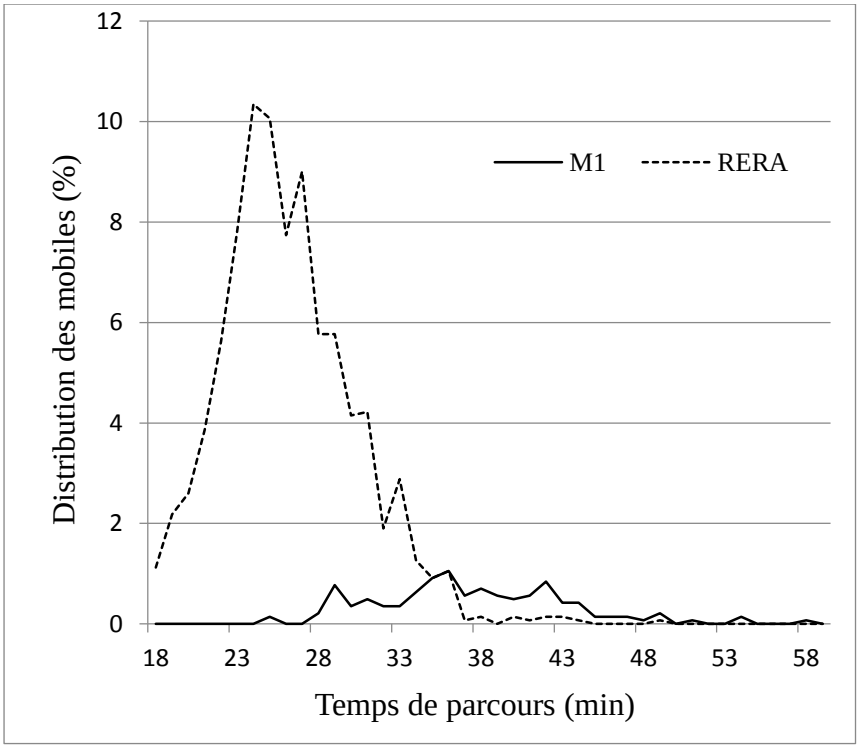


Figure 59 : distribution des temps de parcours pour les mobiles associés à chacune des lignes (M1 et RER A).

On remarque que la distribution des temps de parcours à bord du RER A est centrée autour de 24 minutes. Ceci est cohérent avec les temps de parcours annoncés par l'opérateur. Il est important de noter que le temps annoncé par le site de l'opérateur contient un temps moyen d'accès aux quais. Associé aux imprécisions temporelles du système de capture et des traitements, ceci explique l'étalement de la distribution, notamment en deçà du temps de parcours annoncé par l'opérateur. Pour le métro, il y a deux pics dans la distribution, le premier à 36 minutes et le deuxième à 42 minutes. Ce deuxième peut correspondre à un temps d'accès piéton allongé ou des retards de la ligne. A notre connaissance des conditions d'opération du 13 octobre 2011, la première explication semble la mieux adaptée.

Observons alors l'évolution pendant l'heure de pointe de la répartition des trajectoires de $T_{N,D}$ sur les deux lignes.

2.2.3 **Evolution temporelle de la distribution des voyageurs sur les lignes**

Après avoir assigné les mobiles de $T_{N,D}$ à chacune des lignes, nous avons produit l'évolution de la répartition des trajectoires de Nation vers La Défense sur les deux itinéraires pendant l'heure de pointe du matin. Elle est représentée sur la Figure 60. Au début de la période de pointe, seulement 5% des voyageurs ont préféré le métro au RER, alors qu'en hyperpointe ce taux passe à 15%.

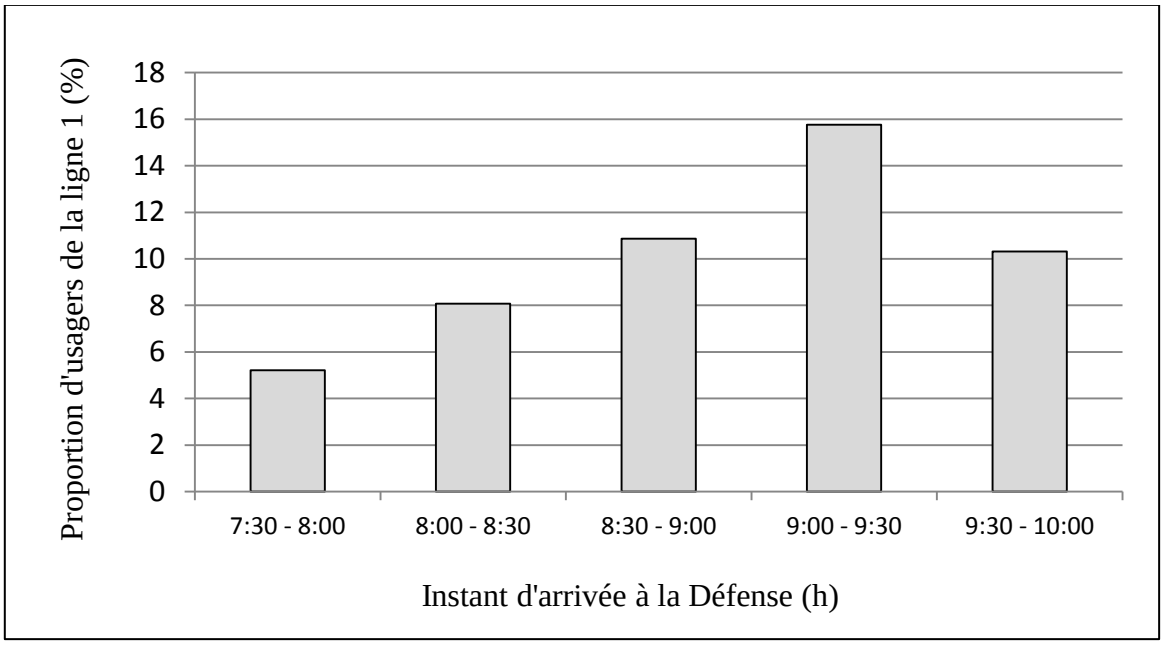


Figure 60 : proportion des mobiles assignés à la ligne 1 parmi tous les mobiles de TN,D selon l'heure d'arrivée à la Défense de 7h30 à 10h00 le 13 octobre 2011.

Comment expliquer l'évolution de la distribution des passagers entre la ligne 1 et la ligne A observée? Cette question repose sur l'estimation des paramètres qui influencent un voyageur dans son choix d'itinéraire pour aller d'un point A à un point B. Les modèles d'affectation classiquement employés imposent un poids prédominant sur le temps de trajet (cf. chap. 3, §2.2.2.4). Alors, l'itinéraire le plus rapide est celui qui est choisi. Observons alors si le 13 octobre 2011, des perturbations auraient pu entrainer des retards impactant un changement d'itinéraire. La Figure 61 représente la distribution des temps de parcours moyennés sur des intervalles de 30 minutes sur la ligne A du RER de Nation vers la Défense pendant la première partie de la matinée.

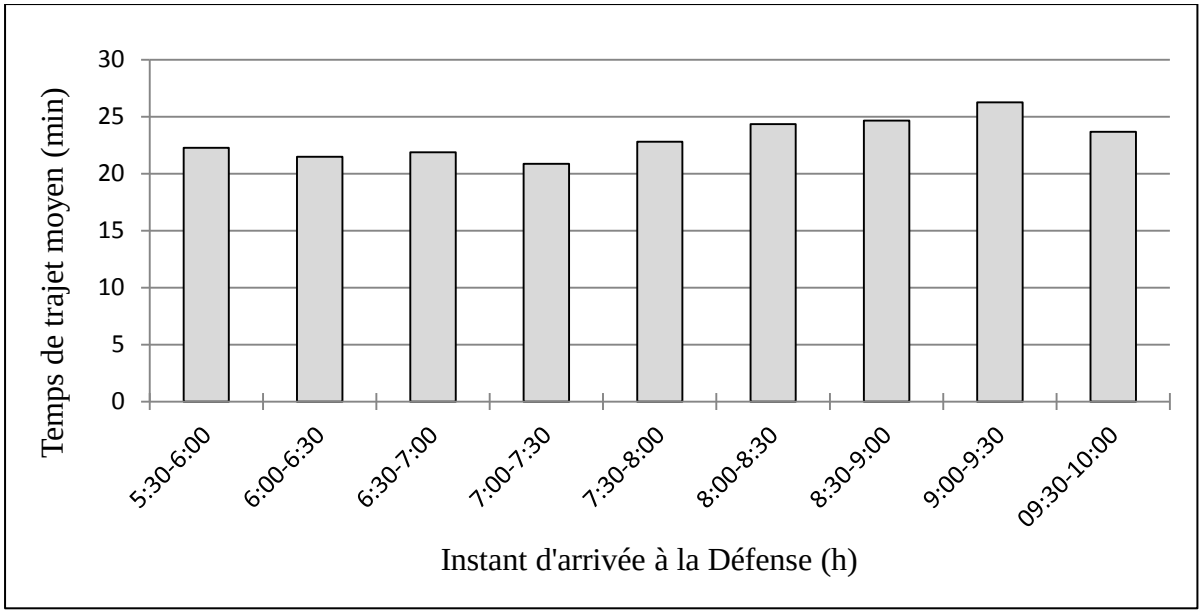


Figure 61 : évolution du temps de trajet moyen pour voyager de Nation vers la Défense en RERA selon l'heure d'arrivée à destination.

On remarque une légère augmentation des temps de parcours pendant l'hyperpointe. Cependant, on n'observe aucun retard significatif. Alors le temps de trajet en RER A demeure bien plus attractif que le temps de trajet nominal annoncé par l'opérateur via la ligne 1. Ainsi, le paramètre temps de trajet seul ne peut expliquer un choix de ligne.

Observons alors la montée en charge du tronçon Nation-la Défense dans la matinée. La montée en charge des mobiles assignés à l'Origine-Destination Nation-la Défense – cumul de la ligne A et de la ligne 1 – pour la matinée du 13/10 est tracée sur la Figure 62.

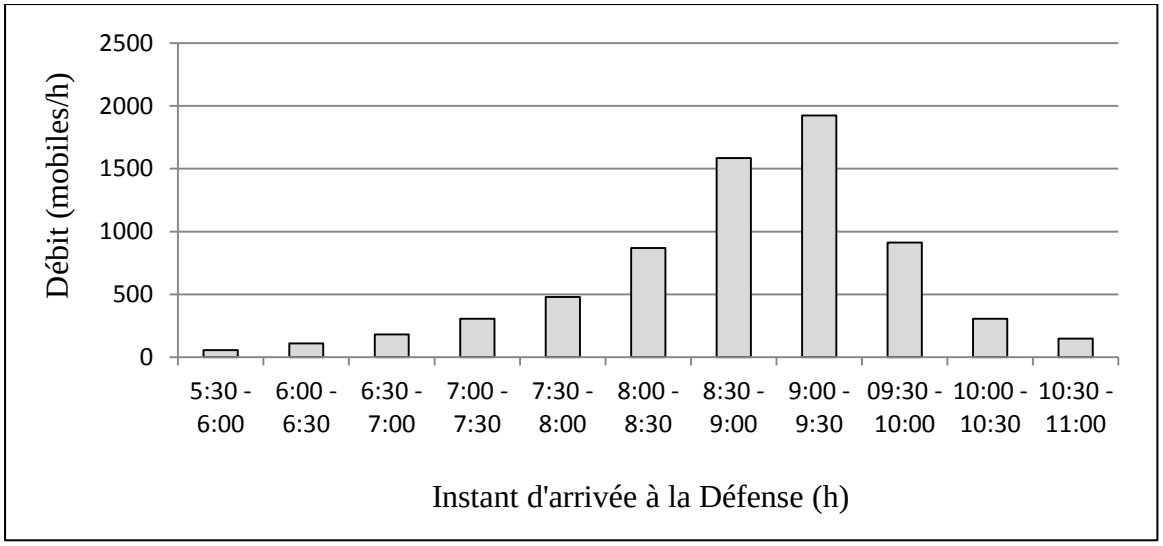


Figure 62 : évolution de la montée en charge du nombre de trajectoires Nation-la Défense capturée selon l'heure d'arrivée à la Défense.

La période entre 9h et 9h30 est la plus chargée de la matinée. C'est également le créneau horaire où la proportion de voyageurs préférant le métro au RER triple.

Reportons-nous à la Figure 57 représentant la charge des rames ayant circulé sur la ligne A le 7 avril 2011. On observe des trains dont la charge est qualifiée de très haute (densité supérieure à 4 pers/m^2) au départ de Nation à partir de 8h45 environ. Cela correspond à une heure d'arrivée à la Défense vers 9h10. La comparaison entre ces deux figures peut paraitre hasardeuse car elles n'ont pas été produites le même jour. Néanmoins, les deux jours correspondent à des jours ouvrés moyens. Il n'est pas déraisonnable de supposer qu'en l'absence d'incident majeur sur le réseau de transport, les montées en charge durant la période de pointe suivent des schémas similaires. Ainsi, pendant la période où le RER A atteint son taux de charge maximale, la proportion des voyageurs de Nation vers la Défense en métro triple.

Nous pouvons conclure que ce supplément de passagers qui se reportent du RER vers le métro en hyperpointe correspond à des usagers qui ont en définitive fait le choix d'un trajet avec une plus grande probabilité de voyager assis plutôt que de voyager plus rapidement, mais debout et dans des conditions de confort dégradées. Nous observons ici le seuil du compromis entre deux paramètres de choix d'itinéraire pour un usager : le confort et le temps de trajet.

2.2.4 **Estimation du confort ressenti par un usager**

Les modèles d'affectation sont construits à partir de la probabilité de chaque individu de choisir un itinéraire par rapport à un autre (cf. chap. 3, §2.2.1 pour la définition de l'utilité d'un usager). Pour notre application, nous utiliserons une expression simple, c'est-à-dire avec un nombre réduit de paramètres explicatifs du choix, afin de calculer pour un voyageur *n* son utilité $U_{n,i}$ de choisir un itinéraire *i* :

$$U_{n,i} = -\alpha_n t_i - \gamma_n P_{a,i} t_i - \beta_n (1 - P_{a,i}) t_i - \omega_n \quad (24)$$

Avec t_i le temps de trajet incluant les temps d'accès et d'attente, $P_{a,i}$ la probabilité de voyager assis, α_n le coût estimé par un usager du temps de voyage, γ_n le coût associé au voyage assis, β_n le coût associé au voyage debout et ω_n le coût associé aux paramètres non observés.

Afin d'estimer la probabilité du choix d'itinéraire, on utilisera une méthode basique mais efficace, la méthode à choix discrète de type Logit. Si l'on note 1 pour le trajet en RER et 2 pour le trajet en métro, nous avons le système suivant :

$$\begin{cases} U_{n,1} = -\alpha_n t_1 - \beta_n t_1 - \omega_n \\ U_{n,2} = -\alpha_n t_2 - \gamma_n t_2 - \omega_n \end{cases} \quad (25)$$

Le but est d'estimer β_n qui représente le caractère inconfortable à voyager debout. Nous fixons $\alpha_n = 1$ qui est la valeur associée à l'absence de contrainte et de pénibilité, et γ_n= 0 car l'on suppose qu'il n'y a pas de pénibilité à voyager assis. Alors la probabilité pour un passager *n* de choisir le métro est :

$$P_{n,2} = \frac{\exp(U_{n,2} + \omega_n)}{\exp(U_{n,1} + \omega_n) + \exp(U_{n,2} + \omega_n)} \quad (26)$$

$$avec\ \omega_n\ \ i.i.d$$

Et, la probabilité pour un passager *n* de choisir le RER est :

$$P_{n,1} = \frac{\exp(U_{n,1} + \omega_n)}{\exp(U_{n,1} + \omega_n) + \exp(U_{n,2} + \omega_n)} \quad (27)$$

$$avec\ \omega_n\ \ i.i.d$$

Rappelons que cette valeur de β_n est calculée pour des usagers qui ont connaissance des paramètres pour chacune des alternatives proposées (temps de parcours, niveau de confort, etc.). Nous résolvons le système composé des éq. (4) et (5) en appliquant les

hypothèses ***H2*** et ***H3***, sachant que $P_{n,1}(h)$ et $P_{n,2}(h)$ sont tirés de la Fig. 4 avec h l'instant d'arrivée à la Défense. Les temps de parcours tt_{metro} = 36 min, tt_{RER} = 25 min sont utilisés. Ainsi, nous calculons la valeur de β_n pour chaque trajectoire de $T_{N,D}$. La valeur de β_n varie faiblement de 7h30 à 10h00 (Fig. 63). On obtient une moyenne de 0,42 en période de pointe.

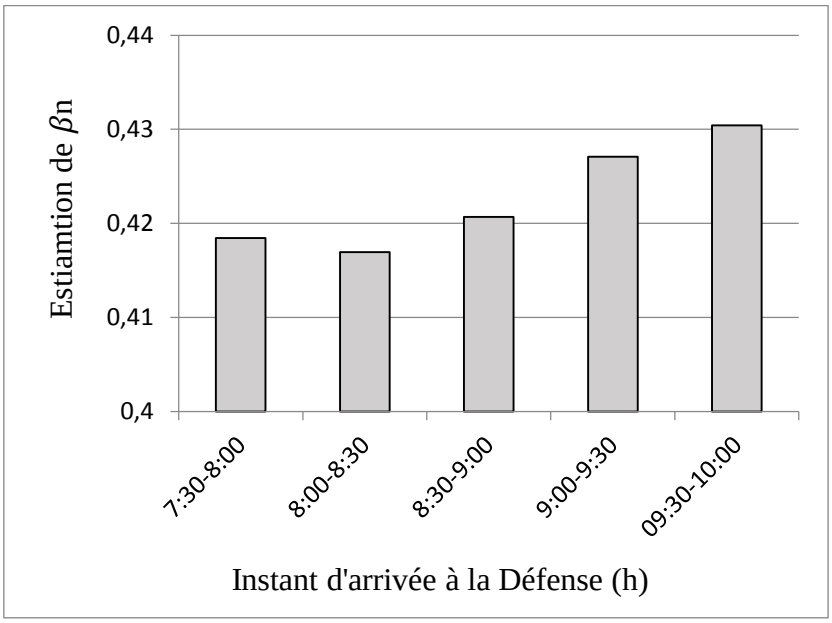


Figure 63 : variation de β_n pendant la période de pointe du matin le 13 octobre 2011 selon l'heure d'arrivée à la Défense.

Une étude commanditée par le STIF a montré que le coefficient multiplicatif appliqué au temps de parcours pour l'utilité d'un voyage debout en train ou en RER (noté ici $\beta_n + \alpha_n$) varie quasi-linéairement selon la charge de la rame (KROES, et al., September 2013). Ces valeurs varient de 1,358 à 1,553 pour un niveau de charge variant de 150% à 250% de la capacité en places assises. Nous n'avons pas mesuré le même jour le taux de charge des rames du RER à Nation. Néanmoins, en considérant les résultats produits le 7 avril 2011, il est raisonnable d'affirmer qu'entre 7h30 et 10h00, le niveau de charge des rames est compris entre 150% à 250% de la capacité en places assises. Ainsi, nos résultats sont semblables à ceux produits grâce à une enquête de préférences déclarées qui a été consolidée par une enquête de préférences révélées.

2.3 **Conclusion**

Au travers de cet exemple développé à partir d'une approche méthodologique naïve pour estimer des poids de la fonction d'utilité relative au comportement de choix de mode et d'itinéraire, on obtient des résultats cohérents avec ceux produits par le STIF à partir d'enquêtes de préférences déclarées. Cette méthodologie basée sur les points forts de ce système de capture permettrait également de quantifier la propension des personnes à attendre

le train suivant lorsque celui à quai est bondé ou encore des phénomènes de déshorage (voir chapitre 3 paragraphe 1.1).

Notre système de capture présentant une disponibilité bien supérieure aux enquêtes, il est envisageable d'observer les comportements de choix sur un système de transport public à tout instant. Des quantifications des poids des variables de qualité de service, ou encore des observations fines des comportements de choix (d'itinéraire, de mode, d'horaires, …) seraient accessibles en temps réel. Ainsi, les variations de ces poids et comportements avec des phénomènes exceptionnels ou semi-récurrents, avec des politiques tarifaires ou encore différents niveaux d'informations aux voyageurs pourraient être produites.

Cette méthode repose sur le fonctionnement particulier du « territoire mobile » sur la partie souterraine du réseau de transport en commun francilien. Ces méthodes de quantification sont-elles applicables dans le cadre d'une architecture standard du « territoire mobile »?

3 Comportement de déplacement pour motif loisir/achat

Cette section est consacrée à la poursuite de la démarche sur un périmètre dont la configuration des territoires peut être qualifiée de standard. On sort du périmètre du système de transport où l'association entre « territoire mobile » et « territoire géographique » est immédiate et où le « territoire mobile » ne propose qu'une seule couche technologique. On essaie alors de reproduire un cadre d'étude semblable à celui de la première étude en sélectionnant des points d'intérêts « isolables » via le découpage du « territoire mobile » afin de faciliter l'établissement du motif de déplacement et l'estimation des autres attributs. Cette étude nous permet d'approfondir notre compréhension des mécanismes de signalisation pour la mesure des déplacements. Nous traiterons deux exemples sur le périmètre du centre commercial de Val d'Europe et sur le complexe Disneyland Paris lors de périodes où les enquêtes actives sont moins riches : les fins de semaine. On montrera que l'observation des déplacements est possible au travers d'indicateurs d'intérêt pour des acteurs de prestation d'activité et également pour des acteurs du transport. Cependant, l'étude du co-fonctionnement des réseaux des deux territoires dans le cadre de ces exemples va mettre en relief certaines limitations, notamment sur la précision temporelle et spatiale, de notre outil de capture.

Cette section contient trois paragraphes. Le premier traite des déplacements pour motifs achats ou loisirs dont le nombre croît et dont les méthodes de mesure sont plus complexes que les déplacements pour motifs travail ou étude en raison de la variabilité de la fréquence de réalisation de ces activités. Le paragraphe suivant expose les indicateurs de mobilité constructibles autour du centre commercial de Val d'Europe dont les frontières de couverture coïncident avec les bordures du complexe. Enfin, l'exemple du parc d'attraction Disneyland Paris ne propose pas une telle superposition des « territoire mobile » et « territoire géographique ». Alors, nous proposons une méthode de segmentation des mobiles présents sur le périmètre d'étude pour dégager les « visiteurs du parc ».

3.1 **Appréhender l'accroissement des déplacements pour motifs achats/loisirs**

La plupart des études sur les mobilités traitent des déplacements pour motif domicile/travail car il s'agit du segment structurant pour la majorité des études transports (DI LORENZO, et al., 2011). En effet, les déplacements domicile/travail constituent l'élément central de la gestion des infrastructures de transport et de la planification urbaine en raison des phénomènes de congestions qu'ils génèrent. De plus, ces déplacements restent les plus immédiats à mesurer en raison de leur forte régularité. Cependant, ces dernières années ont vu s'accroître la demande de déplacements pour réaliser des activités de l'ordre des loisirs ou des achats. Ces motifs génèrent une part des déplacements en pleine augmentation (AXHAUSEN, 2003). Ces déplacements se distinguent par leur irrégularité tant dans leur fréquence que sur la plage horaire où ils sont réalisés. Ainsi, la notion du « déplacement moyen » pour un « jour moyen » ne peut s'appliquer comme pour les domicile/travail. Ceci explique l'émergence du besoin de mieux comprendre les schémas d'activités concernant les loisirs ou les achats. Les déplacements générés par le segment achats/loisirs/social sont soit le motif principal soit le motif secondaire chainé à un déplacement domicile/travail. Nous rappelons que cette notion de chainage peut entrainer des modifications des attributs du déplacement principal (cf. chap. 2 §3.2.1). Ainsi, appréhender les déplacements loisirs et achats enrichit la connaissance des déplacements structurants domicile/travail-étude.

Des travaux de recherche sont consacrés à expliquer les comportements individuels de déplacements motivés par des loisirs/achats au travers de variables d'usage des sols et de variables sociodémographiques (VAN DE BERG, et al.). Ces travaux se sont trouvés ralentis à cause d'un manque de données suffisamment fines et fréquemment mis à jour. Nous montrerons dans cette deuxième section de chapitre comment notre système de capture peut produire des mesures de déplacements dont le motif est loisirs/achats lorsqu'il s'agit du motif principal.

3.2 **Description de la zone d'étude**

Comme dans le chapitre précédent, le périmètre d'étude est présenté sous deux angles, celui du « territoire géographique » et celui du « territoire mobile ». C'est de la combinaison et des relations qui existent entre ces deux territoires qu'est justifié le choix de notre zone d'intérêt. D'une part, le département de Seine-et-Marne présente un vaste éventail d'usage du territoire en tant que département frontière entre des zones d'habitations très denses proposant de multiples activités et des zones rurales. D'autre part, le découpage du « territoire mobile » sur ce territoire est considéré comme classique et sert ainsi nos objectifs de validation de la méthode dans un cas standard, d'alimentation de la réflexion sur l'utilisation des mécanismes de signalisation pour la mesure des déplacements et de mise en relief des limites soulevées par le fonctionnement classique des réseaux de télécommunications.

3.2.1 **Aspect géographique de la zone d'étude**

Le département de Seine-et-Marne (77), est un département français de la région Ile-de-France. Sa population en 2011 selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) est de 1.338.427 habitants. Le département de Seine-et-Marne constitue la moitié orientale de la région Ile-de-France. Sa superficie représente à elle seule 49 % de celle de la région. Il s'agit du département français comptant le plus de départements limitrophes avec 10 départements voisins. Le choix de ce département a été motivé par des caractères urbanistiques fortement contrastés. Le quart nord-ouest offre des paysages urbains denses avec une offre de transport dense et variée. Le quart nord-est et la moitié sud sont composés pour l'essentiel de paysages ruraux traversés par des axes de transports interurbains. La Seine-et-Marne possède une frontière à l'ouest avec la petite couronne de Paris. Les autres frontières se font avec la province. En raison de sa superficie, la Seine-et-Marne permet l'étalement de complexes avec des activités dédiées. Ainsi, ce territoire offre un découpage discriminant par usage du sol (Fig. 64).

a) b)

Figure 64 : variétés des paysages en Seine-et-Marne. a) Vue aérienne d'une partie du complexe de loisirs Disneyland Paris. b) Champ de blé en Seine-et-Marne, près de Saint-Fargeau-Ponthierry.

Nous présentons brièvement ce département selon 3 axes : sa démographie, ses activités économiques et son réseau de transport. Premièrement, ce département, rural à l'origine, a vu sa population tripler en un demi-siècle en raison du développement de l'agglomération parisienne et de l'implantation des villes nouvelles de Marne-la-Vallée et de Sénart. Le sud et l'est du département restent encore relativement ruraux, mais toute la frange ouest est très urbanisée, avec la ville de Chelles et la ville nouvelle de Marne-la-Vallée. Cette frontière fait désormais partie de l'agglomération parisienne. En 2011, quatre villes dépassent le seuil de 30.000 habitants : Chelles (52.817 habitants), Meaux (52.225 habitants), Melun (39.497 habitants) et Pontault-Combault (36.458 habitants). La Seine-et-Marne figure parmi les départements français les plus dynamiques en matière de démographie, bien que la

croissance ait ralenti en raison de la diminution du solde migratoire. En 1999, 80 % de la population du département résidait en zone urbaine contre 20 % en zone rurale.

Deuxièmement, avec 56 % de son territoire affecté à l'agriculture, la Seine-et-Marne se singularise en Île-de-France par le poids de ce secteur logiquement quasi inexistant dans des départements nettement urbanisés. L'industrie emploie plus de 50.000 salariés sur le département, notamment dans l'industrie du verre (au sud), mais aussi dans l'agro-alimentaire, les industries chimiques (fabrication d'engrais entre autre), l'imprimerie et l'édition de journaux, tandis qu'existe sur Melun le centre de recherche de la Snecma qui occupe près de 4.000 salariés et constitue la plus importante unité industrielle du département. Cependant, le département, de par sa position géographique (placé sur le réseau TGV avec une connexion à Marne-la-Vallée, traversé par plusieurs autoroutes, proximité de l'aéroport de Roissy - Charles de Gaulle) dispose également d'une importante activité logistique et de transport. Ce secteur emploie près de 23.000 salariés, soit plus de 7 % des effectifs salariés du secteur privé. En effet, les activités tertiaires sont en constante croissance dans un département en voie d'urbanisation et de mutations rapides. Ainsi, les activités commerciales comptent aujourd'hui plus de 68.500 salariés, soit près de 22 % des effectifs salariés du secteur privé. Dans cet ensemble, pointons entre autre l'impact des enseignes de la grande distribution qui offrent un riche bassin d'emploi dans les multiples hypermarchés et supermarchés du département. Évidemment, ce sont les structures commerciales des villes nouvelles de Sénart et Marne-la-Vallée qui se signalent par leurs activités. De plus, le secteur tertiaire en Seine-et-Marne compte aussi beaucoup pour les activités récréatives, notamment sur le secteur d'Eurodisney, le parc d'attractions étant le plus important employeur privé du département avec plus de 13.000 salariés. Ainsi, le tourisme tient son rang avec plus de 14.000 chambres d'hôtels et quelques sites remarquables comme les châteaux de Fontainebleau ou Vaux-le-Vicomte, la cité médiévale de Provins et le Parc Disneyland. Le secteur de l'hôtellerie et de la restauration représente plus de 18.000 emplois directs dans le département. Enfin, le département accueille le pôle de compétitivité Advancity autour de l'École des Ponts ParisTech et de la Cité Descartes.

Enfin, ce département à mutations rapides, proposant de multiples activités, avec une population croissante, est situé entre la province et la petite couronne de Paris. Il est desservi par un réseau de transport dense et interconnecté en des points économiques clés pour le département. Il héberge environ 600 km de routes nationales, pour environ 4.000 km de routes départementales et environ 200 km d'autoroutes parmi lesquels l'A4, l'A5, l'A6, l'A77, et l'A104. Le réseau ferroviaire propose 4 lignes de RER (A, B, D et E), 3 lignes de Transilien et contient deux gares de TGV : Marne-La-Vallée-Chessy et l'Aéroport-Roissy-Charles-De-Gaulle mitoyenne avec le département de Seine-Saint-Denis. De plus, la Seine-et-Marne possède près de 300 km de voies fluviales navigables. Les principaux axes de transport terrestres sont représentés sur la Figure 65 en regard du découpage départemental de la région Ile-de-France.

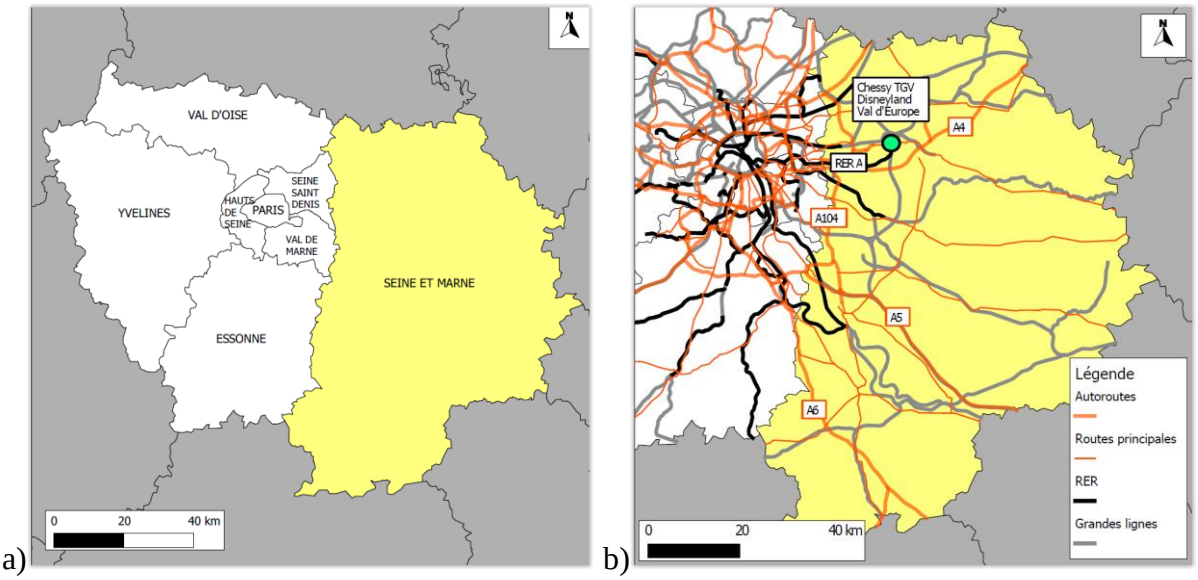


Figure 65 : géographie de la Seine-et-Marne. a) Position du département dans la région Ile-de-France. b) Réseau de transport principal en Ile-de-France et position du centre commercial de Val d'Europe et de Disneyland Paris.

A l'intérieur de la zone départementale, nous avons retenu deux zones avec un usage du sol discriminant qui facilitera l'étude des déplacements pour motifs loisirs et achats. Ces deux points d'intérêts sont le centre commercial de Val d'Europe et le complexe Disneyland Paris situés sur la commune de Serris. La période d'étude retenue est le samedi 22 décembre 2011. Il s'agissait du premier jour des vacances scolaires avant les fêtes de fin d'année. Ainsi, beaucoup de déplacements pour motifs récréatifs et achats étaient attendus.

3.2.2 **Aspect télécom de la zone d'étude**

Ce paragraphe aborde l'aspect télécoms de la zone d'étude afin de relier le choix du territoire d'étude à la démarche expérimentale sur deux échelles géographiques, celle des points d'intérêt et celle du département.

Pour répondre à l'objectif de mesure de déplacements pour motif loisirs/achats, nous avons cherché un lieu dont l'activité principale offerte par le « territoire géographique » correspondait à ce motif et dont la couverture du « territoire mobile » associé se bornait exclusivement au lieu. L'idée était d'avoir une couverture discriminante comme dans le cas des stations de RER. Le complexe de Serris répond à ces exigences comme le montre la Figure 66. En effet, ce territoire est isolé des villes adjacentes et contient des sites dédiés à la couverture mobile du territoire et à sa desserte. Le cercle vert contient l'ensemble des sites dédiés à la couverture du parc Disney. Le centre commercial de Val d'Europe dispose d'un site intérieur (indoor) qui garantit une superposition idéale des frontières des territoires.

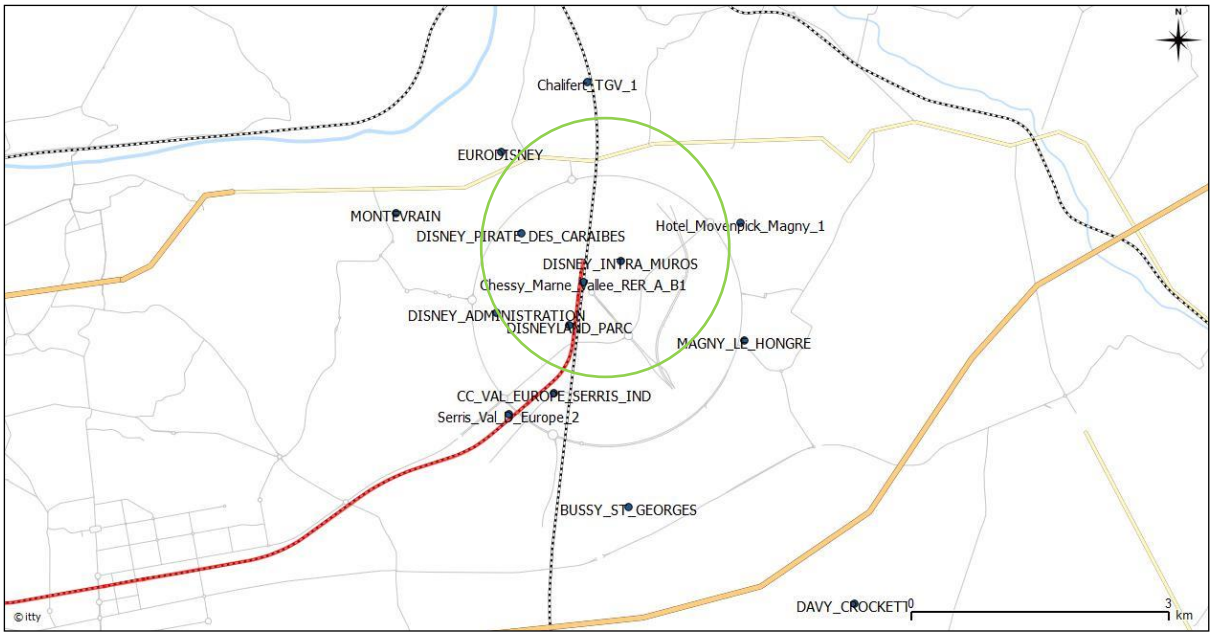
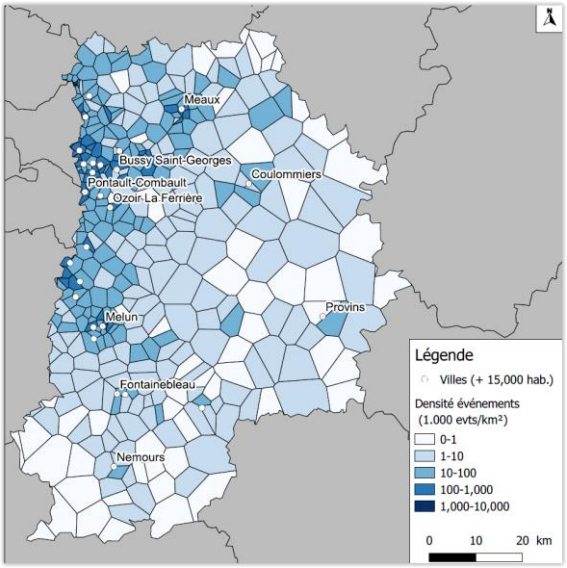


Figure 66: position des sites constituant les périmètres d'étude autour du centre commercial de Val d'Europe et du parc Disney

Il est possible de discriminer le point d'intérêt Disney par rapport aux communes voisines, néanmoins, la couverture de ces lieux va de pair avec la couverture des axes de transport qui les desservent. Il apparait alors que la discrimination de l'usage du périmètre (activité ou transit via la zone) n'est pas réalisable par la considération d'un ensemble de cellules comme cela a été fait dans le chapitre 5. Par exemple, on se pose la question si des mobiles en transit par la gare TGV de Marne-la-Vallée vont générer des évènements sur les antennes du parc. Pour lever ces ambiguïtés, une connaissance des comportements à une échelle plus large est nécessaire. L'idée est de discriminer les transits sur le périmètre d'étude en passant par une connaissance des itinéraires pour se rendre, ou quitter les points d'intérêt. De plus, le « territoire mobile » sur le complexe de Serris ne possède pas une LAC dédiée comme dans le cas des portions souterraines de transport public. Pour garantir l'observation d'évènements de mobilité (LAUN), nous avons choisi d'élargir le « territoire mobile » à l'échelle du département.

Nous avons tracé un diagramme de Voronoï pour chacun des sites (2G et 3G) sur le « territoire géographique » afin de représenter un découpage cellulaire sur le département (Fig. 67.b). Pour chaque cellule de Voronoï, nous associons une densité spatiale d'évènements de signalisation qui se sont produits au niveau de la cellule le 22 décembre 2012. Nous comparons cette carte de la pratique du « territoire mobile » à celle de la densité de population par communes du département (Fig. 67.a).

a) 

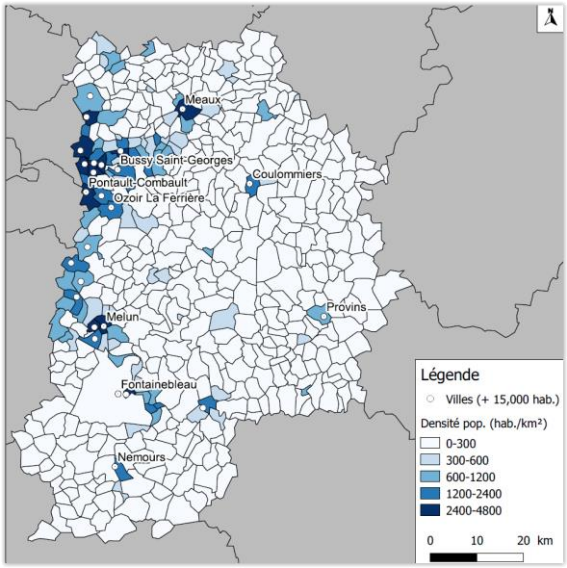
b) 

Figure 67 : corrélations entre le « territoire géographique » de Seine-et-Marne et l'activité des mobiles sur le « territoire mobile » de Seine-et-Marne le 22 décembre 2012. a) Carte de densité de population du département. b) Carte de densité d'évènements sur un diagramme de Voronoï des cellules.

La comparaison de ces deux cartes met en relief une corrélation entre les deux territoires. Tout d'abord, les cellules de Voronoï sont plus étroites pour les communes où la densité de population est plus élevée. De plus, la plupart des cellules de Voronoï où la densité d'évènements radio est supérieure à 100.000 évènements/ km^2 coïncident à des communes de plus de 15.000 habitants. A l'inverse, les cellules de Voronoï à faible densité d'évènements de signalisation couvrent une ou plusieurs communes à faible densité d'habitants. On observe toutefois des exceptions où une densité très importante d'évènements de signalisation coïncide avec une densité d'habitants moyenne. Il s'agit de lieus fortement fréquentés mais qui remplissent une autre fonctionnalité que celle de la résidence. Par exemple, à environ 7 km au nord-est de Bussy Saint George, le complexe de Serris génère un trafic important sur le « territoire mobile ». Des axes de transports très fréquentés qui passent par une frontière de zones de localisation peuvent également générer une densité élevée d'évènements de mobilité (LAUN) au niveau des cellules de part et d'autre de la frontière.

3.3 Présentation des résultats sur les deux points d'intérêt

Ce paragraphe débute par une description du jeu de données exploitées pour produire des résultats sur le centre commercial de Val d'Europe puis sur le complexe de Disneyland.

3.3.1 Description du jeu de données

Les corrélations entre les territoires, mobile et géographique, présentées dans le paragraphe précédent ne s'appliquent pas aux découpages de ces derniers. En effet, les délimitations des cellules et les regroupements en zones de localisation ne coïncident pas avec les limites administratives du « territoire géographique ». Pour constituer le périmètre télécom de capture, nous avons sélectionné 14 zones de localisation 2G et 3G de sorte que la Seine-et-Marne soit entièrement couverte. Ces 14 zones contiennent environ 600 sites dont seulement 2/3 sont contenus à l'intérieur des limites départementales. Nous considérons l'ensemble des cellules dont la couverture est contenue en Seine et Marne comme « périmètre télécom ». La capture a été réalisée le samedi 22 décembre 2012 de minuit à minuit. L'échantillon des mobiles est constitué de tous les abonnés d'Orange et/ou de tous les mobiles étrangers ayant les autorisations d'itinérance vers le réseau Orange qui ont généré au moins un événement de signalisation sur l'une des cellules du périmètre. Ainsi, on a pu observer environ 1,2 millions de mobiles différents, dont près de 900.000 étaient des abonnés Orange. En moyenne sur le département, les mobiles ont généré 52 évènements de signalisation dans la journée.

3.3.2 Résultats sur le centre commercial de Val d'Europe

Pour illustrer la faisabilité d'observer des déplacements pour motifs achats, nous avons produit trois indicateurs qui caractérisent le comportement des visiteurs du centre commercial : la durée de présence, la dynamique des volumes à la journée et la distribution sur le département de points de présence des visiteurs. Ces résultats ont été soumis et présentés à la conférence TRA 2014 (AGUILERA, et al., 2014, April).

La durée de présence a été estimée, par tranche de 30 minutes, en étudiant un ensemble de segments de trajectoires composé selon l'éq. (28).

$$\begin{cases} (m_1, h_1, c_1) < (m_i, h_i, c_i) < (m_M, h_M, c_M) \\ |h_2 - h_1| < 15\ minutes \\ |h_M - h_{M-1}| < 15\ minutes \end{cases} \quad (28)$$

$$avec\ M > 3\ ,$$
$$c_i\ la\ cellule\ indoor\ du\ centre\ commercial,$$
$$c_1\ et\ c_M\ toute\ cellule\ du\ périmètre\ d'étude\ n'étant\ pas\ c_i$$

Ainsi, les segments de trajectoires des mobiles sont composés d'au moins 3 évènements. Le premier est déclenché au niveau d'une cellule couvrant le voisinage du centre commercial, noté ici c_1 . Le dernier évènement du segment de trajectoire se produit également en dehors du centre commercial vers une cellule notée c_M . Notons que les cellules c_1 et c_M peuvent être les mêmes. Les évènements intermédiaires ont été déclenchés au niveau du site indoor dédié au centre commercial, c_i . La condition temporelle de 15 minutes permet de construire un voisinage immédiat du centre lors de son accès et de son départ. Cette valeur peut sembler élevée par rapport aux temporalités observables dans le cas du système de transport souterrain. Cela s'explique par la structure du « territoire mobile » qui ne propose pas d'obligation de génération d'évènement en entrée ou en sortie immédiate de Val d'Europe. Cette valeur de distance temporelle découle d'un compromis entre le temps moyen d'évacuation du complexe par les axes de transport avant d'effectuer une mobilité sur le « territoire mobile » (LAUN) et l'ordre de grandeur de temps de présence sur un centre d'achat.

La Figure 68 montre la distribution par tranche de 30 minutes du temps de présence estimé en ce premier samedi des vacances scolaires de Noël de 2012. La majorité des personnes sont restées entre 30 minutes et 1h30. Cela semble correspondre à des achats ciblés.

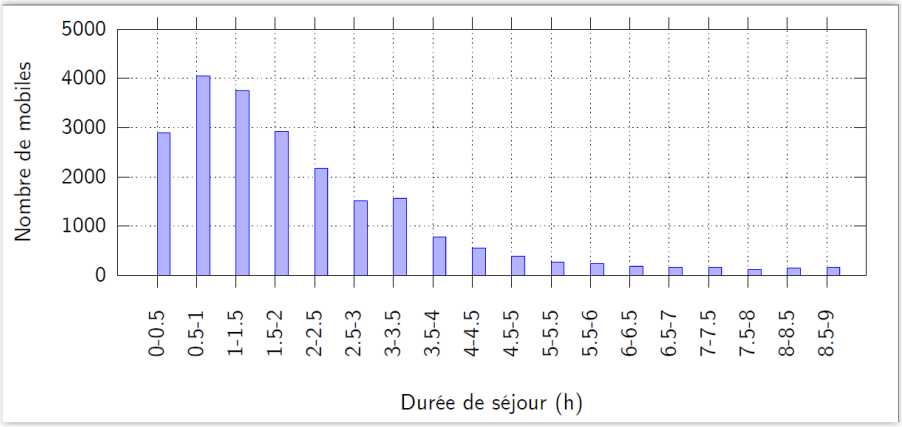


Figure 68 : distribution de la durée de présence estimée sur le centre commercial de Val d'Europe à partir des données de signalisation collectées le 22 décembre 2012.

Les Figure 69 et 70 illustrent les dynamiques des volumes de personnes présentes mais également des volumes entrants et sortants du centre commercial. Les entrées et sorties sont estimées à partir des trajectoires de taille 2 selon la chronologie des cellules associées aux évènements. On observe une pointe du trafic entre 15h00 et 18h00 sur ces deux graphiques.

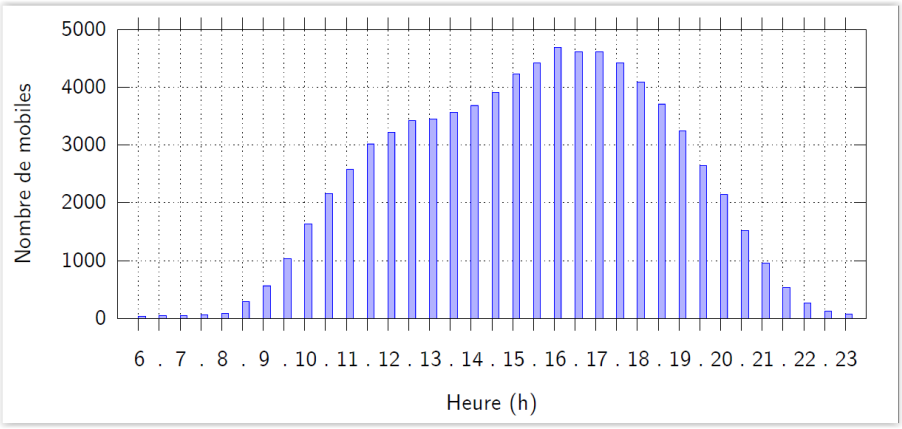


Figure 69 : distribution à la journée du nombre de mobiles captés au niveau du centre commercial à partir des données de signalisation collectées le 22 décembre 2012.

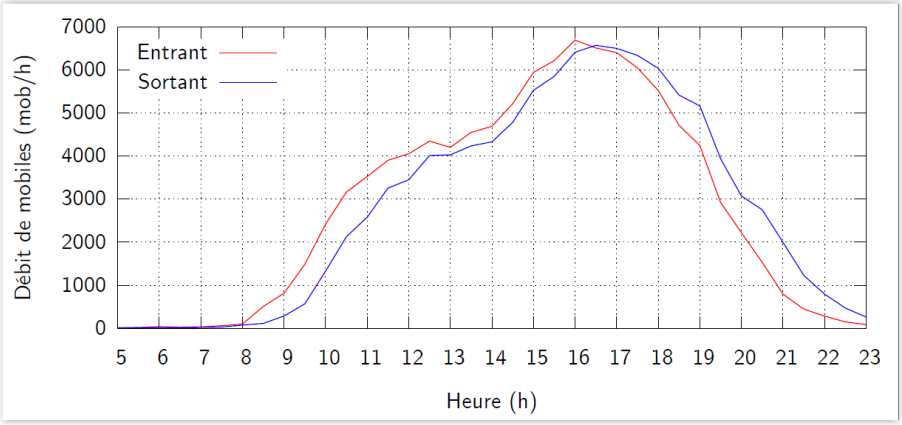


Figure 70 : débits estimés d'entrée et de sortie du centre commercial à partir des données de signalisation collectées le 22 décembre 2012.

Afin d'identifier les zones de résidences et les routes empruntées par les visiteurs, le « périmètre mobile » est étendu à l'ensemble du département et nous levons la contrainte de distance temporelle. Nous avons représenté (Fig. 71) la densité spatiale de mobiles ayant généré deux évènements, l'un au niveau de la cellule indoor du centre commercial et l'autre au niveau d'une des cellules de Voronoï. La chronologie des évènements n'a pas d'importance. Les observations concernent alors soit « l'origine » du déplacement vers le centre commercial soit la « destination » depuis le centre. Il ne s'agit pas nécessairement de l'origine ou de la destination au sens de la définition d'un déplacement. Les évènements en dehors du centre commercial sont déclenchés sur le « territoire mobile » le long de la trajectoire. Sans condition supplémentaire sur un « temps d'arrêt » au niveau de cellules qui composent la trajectoire, il est n'est pas possible de qualifier ces dernières d'origine ou de destination du déplacement. Néanmoins, on observe une densité entre 0,1 et 10 mobile/km^2 le long des axes de transport et une densité entre 10 et 10.000 mobile/km^2 autour du centre

commercial. Cette densité élevée reflète la combinaison de deux phénomènes capturés : une partie des personnes venant au centre, habite sur le voisinage géographique et l'autre partie qui réside plus loin génère des évènements le long de leur trajet. Ainsi, cette méthode ne permet pas de distinguer l'ensemble des cellules empruntées lors du trajet depuis ou vers le centre, mais permet une observation de la « diffusion » sur le « territoire mobile » des évènements lors d'un déplacement. Nous représentons alors le temps d'accès minimal sur la Figure 72 qui est calculé en prenant la différence temporelle minimale entre deux évènements. le premier est généré au niveau des cellules colorées sur la figure et le deuxième au niveau du centre commercial. On dresse ainsi le voisinage du centre commercial sur le « territoire mobile » soumis aux conditions de mobilité offerte par le « territoire géographique ».

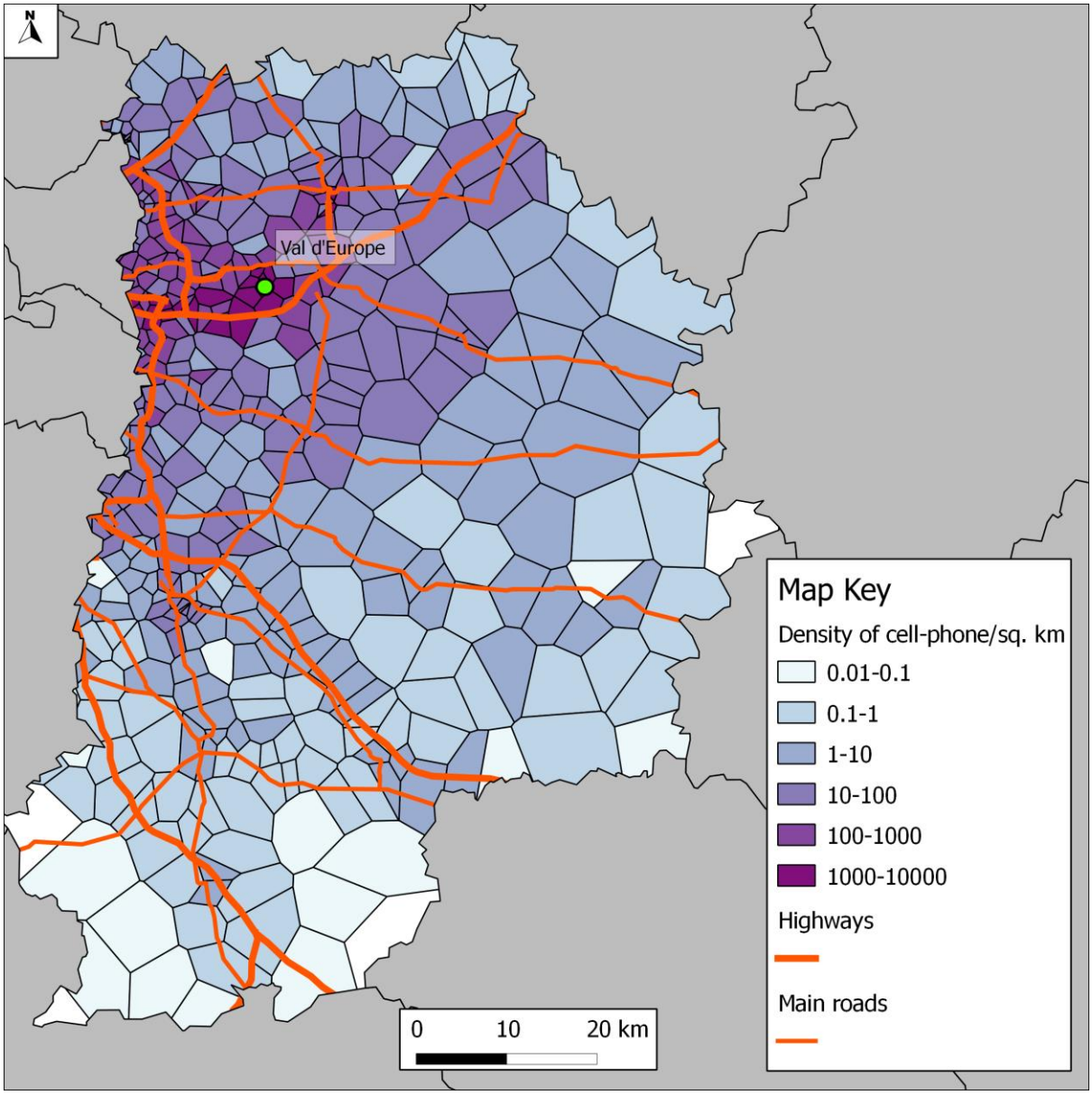


Figure 71 : carte de densité des trajectoires des mobiles qui ont été détectés sur le centre au moins une fois.

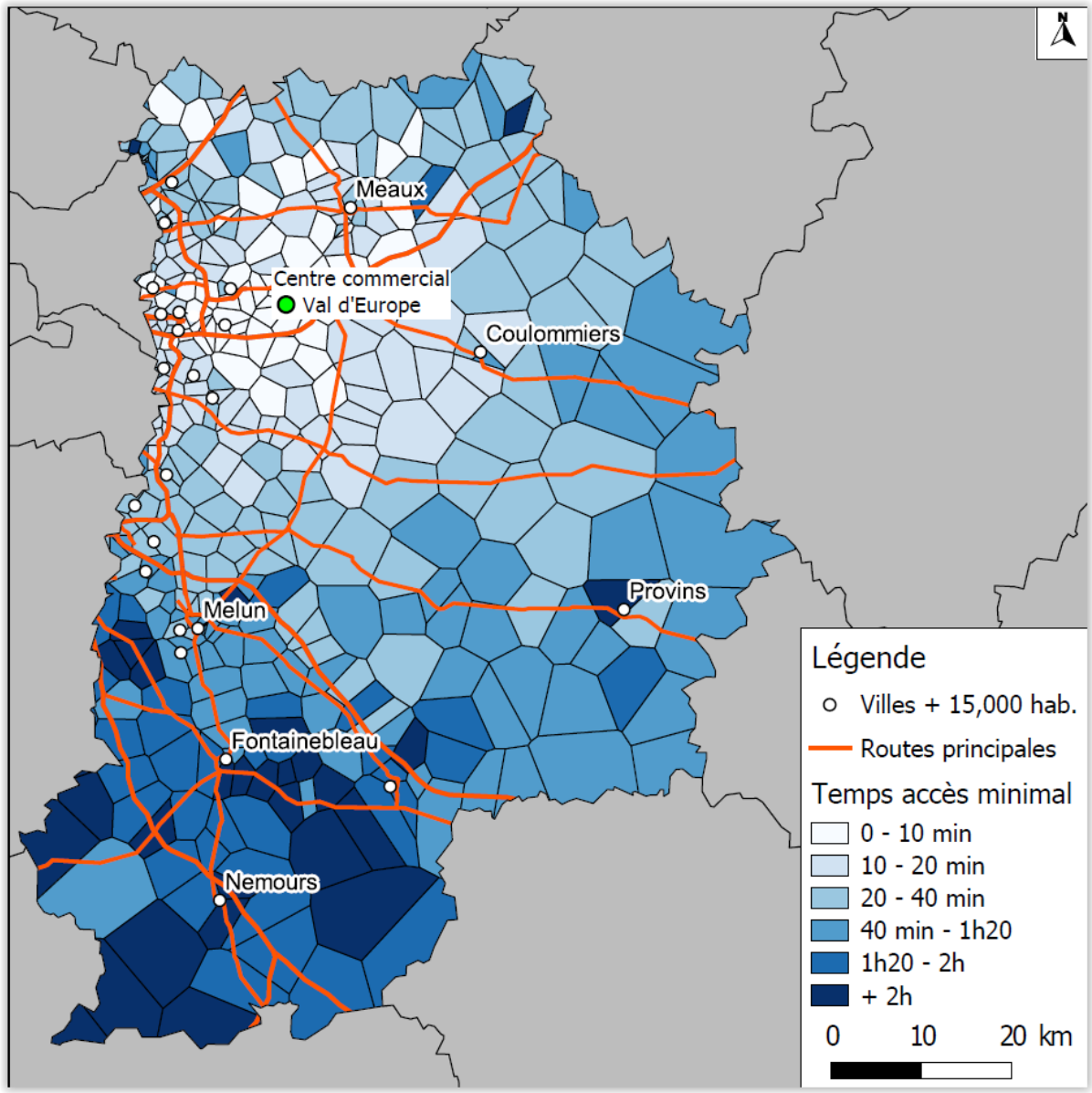


Figure 72 : carte des temps d'accès minimal vers le centre commercial.

Ce premier exemple illustre la possibilité de construire des indicateurs de comportement des déplacements pour motifs achat. Afin de mieux comprendre les processus de choix, ces indicateurs peuvent être combinés. Par exemple, il est possible de construire :

- Une distribution de l'horaire d'arrivée des mobiles présents en fonction du temps de présence sur le centre commercial.
- Une distribution du temps de présence sur le centre commercial des mobiles selon leur temps de présence total sur le département.
- Une distribution du temps de présence sur le centre commercial des mobiles segmentés par département de résidence. Pour cela, on peut considérer une

méthodologie naïve pour déterminer les résidents du département de Seine-et-Marne. Cette méthodologie associe à un mobile la résidence dans le 77 si le mobile a passé la nuit dans le département. Un tel critère peut s'interpréter au niveau de la signalisation radio-mobile par le déclenchement d'au moins deux évènements au niveau des cellules couvrant le département sur une période entre 0h et 6h avec un espacement temporel des évènements supérieur à 3h. Cette dernière condition permet de supprimer les transits. Dans le cas des mobiles qui seraient éteints pendant la nuit, on considéra un mobile comme résident si son premier évènement de la journée est un attachement au réseau et s'il génère au moins un deuxième évènement plus de 3h après l'attachement.

- En prolongeant la période d'observation, il serait intéressant de construire la distribution de temps de présence selon la récurrence de fréquentation du centre.

Ces résultats montrent que la méthode de traitement des évènements de signalisation pour la mesure de déplacements pour motifs achats est prometteuse sur un périmètre d'étude qui s'inscrit dans une architecture plus générale des réseaux de télécommunications. Néanmoins, ce périmètre présente quelques singularités qui ont simplifié notre tâche. En effet, le complexe commercial est géographiquement isolé et possède un site dédié au service de télécommunications à l'intérieur du complexe. On retrouve cette structure pour de nombreux centres commerciaux de taille équivalente à celui de Val d'Europe. Transposer cette étude au cas d'un ensemble de rues abritant à la fois des enseignes commerciales et des lieux de résidence ou de travail (par exemple les Champs Elysées à Paris) ne se ferait pas de manière immédiate. Cependant, notre méthode nous permet d'accéder à des temps de présence avec une précision suffisante pour distinguer des périodes longues de type travail ou résidence, des périodes plus courtes dédiées aux achats. De plus, l'observation de la récurrence est possible grâce à la disponibilité des données de signalisation. Cette notion d'observation comportementale à travers les remontées radio-mobiles peut compenser la précision spatiale à la cellule et le temps de réaction du système de capture par rapport au déclenchement d'une mobilité. Les indicateurs présentés ici illustrent les difficultés d'accéder de manière évidente à des attributs des déplacements tels que l'heure de départ ou d'arrivée, l'itinéraire ou encore le mode de transport. Toutefois, certains points particuliers du réseau offrent un potentiel d'observation plus élevé. C'est le cas des lieux où se produisent les changements de zone de localisation ou des lieux avec une couverture dédiée, comme par exemple un site indoor ou les stations de Métro et RER. Une habile combinaison des analyses comportementales sur des groupes de cellules construits sur la base de couverture aussi discriminante que possible des usages du sol, avec des points de remontées particuliers, promettent de réduire les incertitudes spatiales et relatives au décalage entre le déclenchement et la réalisation du déplacement. Cette promesse est testée sur le périmètre de Disneyland.

3.3.3 **Résultats sur le parc Disneyland**

Les méthodes développées pour construire les indicateurs de comportement appliqués aux visites sur le centre commercial de Val d'Europe s'appliqueraient de la même manière pour reproduire ces indicateurs sur les « visiteurs du parc Disneyland». Nous avons choisi dans le cas d'étude sur Disney de nous intéresser à un autre aspect qu'est la segmentation des mobiles présents selon leur comportement. En effet, dans le cas du parc Disney, toutes les cellules du groupe d'antennes qui couvrent le parc n'ont pas une couverture qui s'arrête aux frontières du complexe récréatif. Il y aura donc une segmentation des mobiles à faire pour associer une présence détectée sur le « périmètre mobile » avec une activité réalisée. Nous nous intéressons à des déplacements pour motifs loisirs.

La Figure 66 montre l'emplacement des différents sites radio qui assurent la couverture du périmètre Disneyland et son environnement géographique immédiat. A chaque site est associé un nom que nous reprendrons par la suite pour désigner les sites dont on parle. Ces sites hébergent une ou plusieurs technologies et une ou plusieurs fréquences. Le « territoire mobile » de ce périmètre d'étude est composé de la « couche technologique 3G », de la « couche 2G-900MHz » et de la « couche 2G-1800MHz ». Ce paragraphe se concentre sur les évènements de signalisation générés au niveau des cellules hébergées par 12 des 14 sites représentés sur la Figure 66. En effet, le site indoor et le site outdoor du centre commercial de Val d'Europe sont exclus du périmètre d'étude Disney. Les cellules de ces 12 sites constituent le périmètre télécom d'étude que nous appellerons « Disney cœur ». Il est représenté sur la Figure 73. On notera que les frontières de ce paramètre débordent du périmètre géographique du complexe Disney sur les lieux d'habitation et les axes de transport.

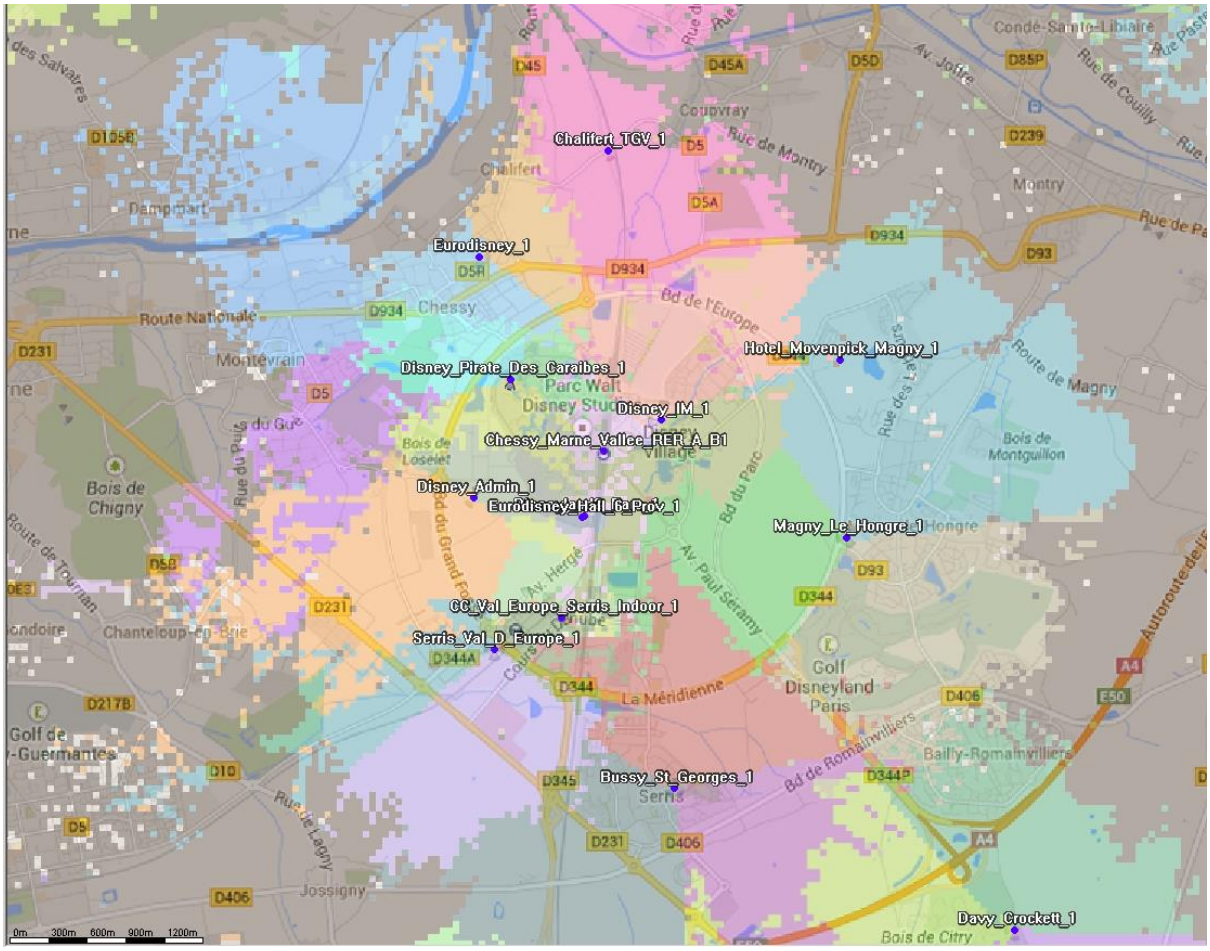
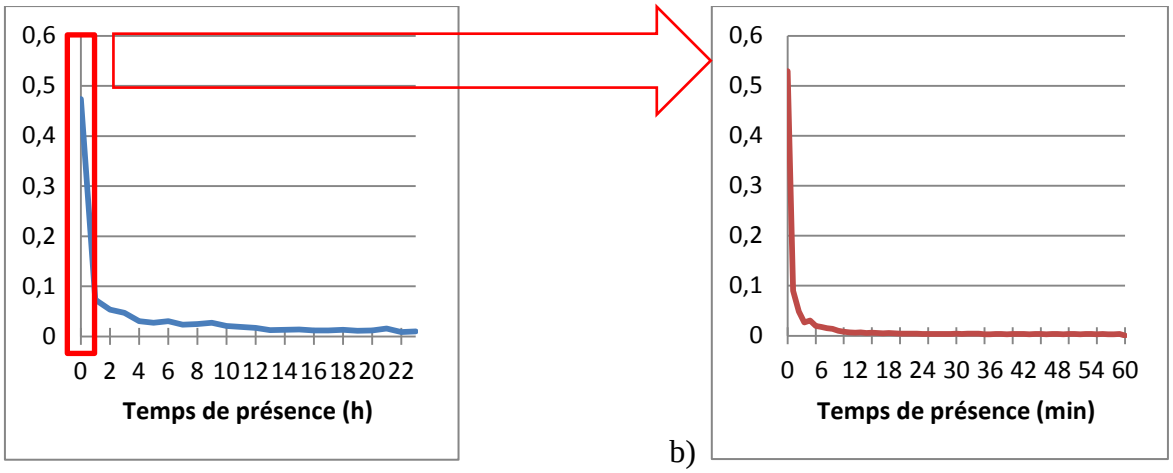


Figure 73 : périmètre « Disney cœur » représenté par une carte de couverture des serveuses principale 2G-900MHz.

Sur la journée du 22 décembre 2012, plus de 100.000 mobiles ont généré un évènement sur le périmètre « Disney cœur » autour du cercle vert (Fig. 66) qui représente le périmètre géographique de Disney. Quasiment tous les mobiles ont déclenché au moins 2 évènements sur cette zone et 50% d'entre eux ont déclenché plus de 12 évènements. Ceci laisse à penser que soit les mobiles étaient inactifs et présents suffisamment longtemps sur le périmètre pour générer au moins 2 LAUP (inactivité de 3h minimum), soit ce périmètre est un lieu de trafic élevé.

Nous définissons la durée présence comme la distance temporelle entre le premier et le dernier évènement sur le périmètre « Disney cœur ». La distribution des mobiles selon le temps passé sur le périmètre est représentée pour des intervalles de temps d'une heure (Fig. 74a) et d'une minute (Fig. 74b). Près de 50% des mobiles ayant déclenché au moins deux évènements sur la zone sont considérés comme étant présents moins d'une heure. Nous vérifions l'hypothèse que les mobiles présents moins d'une heure sont en transit par la Ligne Grande Vitesse en observant la distribution à la minute (Fig. 74b). Plus de 50% des mobiles

présents moins d'une heure étaient présents sur le périmètre moins d'une minute. Ces mobiles sont donc en transit sur le périmètre.



a) b)

Figure 74 : distribution du temps de présence estimé des mobiles sur le périmètre « Disney cœur ». a) Distribution du temps de présence par tranche d'heures. b) Distribution du temps de présence des mobiles présents moins d'une heure sur le périmètre par tranche de minutes.

Le temps de présence sur la zone nous permet d'isoler trois segments comportementaux distincts. Les personnes présentes moins d'une heure sont des personnes en transit LGV et les personnes présentes plus d'une heure sont soit des visiteurs soit des résidents de la zone captés par les cellules de « Disney cœur ». Nous allons essayer de séparer ces différents segments.

3.3.3.1 Identification des résidents du périmètre « Disney cœur »

Nous considérons un mobile comme résident de la zone s'il y a passé la nuit. Etant donné la présence d'hôtels autour de Disneyland, cette méthode est à améliorer en observant à minima la récurrence de présence la nuit sur la zone. Une discrimination des hôtels via l'emplacement géographique des sites radio n'est pas envisageable car la couverture des sites qui inclut les hôtels débordent sur les lieux de résidence avoisinants. Nous appliquons la méthode naïve présentée au §3.3.2 sur le périmètre « Disney cœur ». Cette méthodologie a permis de classer environ 20% des mobiles comme résidents. Plus de la moitié des évènements nocturnes se répartissent sur 4 des sites. Il s'agit de sites couvrant des communes adjacentes telles que Bussy-Saint-George et Magny-Le-Hongre, et des sites du périmètre cœur de Disney où se situent les complexes hôteliers mais aussi où l'activité de maintenance nocturne est proéminente (Disney-intra-muros et Disneyland-parc).

3.3.3.2 Identification des transit LGV

Nous proposons de discriminer le segment des mobiles en transit par leur temps de présence sur la zone qui doit être inférieur à 1h et par la vitesse de traversée de la zone. Les vitesses sont estimées à partir de deux évènements sur des sites distincts. La distance

considérée est la distance euclidienne entre les deux sites. Nous calculons alors la vitesse moyenne sur un « tronçon mobile ».

Nous prendrons l'exemple d'un déplacement vers le nord du périmètre. La destination du tronçon est fixée à la cellule Chalifert TGV dédiée à la couverture de la ligne LGV. Nous considérons plusieurs cellules d'origine représentatives en termes de nombre de trajets. Selon la vitesse moyenne pour parcourir le tronçon, nous effectuons des regroupements notés de 1 à 3 comme le montre le Tableau 6.

Groupe	Cellule d'origine	Cellule de destination	Vitesse moyenne estimée (km/h)
1	DISNEY_INTRA_MUROS	Chalifert_TGV	150,7
1	EURODISNEY_c1	Chalifert_TGV	132,9
2	EURODISNEY_c2	Chalifert_TGV	81,9
2	MONTEVRAIN	Chalifert_TGV	103,9
3	BUSSY_ST_GEORGES	Chalifert_TGV	79,9
3	DISNEYLAND_PARC	Chalifert_TGV	41,9
3	BUSSY_ST_GEORGES	Chalifert_TGV	50,2

Tableau 6: exemple de calcul de vitesse sur un « tronçon mobile ».

Prenons note de la remarque préliminaire suivante : nous avons simplifié l'expression « la cellule C est la serveuse principale sur la zone géographique G » en « la cellule C couvre G ». Concrètement cela signifie que tout mobile situé sur la zone G a une plus forte probabilité d'être rattaché à la cellule C, cependant il n'est pas du tout exclu que ce mobile se rattache à une des cellules voisines de C.

Les cellules « Origines » sont réparties en trois groupes. Tout d'abord les cellules du site Disney-intra-muros et la cellule Eurodisney_c1 sont orientées de sorte à couvrir la ligne de chemin de fer après la gare de Marne-La-Vallée-Chessy. Ainsi, les vitesses moyennes produites correspondent à des vitesses de train. Le groupe 2 contient des cellules qui couvrent la ligne au nord de la gare mais en étant légèrement excentrées. Ainsi les vitesses produites sont plus faibles que celles du groupe 1. Enfin, le dernier groupe contient des cellules qui couvrent la ligne au sud de la gare. Les vitesses sont bien plus faibles car le temps écoulé entre les deux évènements correspond au temps de trajet de la cellule origine à la gare, le temps d'arrêt en gare et le temps de trajet de la gare vers la cellule destination. Il est également envisageable que le trajet soit effectué via un mode de transport routier par le boulevard de l'Europe (Fig. 10, route circulaire entourant le périmètre de Disney).

On constate que l'on peut estimer des vitesses et observer des trajectoires sans évènement de changement de zone de localisation sur une même couche technologique. Dans le cas où la vitesse est un facteur discriminant entre deux modes, cette méthode pourrait s'appliquer à la segmentation modale.

3.3.3.3 Identification des visiteurs du parc

Les deux segments résidents et transit par la LGV étant construits, le dernier segment des visiteurs du parc s'obtient par élimination. Il contient les mobiles présents sur le périmètre « Disney cœur » et n'appartenant pas aux autres segments.

Intéressons-nous aux itinéraires d'arrivée sur le parc. Considérons l'instant du premier évènement sur le périmètre comme le moment d'arrivée. Nous constatons que 30% des visiteurs sont arrivés entre 9h et 11h et que 55% des visiteurs réalisent leur premier évènement sur les sites de Bussy-Saint-George, Magny-Le-Hongre et Disney-intra-muros. Comme le montre la Figure 75, la zone couverte par Bussy-Saint-George (en rouge) englobe un ensemble de routes (A4, D231, D345 et D344) pour une arrivée par le sud de Disney ; la zone couverte par Magny-Le-Hongre (en bleu) se situe à l'est de Disney et couvre la D344, une partie des hôtels et le parking du parc ; le site Disney-intra-muros (en vert) couvre les portes d'entrée du parc et le périmètre de sortie immédiat de la gare Marne-la-Vallée-Chessy qui permet l'accès en TGV et en RER.

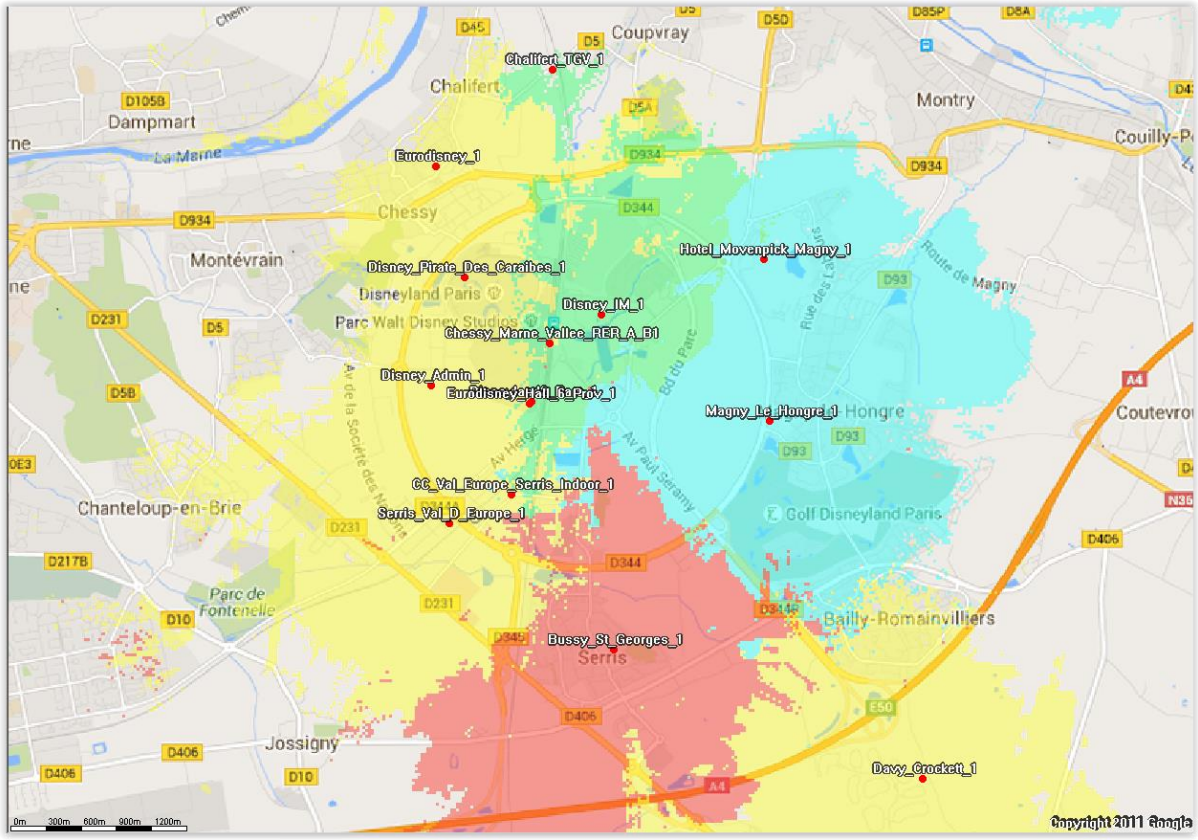


Figure 75 : carte de couverture des serveuses principale 2G-900MHz sur le périmètre « Disney cœur ».

Contrairement à l'étude dans le système de transport en commun, la topologie du « territoire mobile » n'induit pas d'évènement de type LAUN intra-technologie à chaque entrée/sortie du périmètre « Disney cœur ». Ainsi, la probabilité d'avoir un évènement de

signalisation dépend de l'usage par les abonnés du réseau de téléphonie. Néanmoins, des évènements LAUN inter-technologie existent.

Comme pour le cas des transits, nous avons calculé des vitesses moyennes entre les trois sites où les premiers évènements sur la zone se produisent majoritairement et des sites situés à l'intérieur du parc. Les résultats varient entre 1 km/h et 40 km/h et donnent l'impression que des trajets piétons sont mélangés avec des trajets sur la D344. Ces résultats sont difficiles à interpréter pour deux raisons. D'une part, la taille de l'échantillon pour produire ces vitesses était inférieure à 30. D'autre part, il semble qu'une mauvaise interprétation de la mobilité ait corrompu les résultats. En effet, 20% des évènements de type LAUN sur le périmètre cœur sont des LAUN inter-technologie. Or ces évènements correspondent effectivement à un déplacement sur le « territoire mobile » mais pas nécessairement sur le « territoire géographique ».

Ainsi, la méthode proposée ne garantit une précision suffisante pour l'observation des mouvements piétons dans le parc ni une détection du moment et du lieu d'entrée dans le parc. Une discrimination des axes d'arrivée semblerait nécessiter d'observer des changements de zone de localisation le long des principaux axes qui permettent d'accéder à Disney en combinaison d'une analyse des comportements de mobilité estimés.

3.4 Limites de l'interprétation des messages de signalisation

Ce paragraphe est focalisé sur les limites du système de capture constatées dans la production des résultats sur les deux exemples du centre commercial Val d'Europe et du centre de loisir Disneyland. Ces constats produits à partir d'exemples sont relatifs au fonctionnement et à l'architecture des réseaux de télécommunications. Ils sont donc généralisables sur le « territoire mobile » français. Nous proposons des éléments de réponses pour réduire l'impact de ces phénomènes quant à la mesure des déplacements.

3.4.1 Biais spatiaux et temporels pour l'estimation des attributs des déplacements

Nous nous sommes intéressés au travers de ces deux exemples à la mesure de déplacements dans le cas d'un « territoire mobile » standard. Nous avons pu produire certains indicateurs de comportement de déplacement, segmenter ces comportements et estimer des vitesses. Cependant, l'accès à l'estimation de l'ensemble des attributs d'un déplacement est limité par l'échelle spatiale du « territoire mobile » à la cellule, la non-correspondance des frontières des deux territoires, et les différences d'usage des deux territoires qui induisent un décalage temporel variable entre les moments caractérisant un déplacement et les déclenchements des traces de signalisation. Ainsi, dans nos exemples, nous avons fixé soit l'origine soit la destination du déplacement.

On remarque qu'une correspondance des frontières permet d'obtenir une précision spatiale à l'échelle du lieu d'observation. C'est le cas d'une antenne indoor. De plus, plus la durée de l'activité à réaliser sur le lieu est longue, idéalement supérieure à 3 heures, plus la

probabilité de capturer une trace de la présence des mobiles augmente. La période de 3h est fixée par le fonctionnement du réseau de signalisation et garantit que tout mobile allumé produira à minima un évènement toutes les 3h. Toutefois, nous avons vu qu'il est tout même possible de construire des indicateurs lorsque la durée de présence est inférieure à ce seuil, tout en sachant que la probabilité de déclenchement d'un évènement de signalisation au niveau d'une cellule est une fonction du temps de présence du mobile connecté à cette dernière.

Lorsque le périmètre d'étude n'est pas servi par une architecture télécom dédiée ou proposant une configuration particulière, il est toutefois possible de l'isoler grâce à la couverture de la zone et une segmentation des comportements, notamment en exploitant le temps de présence estimé. Cela pose néanmoins des limites lorsque deux périmètres adjacents couverts par un même groupe de cellules sont pratiqués de la même manière. Alors la résolution spatiale semble très délicate à améliorer. On retrouve ces problématiques pour la résolution temporelle, et donc pour l'estimation des heures de départ et d'arrivée. Seule une correspondance entre des territoires où les frontières de zone de localisation se comportent comme des « cordons » garantit le déclenchement d'un évènement pour les différentes étapes du déplacement (début, fin ou position intermédiaire des déplacements).

Dans le cas standard, les déplacements sur un « territoire géographique » couvert par des cellules d'une même couche technologique regroupées en une seule zone de localisation, ne sont repérés que par les comportements d'usage des services mobiles (communications de tout type ou absence de communication pendant une durée prolongée). Les déplacements sur un « territoire géographique » couvert par des cellules regroupées en une seule zone de localisation pour différentes couches technologiques, sont repérés par les comportements d'usage des services mobiles et de mobilité inter-couches. Les déplacements sur un « territoire géographique » couvert par des cellules d'au moins deux zones de localisation pour différentes couches technologiques, sont repérés à la fois par les comportements d'usage des services mobiles, de mobilité inter-couches et d'usage des réseaux de transports. En effet, la transition de zones de localisation via le passage d'une cellule à une autre se produit le plus souvent en mobilité sur un axe de transport. Moins le réseau de transport est dense, plus les cellules de transition de zone de localisation sont discriminantes pour déterminer l'axe de transport parcouru. Ce constat impacte l'estimation du mode de transport, l'itinéraire et des moments de départ et d'arrivée.

Les travaux présentés ici ont pour but de montrer la faisabilité d'observer des déplacements pour un motif donné. Or le système de capture ne révèle pas immédiatement le motif de déplacement. Afin d'associer un motif à un déplacement, nous avons fait des hypothèses basées sur une correspondance entre le « territoire mobile » et le « territoire géographique ». Cette hypothèse est validée sous réserve d'un usage du sol unique sur le périmètre couvert. Cependant, même si un périmètre est utilisé majoritairement pour un type d'activité, comme le loisir ou l'achat, une partie des individus présents, ici repérés par leur mobile, se sont rendus sur ce périmètre pour y travailler, sont venus chercher quelqu'un ou ont transité par la zone via un mode de transport à proximité. Nous avons dû alors procéder à une segmentation des mobiles selon leur pratique du « territoire géographique » extrapolée à

partir d'un comportement sur le « territoire mobile ». Nous n'avons pas procédé à cette segmentation sur l'exemple de Val d'Europe. Les employés du centre commercial pourraient être segmentés selon le temps de présence à la journée, une récurrence de présence à la semaine, une récurrence de présence les samedis d'un mois, etc. Cela montre que le critère spatial n'est pas suffisant.

A ce stade des travaux, les méthodes pour lever les biais d'interprétation des comportements de déplacement induit par l'asynchronisme des mobilités sur les deux territoires, repose essentiellement sur des caractéristiques particulières d'architecture des réseaux et sur des hypothèses de comportements a priori.

3.4.2 **Les difficultés d'interprétation des mobilités entre couches technologiques**

L'exemple de Disney montre que le traitement des évènements de signalisation comme des traces spatio-temporelles présente des limites dans le cas d'un « territoire géographique » couvert par un « territoire mobile » proposant plusieurs couches technologiques. En effet, l'interprétation des évènements de mobilité de type LAUN et LAUP n'est pas immédiate. D'une part, la précision spatiale semble contestée par les règles de fonctionnement d'un tel évènement dont le déclenchement et l'acceptation sont régis par une priorité faible (par rapport aux communications). Une succession d'évènements rejetés ou retardés entraine une perte de précision spatiale avec un décalage aux cellules voisines. La vitesse de déplacement sur le « territoire géographique » perturbe également ce processus. Les évènements Handover sont moins pénalisés que les changements de zones de localisation car les communications sont prioritaires. Toutefois, les Handovers sont plus rares et moins prévisibles car ils dépendent du comportement d'appel des abonnés en mouvement. D'autre part, ces évènements de mobilité correspondent à une mobilité sur le « territoire mobile » qui n'est pas nécessairement corrélée à une mobilité sur le « territoire géographique ». Ainsi, une part des évènements de mobilité correspondent à un déplacement effectif sur le « territoire géographique » tandis que le reste est le reflet de variations de la qualité du signal reçu par un mobile en fonction de l'usage du réseau et de la charge de la cellule.

Citons deux exemples de difficultés de projection des mobilités observées sur le « territoire mobile » vers le « territoire géographique ». Tout d'abord, les mobilités inter-couches au niveau d'un même site, issues d'évènements de changement de zone de localisation d'une couche technologique vers une autre, sont des mobilités uniquement sur le « territoire mobile ». Ensuite, selon le service demandé par un abonné, sa position au niveau de zones de recouvrement des cellules, l'état de charge du réseau et les conditions locales de propagation du signal, deux évènements peuvent être générés au niveau de deux cellules hébergées par des sites de coordonnées différentes sans pour autant que l'abonné ne se soit déplacé sur le « territoire géographique ».

Le périmètre « Disney cœur» contient 10 sites hébergeant à la fois des secteurs 3G, 2G-900MHz et 2G-1800MHz. Les 4 autres ne proposent qu'une « couche technologique 2G ». La Figure 76 représente pour les 14 sites la distribution des évènements inter-

technologie parmi l'ensemble des évènements générés au niveau de l'ensemble des cellules du site. Les changements de technologie de 2G vers 3G sont colorés en gris très clair, les changements de technologie de 3G vers 2G sont colorés en gris et le reste des évènements est coloré en noir. Les quatre sites non équipés de technologie 3G ont une distribution bicolore grise et noire. A part Magny-le-Hongre, ces sites sont situés le long de la Ligne Grande Vitesse et du RER. Les évènements inter-technologie comptent pour 40% à 60% des évènements. Ces évènements semblent correspondre à un déplacement sur le « territoire géographique ». Le site de Chalifert_TGV couvre de manière quasi-exclusive le chemin de fer. Ainsi, une trajectoire constituée d'évènements inter-technologie vers une cellule de ce site capture un déplacement. Les vitesses moyennes produites dans le §3.3.3.2 appuient également ce propos.

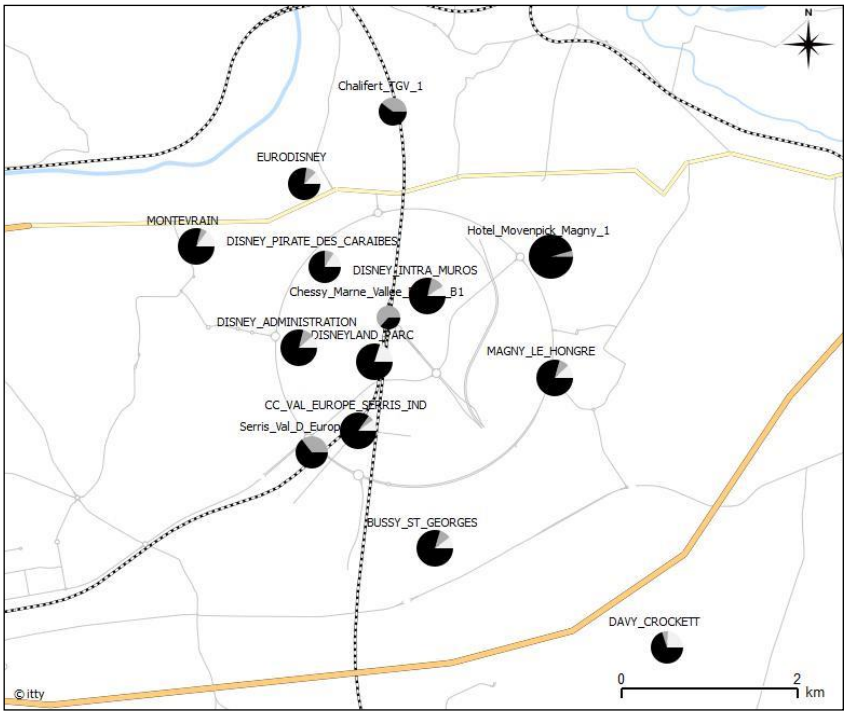


Figure 76 : distribution des évènements inter-technologies parmi tous les évènements déclenchés au niveau des sites du périmètre « Disney cœur » le 22 décembre 2012.

Pour les autres sites du périmètre, environ 20% des évènements sont des changements de technologie. Nous avons constitué des trajectoires sur le « territoire mobile » dont l'origine ou la destination est un évènement de changement de zone de localisation inter-technologie. 90% de ces trajectoires ont un site d'origine identique au site de destination. Ainsi, les évènements de mobilité inter-technologie semblent plutôt décrire une immobilité sur le « territoire géographique ». Les évènements observés ici sont un type particulier de mise à jour de zone de localisation qui se produit lors d'une transition d'une couche technologique vers une autre. Il s'agit d'un mécanisme prévu dans le fonctionnement des réseaux de téléphonie.

Les LAUN et les LAUP contiennent des informations de trajectoires en précisant la cellule « quittée » et la cellule « d'arrivée » après réalisation de l'évènement. Aucune signalisation n'est prévue pour observer les changements de fréquence intra-technologie. Alors, pour étudier les changements de couche sur la trajectoire d'un mobile sur le « territoire mobile », nous constituons un sous-ensemble d'évènements consécutifs d'un mobile qui proposent un changement de fréquence au niveau des cellules d'un même site. Tout type d'évènement est considéré.

Notre périmètre d'étude ne contient pas de frontière de zone de localisation ni en 2G ni en 3G. Nous ne devrions donc pas observer d'évènement de changement de zone de localisation intra-technologie. Pour chaque site, nous observons les paires d'évènements consécutifs qui se sont produits au niveau des cellules d'un même site. Sur la Figure 77, nous avons représenté les changements de fréquence de 900MHz vers 1800MHz en gris clair, les changements de fréquence de 1800MHz vers 900MHz en gris foncé et les évènements n'impliquant aucun changement de fréquence en noir. Les sites qui n'hébergent qu'une seule couche de fréquence pour la technologie 2G apparaissent entièrement en noir. On remarque que les sites situés le long de la ligne de RER (Marne-La-Vallée-Chessy-RERA et Serris-Val-D-Europe) ont une proportion de changements de fréquence bien plus élevée que les autres sites. La distribution de la distance temporelle entre deux évènements consécutifs avec basculement de fréquence montre que plus de 90% des paires d'évènements sont distants de moins de 2 minutes. Ainsi, les changements de fréquence semblent caractériser un comportement de mobilité et l'écart temporel faible entre deux évènements successifs est à associer à la réponse du réseau de télécommunications à un mobile en déplacement.

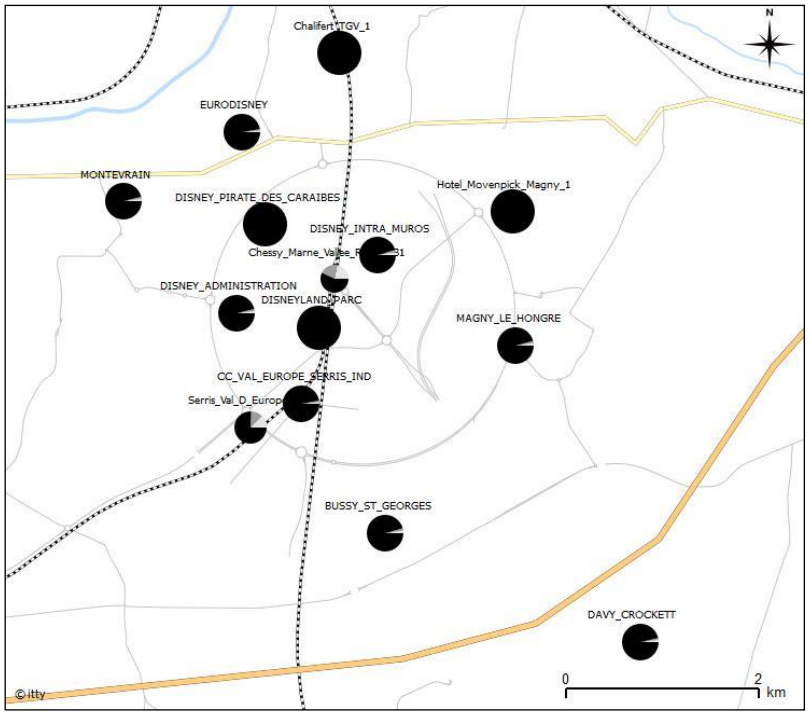


Figure 77 : distribution des changements intra-technologies parmi toutes les paires d'évènements successifs déclenchés au niveau des sites du périmètre « Disney cœur » le 22 décembre 2012.

Comment interpréter les évènements qui ne sont pas associés à un comportement de mobilité, telles que les communications ? Sans connaissance du comportement d'appel en fonction de l'activité réalisée, nous n'avons pas d'autre choix que de traiter ces évènements comme des traces spatio-temporelles appartenant à la trajectoire d'un mobile. Néanmoins, la fréquence d'obtention d'une nouvelle trace dépend du comportement d'appel. Nous rappelons qu'une capture est à minima déclenchée toutes les 3 heures. Ainsi, on définit la capture d'un déplacement d'une zone A vers une zone B comme un évènement au niveau d'une cellule couvrant A suivi d'un évènement au niveau d'une cellule couvrant B, qu'il se produit des évènements intermédiaires ou non. Ces évènements ont une certaine probabilité de se produire qui dépend de la distance temporelle entre ces derniers, de la configuration du réseau mobile couvrant ces points, du comportement du mobile et de l'abonné. Alors, tous les déplacements ne seront pas observables avec la même précision, et certains déplacements courts peuvent même ne pas être remontés par notre système de capture.

3.5 **Conclusion**

Au travers de deux exemples, nous avons montré qu'avec des méthodes de traitement simples des messages de signalisation, certaines composantes des déplacements pour motifs loisir ou achats peuvent être mesurées, lorsque celui-ci est le motif principal de la chaine de déplacement. Les indicateurs produits ici pourraient intéresser aussi bien des acteurs de l'aménagement du territoire comme des gestionnaires de complexes dédiés aux loisirs ou aux

achats que des acteurs de l'offre de transport et même les usagers des réseaux qui optimiseraient leurs loisirs/achats en choisissant les périodes de plus faible affluence aussi bien sur les réseaux de transport qu'au niveau des lieux où ils réalisent leurs activités.

En essayant d'appliquer des méthodes similaires au cas des transports souterrains, nous avons observé des limites relatives au nombre de traces permettant la reconstitution de trajectoires et l'incertitude relative qui découle de la juxtaposition des deux territoires et de leur pratique. Le système de capture à l'échelle de la cellule entraine une incertitude spatiale proportionnelle à la dimension de la cellule mais également à ses « relations » avec les cellules voisines (changement de technologie, charge de la cellule). Ceci entraine un décalage entre la compréhension théorique « a priori » du mécanisme de génération d'évènements de signalisation dans une situation donnée et la compréhension des traces générées, notamment concernant l'interprétation des évènements. Ainsi, tout comme les attributs d'un déplacement sur le « territoire géographique » dépendent des activités qu'il propose et qui y sont réalisées, les déplacements sur un « territoire mobile » dépendent des pratiques des abonnés, de la charge de la cellule mais aussi de la fonctionnalité de la cellule. En effet, le paramétrage d'un ensemble de cellules dédiées au service d'une zone rurale est différent de celui adapté à la couverture d'une LGV ou d'une zone urbaine dense. Se posent alors deux questions : Comment décrire ces relations comportementales sur les deux territoires ? Et comment les exploiter pour estimer des comportements sur le « territoire géographique » à partir des observations sur le « territoire mobile » ?

4 Conclusion

Concluons ce chapitre en soulignant la robustesse de notre solution de capture et des méthodologies associées pour quantifier des variables explicatives de choix d'itinéraires. De tels outils de mesure apportent des compléments aux méthodes d'enquêtes traditionnelles grâce à leur finesse pour estimer des indicateurs relatifs à la perception individuelle mais surtout grâce à la capacité d'être produits de manière dynamique. En effet, nous disposons d'un système de capture disponible de manière permanente. Cependant, nous avons vu que les résultats obtenus ne sont pas de qualité homogène selon le périmètre d'étude. La mise en application sur des exemples n'offrant pas une unicité de correspondance parfaite entre le « territoire géographique » et le « territoire mobile » ne permet pas d'observer des comportements de déplacement avec autant de finesse. Notre système est alors dépendant de la capacité d'interpréter les comportements de déplacements sur le « territoire géographique » perçus au travers du prisme des évènements de signalisation. La résolution spatiale et temporelle dans le cas standard de configuration des réseaux de télécommunications et de transport peut être améliorée avec un enrichissement par des comportements observables à l'aide de la signalisation. Cependant, lorsque l'on considère des trajectoires composées des évènements de signalisation en tant que traces horodatées et géolocalisées à la cellule, l'incertitude même d'avoir une mesure est proportionnelle à la dimension du périmètre d'étude et de la période d'observation. Il s'agit de contraintes fortes pour une généralisation de la solution.

Toutefois, nous n'avons pas encore exploité une information supplémentaire qui est le type d'évènement. En effet, les évènements de signalisation ne sont pas seulement des traces spatio-temporelles générées par le comportement d'un abonné. Elles contiennent une information sur la manière dont le réseau de télécommunication est pratiqué. Nous n'avons abordé cet aspect que pour le choix du périmètre d'étude du système de transport en commun pour assurer la génération de traces. En effet, dans ce premier cas d'étude, le choix du type d'évènement est issu d'un fonctionnement a priori des réseaux de télécommunications et non de la volonté d'étudier plus particulièrement ce type d'évènement. Dans le cadre général, nous avons considéré tous les évènements capturés indépendamment de la fonction qu'ils assurent. Pourtant, le paragraphe 3.4.2 montre des signatures de la pratique du « territoire géographique » sur la signalisation qu'il faut analyser avec soin. Nous avons vu, particulièrement dans la deuxième section, qu'une meilleure compréhension des usages sur le « territoire géographique » passe par une maîtrise et une qualification des fonctionnements du réseau mobile qui sont retranscrits par les messages de signalisation. Nous poursuivons ainsi nos investigations vers une analyse des évènements et leurs corrélations avec l'usage du sol. Le chapitre suivant est donc consacré à l'information contenue dans une base de données d'évènements en considérant une démarche inversée par rapport aux travaux présentés jusqu'ici. A la place de prendre un « territoire géographique » d'intérêt et d'analyser les évènements générés au niveau de cellules qui le couvrent, observons un ensemble d'évènements au niveau de cellules pour en déduire l'usage du sol mesuré puis observer la projection sur le « territoire géographique » de cette couverture enrichie d'information sur la pratique du « territoire mobile ».

Chapitre 7 : D’une approche d’exploration des données vers les perspectives d'enrichissement des méthodes

Vers l'exploration des données

Ce chapitre de clôture présente les dernières investigations menées pendant ces 3 ans ainsi que les perspectives relevées par l'auteure à l'issue de ses travaux. L’objectif est de proposer une approche alternative, basée sur une analyse exploratoire des données de signalisation, pour mettre en évidence des intrications des pratiques des réseaux. Le produit d’une telle analyse enrichira notre compréhension des mécanismes de déclenchement de la signalisation dans le cadre d’usage des territoires et apporte un complément pour lever les limites observées dans la deuxième section du chapitre 6. Dans ce dernier, nous avons exploité le potentiel de la solution de mesure de déplacements à partir des traces de signalisations engendrées par les téléphones mobiles en les considérant comme des points de mesure horodatés et géo-localisés à l'échelle d'une cellule. Jusque-là, nous avons affiné les résultats en nous appuyant sur une connaissance a priori du contexte de réalisation des évènements sur le « territoire géographique » sur lequel nous projetions le « territoire mobile » afin de poser un appariement entre les découpages des deux territoires. Les chapitres 5 et 6 concluent sur la robustesse d’un tel procédé qui permet d'accéder à des résultats fins pour certaines configurations des intrications entre les deux territoires, notamment dans le cas du système de transport en commun ferré souterrain d'Ile-de-France. Toutefois, l'exemple en Seine et Marne nous a montré que nous perdons en précision spatio-

temporelle dans le cas de configuration standard des réseaux. Néanmoins, parmi les caractéristiques remarquables de notre système de capture, nous soulignons sa disponibilité permanente qui nous a permis d'observer des comportements de déplacements en fin de semaine, mais également le volume de données remontées en tout point d'un territoire. Il s'agit alors d'explorer les caractéristiques de volume et le type d'évènement de signalisation. Les résultats des analyses menées, présentées et acceptées à la conférence TRA 2014, alimentent également les perspectives de futurs travaux pour que les mesures de déplacements et indicateurs de mobilités soient utiles aux acteurs des transports. La définition de données utiles pour ces acteurs repose sur les notions fiabilité, pertinence, cohérence et de pérennité.

Ce chapitre est construit de la manière suivante. Tout d'abord, nous exposerons les travaux menés sur l'analyse exploratoire d'un jeu de données composé d'évènements de signalisation. Ils proposent une ouverture à exploiter pour lever les imprécisions constatées. Nous présenterons à la suite trois axes d'intérêt pour poursuivre ce travail de thèse. Les méthodologies de redressement sont un sujet d'investigation à court terme qui assurera aux acteurs la fiabilité, la pertinence et cohérence au travers de données comparables à d'autres sources et adaptées à la calibration des modèles. Des travaux à moyen terme concernent les évolutions des usages intriqués des deux réseaux ainsi que les mutations des architectures des réseaux de télécommunications à étudier plutôt à moyen ou long terme afin de garantir la pérennité des mesures de déplacement.

1 Analyse d'un ensemble statistique d'évènements de signalisation

Cette analyse a deux objectifs principaux. Tout d'abord, nous avons souhaité s'affranchir d'une connaissance a priori des intrications entre les deux territoires, en raison des limitations induites par une méthode exploitant des superpositions des découpages des territoires. Alors nous essayons de dégager des informations sur la correspondance entre une cellule et le territoire qu'elle couvre à posteriori. Ensuite, nous avons la volonté d'exploiter les informations de type d'évènement non considérées jusqu'alors.

Ces travaux s'inscrivent dans la poursuite des investigations sur le jeu de données recueillies le 22 décembre 2012 sur le territoire de Seine-et-Marne. Nous proposons d'analyser ce jeu de données comme un ensemble de point que l'on apparente à des 4-uplets *(m, h, e, c)* - avec *m* un identifiant anonyme de mobile, *h* l'instant de déclenchement de l'évènement de signalisation à la milliseconde, *e* le type d'évènement et *c* l'identifiant de la cellule au niveau de laquelle l'évènement s'est produit. Nous rappelons qu'à une cellule sont associées les informations de localisation de site, de technologie et de fréquence. Toutefois, contrairement aux études présentées dans les chapitres précédents, nous n'associons pas à cette cellule un « territoire géographique ».

Cette section reprend le contenu de (AGUILERA, et al., 2014, April) et est construite de la manière suivante. Elle débute par une présentation succincte de l'ensemble des données traitées. Ensuite les travaux sont présentés suivant deux approches empruntées à la

mécanique des fluides. Dans un premier cas, nous nous placerons schématiquement au niveau d'une cellule afin d'analyser le flux de signalisation qu'elle « observe » (perspective eulérienne) et nous nous intéresserons à caractériser le flux des évènements selon le type au travers d'une distribution et d'une analyse en composante principale. Dans un deuxième temps, nous proposons une étude des trajectoires au travers d'une approche lagrangienne. Nous étudierons alors les comportements d'usage du réseau de téléphonie au travers de la distribution du nombre d'évènements réalisés et la distance temporelle qui les sépare. Nous nous interrogerons alors sur les corrélations entre l'usage de la téléphonie et la mobilité sur le « territoire mobile » pour finir par la construction d'un indicateur d'immobilité et de sa projection sur le « territoire géographique ».

1.1 Présentation du jeu de données

L'ensemble de données collectées pour réaliser les études sur Val d'Europe et Disneyland Paris est également utilisé dans ce chapitre. Le lecteur est invité à consulter le paragraphe 3.2 du chapitre 6 pour toute information complémentaire sur les aspects géographiques et télécoms de la zone d'étude.

Rappelons que la collecte des données a eu lieu le 22 décembre 2012. Cet ensemble est constitué d'évènements disponibles sur les « couches technologiques » 2G et 3G comme décrit chap. 6, §3.3.1. Il s'agit des évènements ayant transité sur les canaux de signalisation « circuits » en 2G et sur les canaux de signalisation « circuits » et « paquets » en 3G. Cela signifie que la signalisation pour les communications « data » en 2G n'a pas été remontée. Ils ont été extraits de 14 zones de localisation différentes (7 en 2G ; 7 en 3G). L'ensemble des sites hébergeant les cellules de ces 14 zones de localisation ont leur coordonnées à l'intérieur des frontières administratives du département de Seine-et-Marne et en dehors. La Figure 78 représente la position sur le territoire des sites de technologies 2G. Les différents points représentent l'emplacement approximatif d'un site et sont colorés selon le découpage en zone de localisation. En représentant les coordonnées des sites sur le territoire géographique, on remarque que pour la partie Est du département de Seine-et-Marne, les coordonnées des sites sont incluses dans les limites administratives du département. Cela ne signifie pas que le périmètre mobile, à savoir la couverture des antennes portées par ces sites, présente une frontière superposée à celle du département. La frontière Ouest ne pose pas cette ambiguïté avec une majorité des sites des zones de localisation qui couvrent la frontière se situant en dehors du département. Nous appellerons le « territoire mobile complet» la couverture de l'ensemble de ces sites. Evidemment, les frontières de ce « territoire mobile complet » débordent autour des limites administratives du département. Alors nous avons constitué un deuxième périmètre mobile, noté « territoire mobile du 77 », composé des cellules dont la couverture se superpose avec le département. Il s'agit du « territoire mobile » considéré dans le chapitre 6.

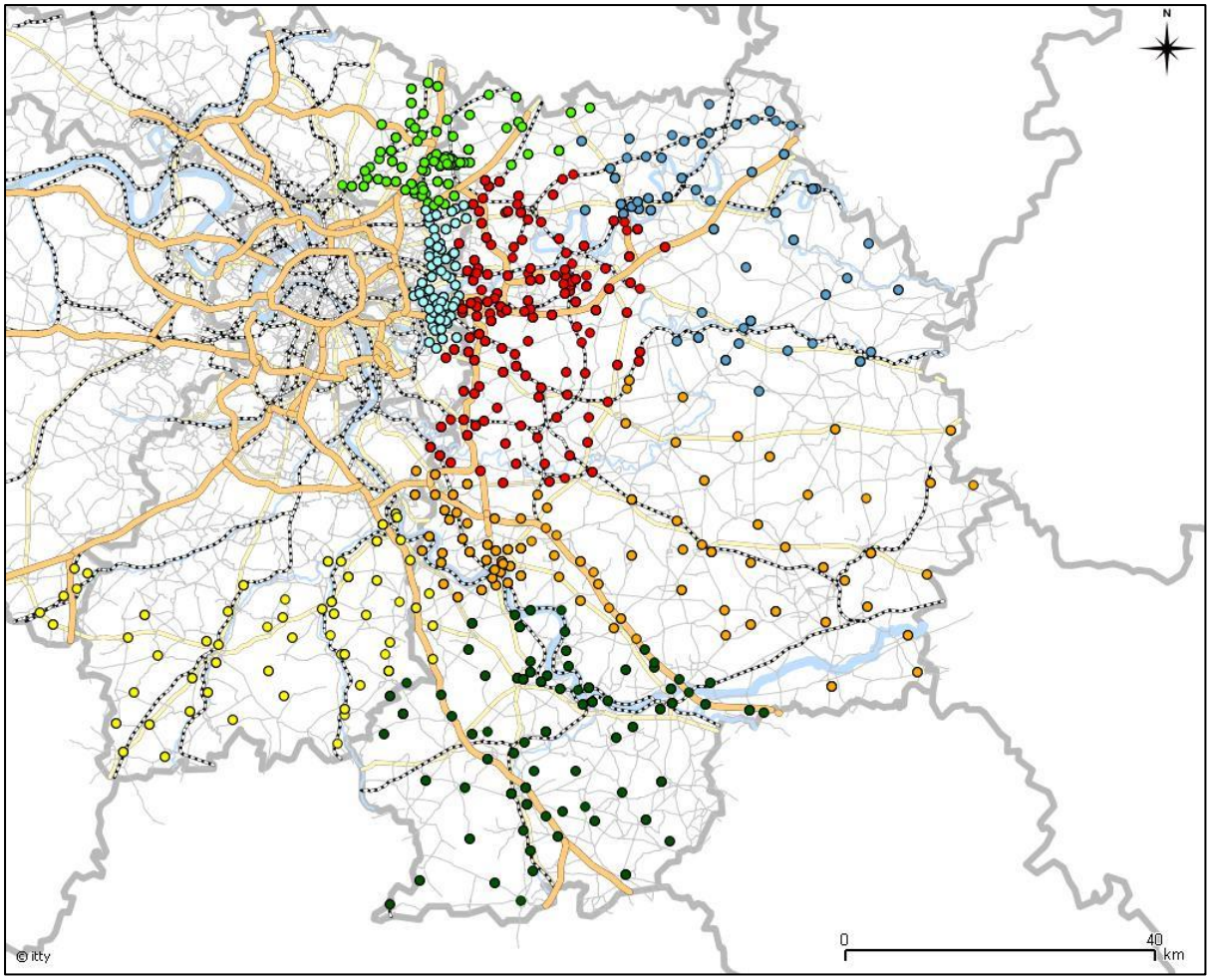


Figure 78 : carte de l'emplacement approximatif des sites 2G constituant le périmètre mobile de l'étude et regroupés par zones de localisation (une couleur par zone de localisation).

Le Tableau 7 donne quelques statistiques sur les ensembles de données constitués à partir des deux « territoires mobiles ».

	« territoire mobile complet »	« territoire mobile du 77 »
Nombre total d'évènements	102 millions	68,6 millions
Nombre de mobiles distincts	1,85 millions	1,2 millions
Nombre moyen d'évènements par mobiles	52,39	51,17

Tableau 7 : Statistiques sur les ensembles de données produits sur les « territoires mobiles » le 22 décembre 2012.

On notera que la population de Seine-et-Marne est d'environ 1.3 millions (voir chapitre 5, paragraphe 3.2.1), alors que le nombre de mobiles observés est de 1.2 millions. Or la part de marché d'Orange, et d'utilisateurs sur réseau Orange n'a pu être aussi élevée ce jour. Nous avons donc capturé des mobiles d'abonnés ne résidant pas en Seine-et-Marne. Ceci était

attendu en raison de la nature du territoire (cf. chap. 5, §3.2.1) et du jour d'observation qui était le premier samedi des vacances de fin d'année 2012.

Par la suite, nous travaillerons sur le « territoire mobile complet » car il offre un « cordon de zone de localisation » autour du département.

1.2 Approche eulérienne

En mécanique des fluides, l'approche eulérienne consiste à faire une photographie avec un temps de pose très cours du fluide en écoulement pour en dégager sa vitesse. Nous nous basons sur cette analogie en considérant l'observation du flux de signalisation au niveau des cellules. Le temps de pose de la photographie est alors la réalisation d'un ensemble d'évènements au niveau d'un point d'observation, ici la cellule. Cela nous permettra de caractériser les cellules sous l'angle du type d'évènement. En effet, selon l'usage du sol couvert, on s'attend à une caractérisation de la cellule, en terme de distribution du type d'évènements, qui varie.

1.2.1 Distribution par type d'évènements

La distribution du type d'évènement agrégé à l'ensemble des cellules du « territoire mobile complet » est représentée sur la Figure 79 pour la journée du 22 décembre 2012. La définition des acronymes se trouve dans le chapitre 4 au paragraphe 2.1.2.2. On remarque que 4 types d'évènement, GMM_SERVICE, COM0, COM1 et LAUN, représentent 80% de l'activité de signalisation de cette journée.

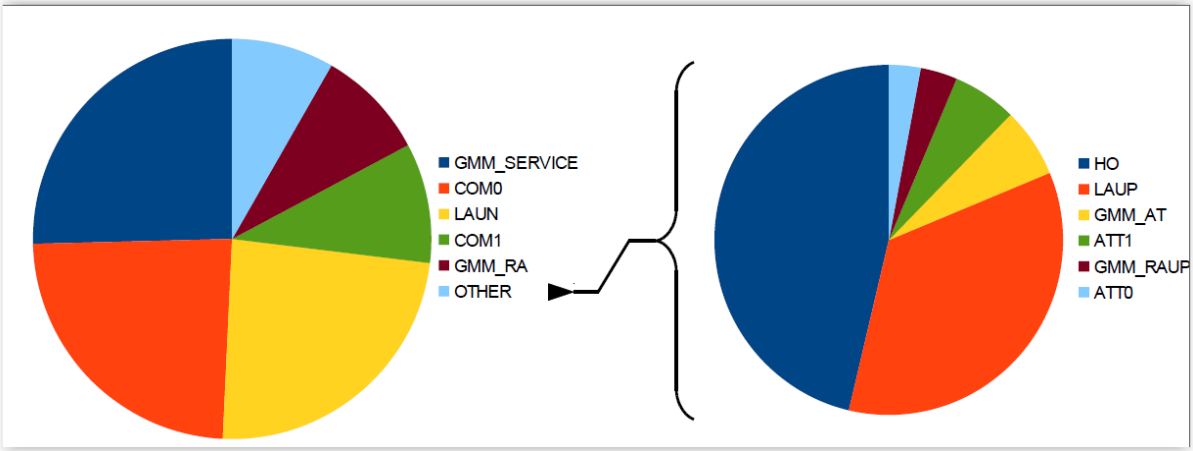


Figure 79 : distribution du type d'évènements de l'ensemble de données du « territoire mobile complet » le 22 décembre 2012.

Les évènements de mobilité étaient pressentis pour être nombreux car le « territoire mobile complet» est divisé en 7 zones de localisation pour la couche 2G et 7 zones de

localisation pour la couche 3G. Les autres évènements majoritaires correspondent à des communications - fonctions d'appels et SMS et à l'utilisation des ressources data en 3G. Les 20 % restant sont des changements de zones de service 3G (GMM_RA) et un groupe pêle-mêle dont les Handover et les LAUP représentent 80%. Ainsi, à l'échelle du « territoire mobile complet », la majorité des évènements sont liés à l'usage du réseau de télécommunications pour sa fonction première : les communications. Cela se vérifie-t-il à l'échelle d'une cellule ?

1.2.2 Analyse en composantes principales

Afin d'observer les relations qui existent entre la distribution des évènements à l'échelle d'une cellule, c'est-à-dire la manière dont elle est pratiquée sur le « territoire mobile », et l'usage du sol qu'elle couvre, nous avons recours à l'analyse de données. Afin de transformer des variables corrélées en nouvelles variables décorrélées les unes des autres, nous procédons à une analyse en composante principale de l'ensemble des évènements de signalisation en prenant comme variable le type d'évènement et comme observation la volumétrie par type d'évènement par cellule. La Figure 80 représente le système d'axes explicatifs en type d'évènement selon des composantes principales qui portent 65% de l'explication. L'axe horizontal porte l'information de technologie et l'axe vertical celui de la mobilité.

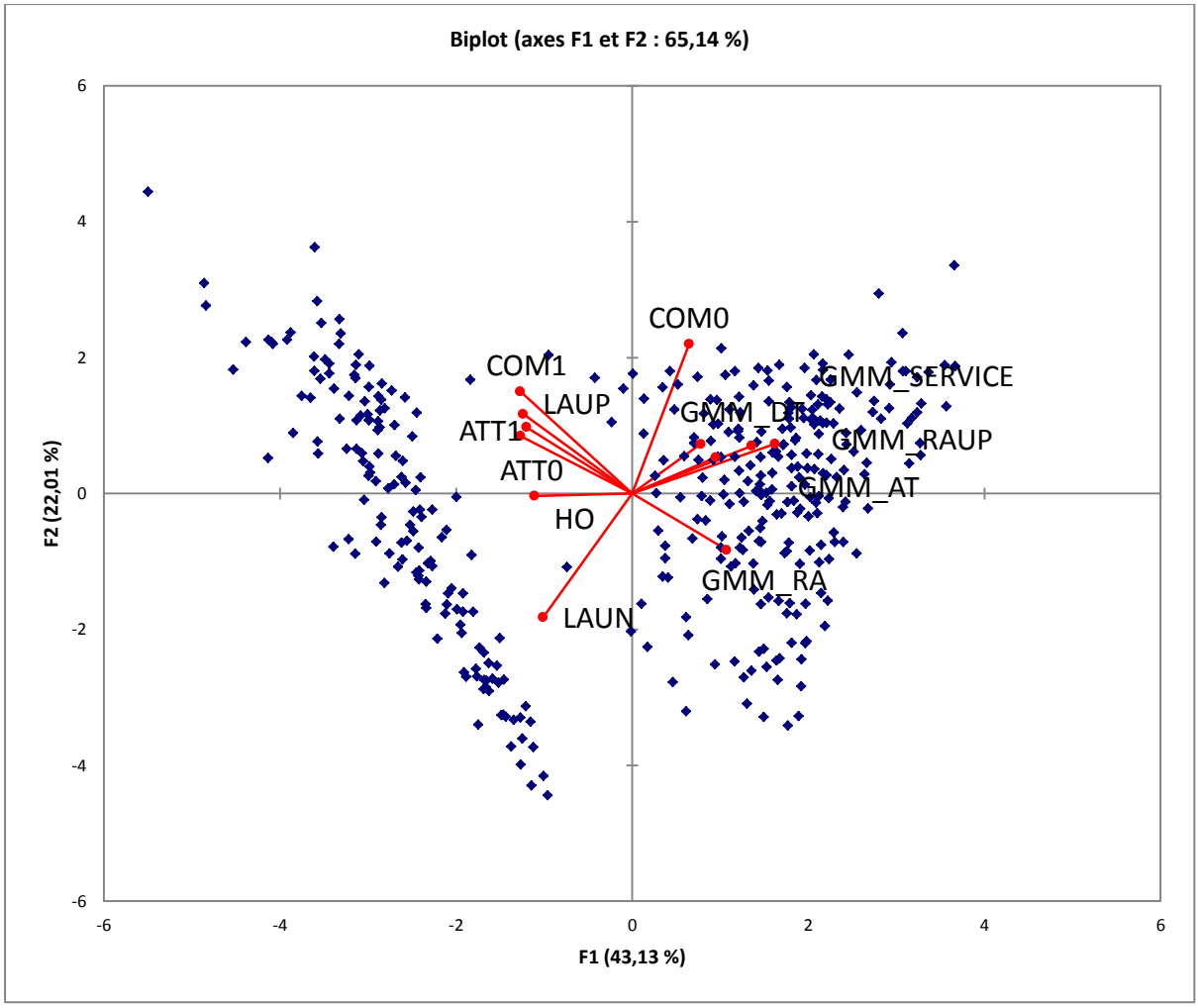


Figure 80 : représentation sur deux axes de l'analyse en composante principale des types d'évènement par cellules.

Le carré en haut à droite regroupe des cellules utilisées majoritairement pour des services 3G en situation d'immobilité sur le « territoire mobile complet ». Une proportion de ces cellules est d'ailleurs hébergée par des sites ne portant pas d'antenne 2G. En projetant ces cellules sur le « territoire géographique », on observe qu'elles couvrent des zones densément peuplées. A l'inverse, les cellules du carré en bas à gauche correspondent à des cellules de technologie 2G qui abritent majoritairement des évènements de mobilité. Après projection, on s'aperçoit que ces dernières couvrent principalement des axes de transport éloignés des agglomérations. De même, le groupe en haut à gauche contient des cellules dédiées à la couverture de villages faiblement peuplés et éloignés des pôles de densité. Enfin, le groupe de cellules en bas à droite correspond à une activité de mobilité en 3G. Il s'agit de cellules en périphérie des zones de forte densité de population et de certains axes de transport structurants où une offre de service télécom en data est proposée. C'est le cas pour les

nouvelles lignes à grande vitesse dont le développement est actuellement accompagné d'un déploiement d'un réseau de télécommunications dédié.

Alors, en regard de la couverture, qui est la projection du « territoire mobile » sur le « territoire géographique », l'activité de signalisation observée par une cellule fournit de l'information sur l'usage télécom qui est fait de cette cellule. Or, on remarque que ce dernier est corrélé à l'usage du sol. Ceci offre des perspectives pour affiner les projections a priori établies dans les études précédentes et met en relief l'intérêt d'un regroupement des cellules selon l'usage télécoms.

1.3 Approche lagrangienne

En dynamique des fluides, la description lagrangienne consiste à suivre dans le temps les particules fluides le long de leurs trajectoires. Nous nous basons sur cette analogie en considérant l'observation de trajectoires dans le flux de signalisation. Le temps de pose de la photographie est alors le temps écoulé entre deux évènements. La réalisation d'un ensemble d'évènements est analysée au niveau d'un point d'observation mobile, ici le terminal mobile. Cela nous permettra de caractériser les séries temporelles des évènements sous différents angles et d'approfondir l'information disponible au niveau des trajectoires des mobiles.

1.3.1 Distribution du volume d'évènements générés par les mobiles

La Figure 81 montre la distribution des mobiles selon le nombre d'évènements générés sur le « territoire mobile complet ». On remarque que plus de 90% des mobiles ont déclenché au moins 2 évènements dans la journée, 50% en ont généré plus de 14, et moins de 15% ont déclenché plus de 100 évènements. La distribution est régulière à l'exception d'un pic à 8 évènements, il représente 5% de l'ensemble des mobiles ayant généré au moins un évènement. En supposant une fréquence régulière de déclenchement des évènements sur une journée de 24h, les mobiles ayant généré 8 évènements dans une journée les ont en moyenne espacés de 3 heures. Cela semble correspondre aux évènements d'immobilité et d'inactivité, les LAUP, qui sont émis toutes les 3 heures lorsque un mobile ne change pas de zone de localisation et n'émet ni ne reçoit de communication. Il s'agit vraisemblablement de mobiles avec un accès 2G uniquement, ou ayant désactivé leurs services « data », car les abonnements permettant l'usage de « data » vont souvent de pair avec l'usage d'applications nécessitant des mises à jour, et donc une communication entre le réseau et le mobile. Hormis ce pic à 8 évènements, la distribution a la forme d'une loi de probabilité à queue lourde comme une loi de puissance.

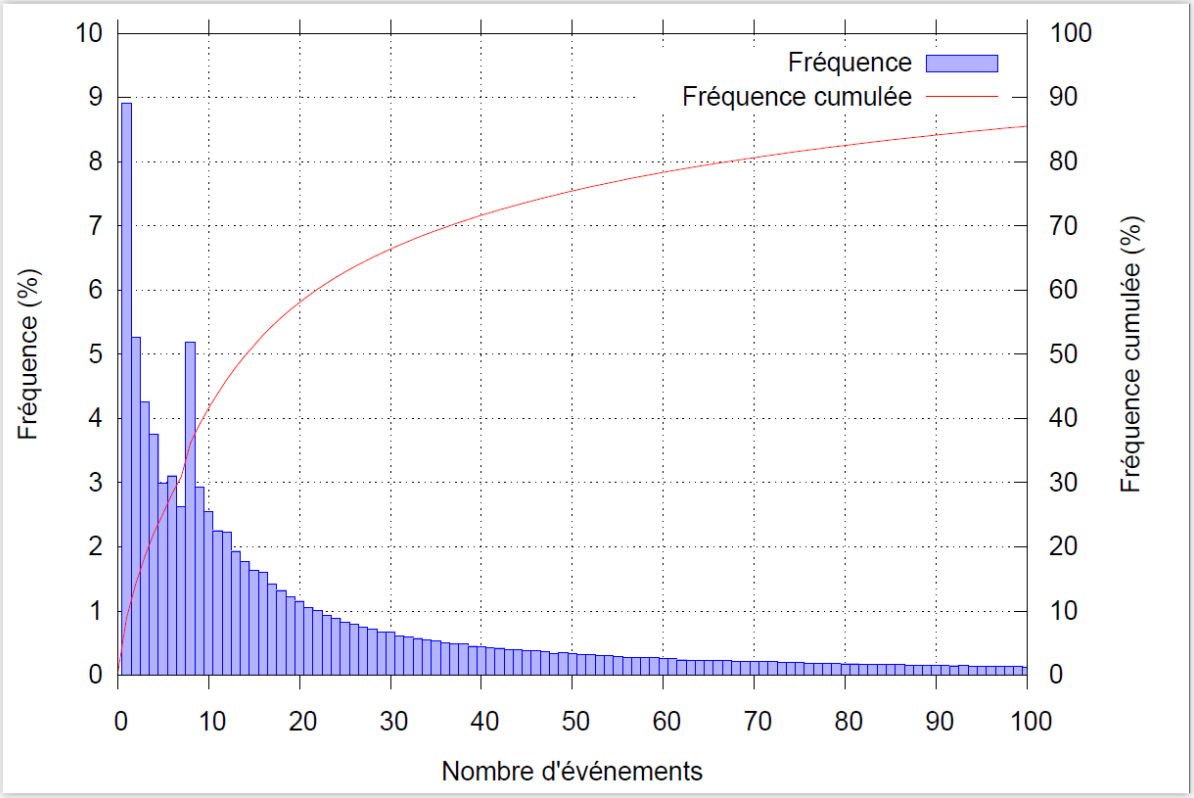


Figure 81 : distribution du nombre de mobiles en fonction du nombre d'évènements générés par ces mobiles le 22 décembre 2012.

1.3.2 Distance temporelle entre des évènements consécutifs des mobiles

La distribution de la distance temporelle entre deux évènements consécutifs d'un même mobile est représentée sur la Figure 82. L'allure de la courbe est quasiment régulière jusqu'à 170 minutes. On observe des pics faibles à 15, 30, 60 et 120 minutes. Il est difficile à savoir si ces pics représentent l'espace de temps moyen entre deux conversations sans mobilité de l'abonné ou entre deux évènements de mobilité lors d'une traversée d'une zone de localisation. Néanmoins, le pic à 180 min (3h) s'explique par la distance temporelle maximum entre deux évènements de signalisation pour un mobile qui est resté en permanence allumé dans la zone d'étude. Il s'agit de la distance temporelle caractéristique des LAUN. Ce pic est à mettre en rapport direct avec la distribution du nombre d'évènement générés par mobiles (Figure 81).

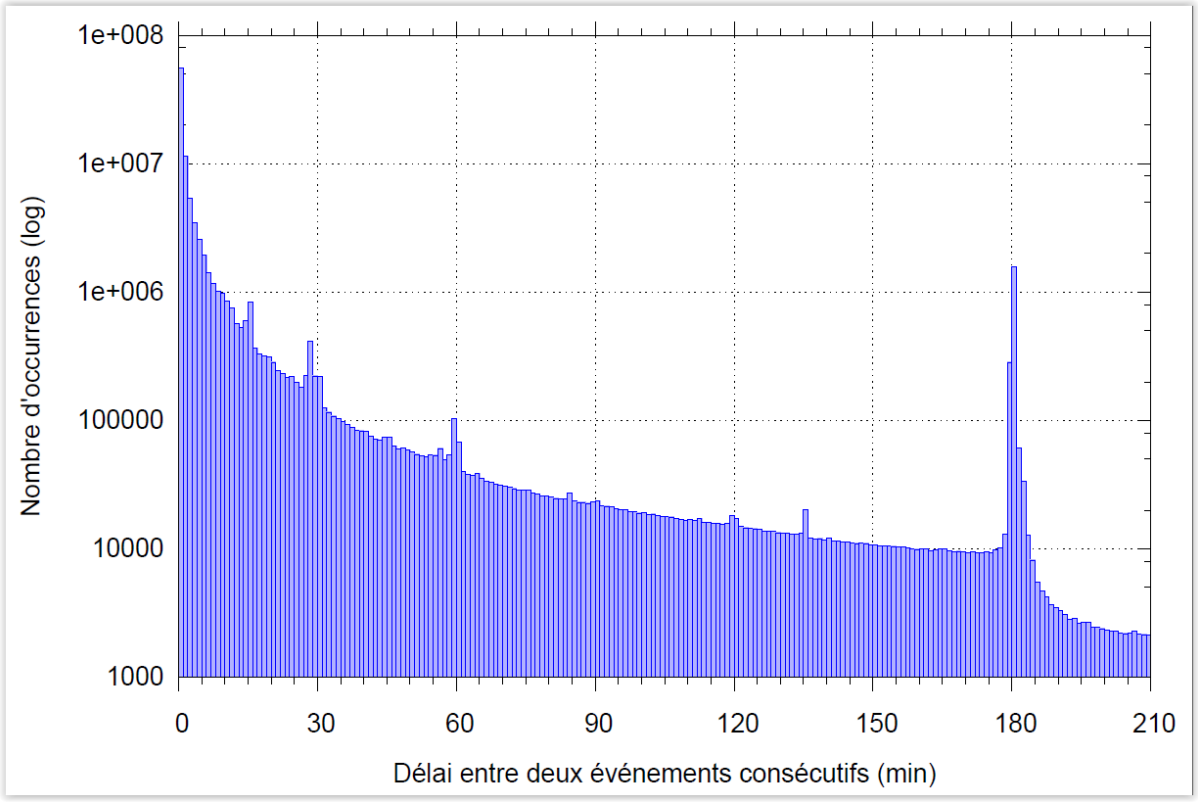


Figure 82 : distribution des mobiles selon l'écart temporel entre deux évènements consécutifs.

Les irrégularités de ces distributions semblent correspondre à des évènements LAUN qui illustrent un comportement d'immobilité et d'inactivité sur le « territoire mobile complet ». Toutefois, comme le montre la Figure 79, les LAUN ne sont pas les évènements les plus déclenchés. De plus, ils représentent le lien entre l'inactivité et l'immobilité. Intéressons-nous alors aux relations entre l'activité et la mobilité.

1.3.3 Comportement d'appel et de mobilité

Considérons le jeu de données comme un ensemble de trajectoires des mobiles. En effet, on associe à chaque mobile un certain nombre de points, collectés lorsque ces derniers génèrent un évènement, contenant des informations de coordonnées géographiques - l'emplacement du site hébergeant la cellule vers laquelle s'est produit l'évènement -, d'horaire - le moment de déclenchement de l'évènement - et de contexte - le type d'évènement réalisé. Alors, nous pouvons construire pour chaque mobile une longueur de trajectoire, en terme de distance euclidienne entre les coordonnées des sites, pendant une certaine période d'observation. De plus, pour cette trajectoire, on peut compter le nombre d'évènement d'un certain type. La Figure 83 représente la distribution de COM1 (communication émise) en fonction de la distance parcourue sur le « territoire mobile complet ». Il est important de noter que cette dernière diffère de la distance parcourue sur le « territoire géographique ». En effet, un mobile capturé comme connecté à une cellule mais situé en périphérie de la zone couverte

peut se déplacer physiquement sur une très faible distance, voir ne pas se déplacer du tout, et générer son prochain évènement sur la cellule voisine. Selon le rayon de couverture de ces cellules voisines, un déplacement sur le « territoire mobile » de quelques kilomètres peut correspondre à un déplacement sur le « territoire géographique » de quelques mètres.

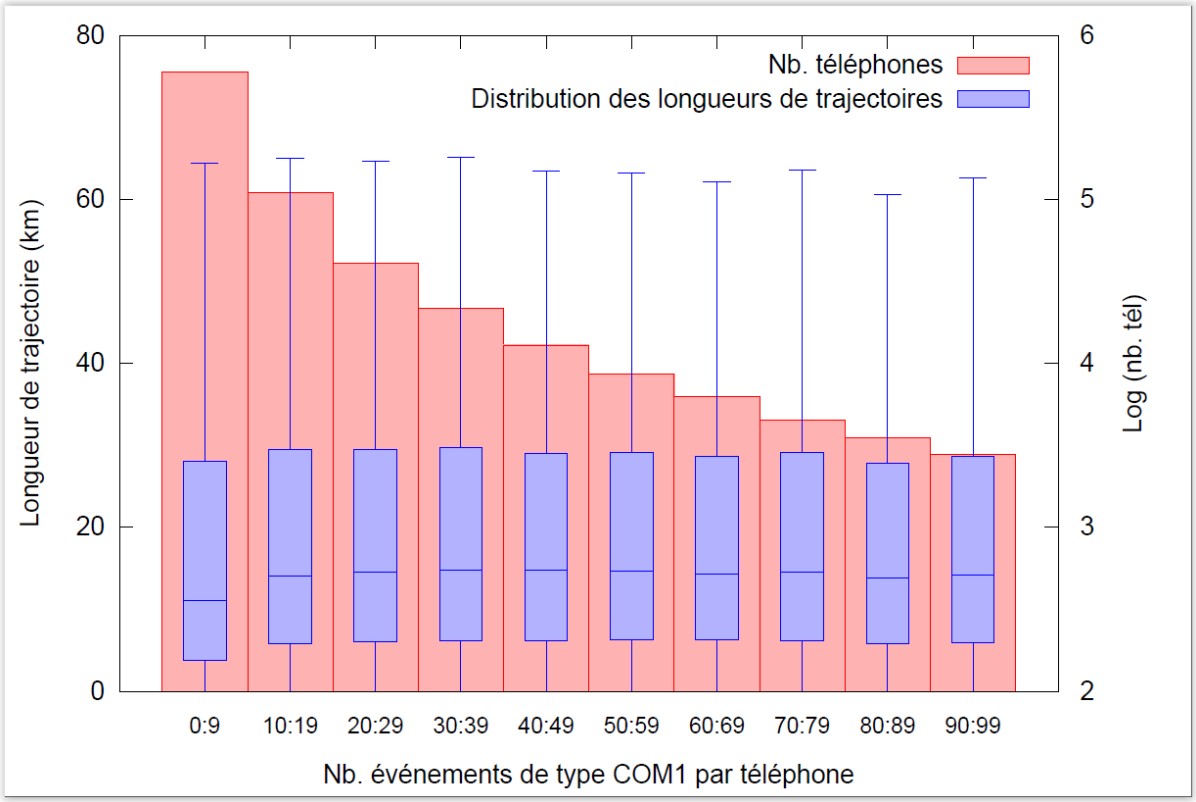


Figure 83 : distribution du nombre de mobiles et de la portée de leur trajectoire mobile en fonction du nombre de communications émises.

Un découpage arbitraire en nombre d'évènement de type COM1 déclenché par mobile est proposé. Ces mobiles sont classés dans des silos d'une largeur de 10. Par exemple, le silo [0 ; 9] contient les mobiles ayant émis moins de 10 appels dans la journée du 22 décembre 2012. La distribution de la longueur de trajectoire est calculée pour chaque silo. Sur la Figure 27, les barres rouges indiquent le nombre de mobiles dans chaque silo (l'axe des ordonnées correspondant est l'axe de droite, en échelle logarithmique). Les distributions des longueurs de trajectoires sont représentées par les boites à moustache en bleu (l'axe des ordonnées correspondant est celui de gauche). D'un silo à l'autre, les caractéristiques statistiques des distributions sont remarquablement stables à l'exception du silo [0 ; 9]. Les valeurs de ce silo sont légèrement inférieures à celles des autres silos. Cependant, les valeurs médianes, les écarts interquartiles et les valeurs extrêmes sont relativement proches. On peut trouver plusieurs explications à cela. Tout d'abord, les mobiles présents sur le « territoire mobile complet » pendant une faible partie de la journée introduisent un biais. De plus, la taille des cellules, et leur charge ont une grande influence sur la mesure de la longueur des trajectoires.

Nous avons considéré les communications émises car elles sont à l'initiative des abonnés. Il serait intéressant pour approfondir la compréhension de ces phénomènes de refaire l'exercice pour les communications reçues.

La Figure 83 ne dévoile pas de tendance statistique claire ni de corrélation marquée entre les activités de communication et la mobilité sur le « territoire mobile ». Toutefois, l'analyse en composante principale a révélé que COM1 et LAUP ont des projections semblables. Des analyses complémentaires sont donc à mener pour éclaircir ces relations. Avant cela, nous étudierons les évènements de type LAUP.

1.3.4 Application à l'étude de l'immobilité en Seine-et-Marne

Les paragraphes 1.3.1 et 1.3.2 ont montré qu'une part non négligeable des mobiles n'avait pas eu d'activité sur le « territoire mobile ». Comme l'analyse des corrélations entre mobilité et activité de communication ne nous a pas permis de caractériser les intrications entre les usages des deux réseaux, nous investiguons la notion d'immobilité. Elle est reflétée par les évènements de type LAUP qui représentent une inactivé de service et une inactivité spatiale sur le « territoire mobile ». Rappelons qu'il s'agit d'une inactivité à l'échelle de la zone de localisation, c'est-à-dire approximativement 1/7 du « territoire mobile complet » lorsqu'on se place sur une seule couche technologique. Cela parait bien vaste pour parler d'immobilité. Nous proposons alors la notion d'immobilité à la journée suivante. Un mobile est considéré comme immobile si sa trajectoire vérifie:

$$\begin{cases} \max(h_i) - min(h_i) > 2h & (1) \\ \min(x_i) = \max(x_i) & (2) \\ \min(y_i) = \max(y_i) & (3) \end{cases}$$

La condition (1) assure que la distance temporelle entre le premier évènement de la trajectoire et le dernier évènement de la trajectoire est supérieure à 2 heures. Ce seuil a été choisi pour être inférieur à 3 heures (temps d'inactivité télécom qui entraine le déplacement d'un LAUP) et supérieur au temps de traversée maximal d'une zone de localisation par les axes de transport principaux. Les conditions (2) et (3) assurent que le premier et le dernier évènement de la trajectoire se soient produits vers les cellules d'un même site, lorsque l'on note les coordonnées d'un site (x,y). Alors parmi tous les mobiles ayant généré au moins un évènement sur le « territoire mobile complet », 11% (183.600) sont considérés comme immobiles.

Alors pour chaque site, nous définissons un indice d'immobilité au niveau du site noté TII pour Tower Immobility Index. Il est construit de la manière suivante pour le site s:

$$TII_s = \frac{Nombre\ de\ mobiles\ \text{"immobiles"}\ connectés\ \text{à}\ une\ des\ cellules\ de\ s\ pendant\ la\ journée}{Nombre\ de\ mobiles\ connectés\ \text{à}\ une\ des\ cellules\ de\ s\ pendant\ la\ journée}$$

Nous représentons cet indice sur la carte de la Figure 28. Les frontières des cellules sont schématisées par un Voronoï des cellules de la « couche technologique 2G ».

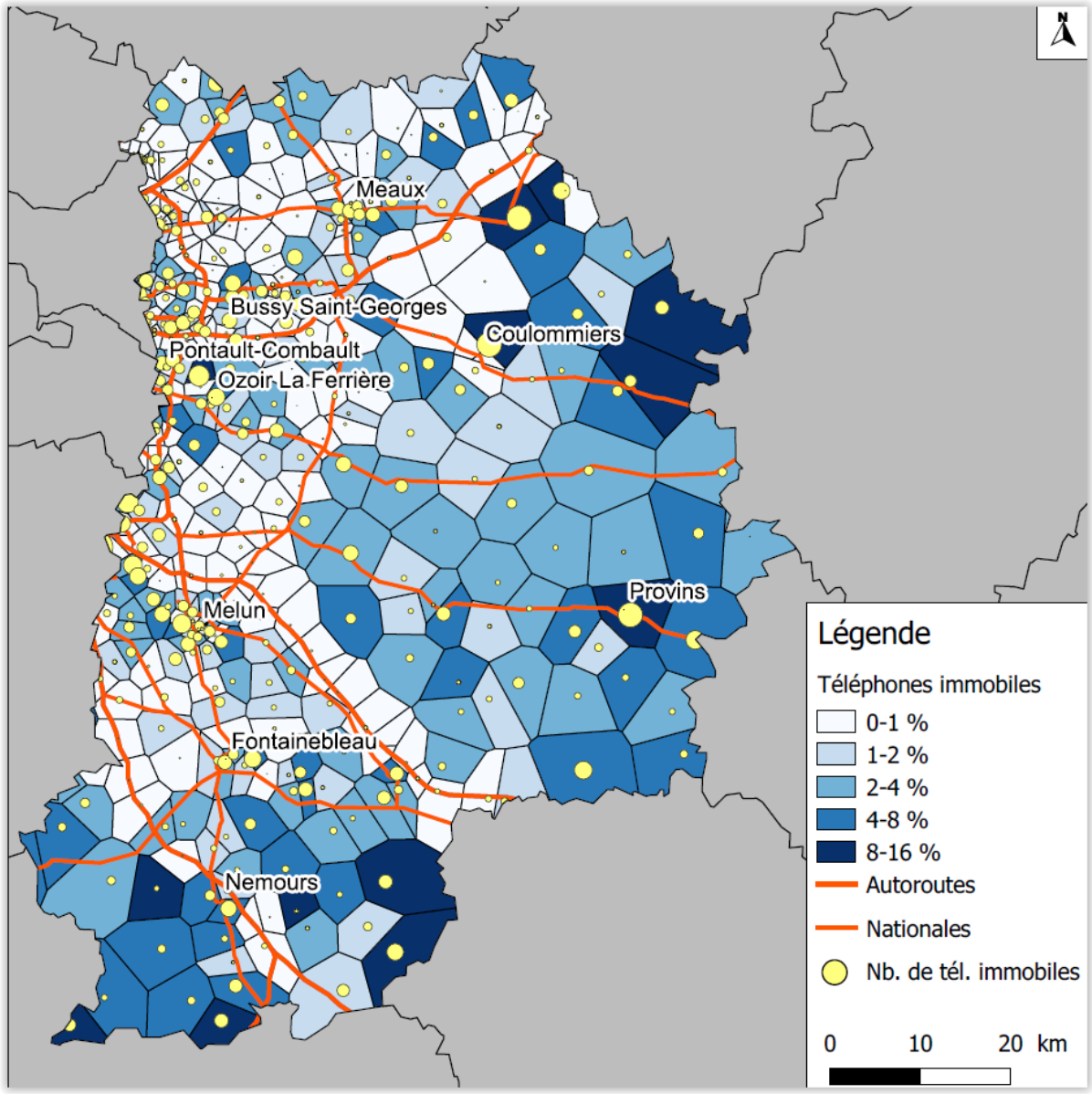


Figure 84 : projection sur un diagramme de Voronoï de l'indice d'immobilité.

En reprenant la Figure 67 (chap. 6), on s'assure de la représentativité de l'indice pour les principales villes de la partie Est de la Seine-et-Marne. En effet, le nombre d'évènements était comparable au reste du territoire. Toutefois, aucune conclusion n'est à tenir pour la partie Sud-Ouest.

On remarque alors que les TII les plus faibles se trouvent le long des axes de transports comme l'A5 et l'A6. Les valeurs les plus élevées sont atteintes pour des villes de province comme Coulommiers, Nemours et Provins qui sont principalement à l'est de la Seine-et-

Marne. Il semble que l'immobilité soit plus importante autour de Melun qu'autour de la frontière sud avec la Seine-Saint-Denis (Torcy). Ces villes sont-elles pratiquées de la même manière? Il apparait nettement que la confrontation de ce type de carte avec des données sociodémographiques et d'usage des sols révèleraient des corrélations intéressantes.

1.4 Conclusion et perspectives de travaux sur l'analyse exploratoire des données de signalisation

Les méthodes proposées dans les chapitres 5 et 6 semblent naturelles, mais ont révélé certaines limites qui nous ont amené à explorer d'autres approches. (HUANG, et al., 2010) a fait face à des difficultés similaires pour développer une méthode de détection des points d'ancrage dans les schémas de mobilité à partir de Call Detail Records. Un premier algorithme proposé est basé sur une hypothèse d'existence d'un point d'ancrage et d'une condition de co-usage des réseaux stipulant que les individus réalisent la majorité de leurs appels au niveau des points d'ancrage. Alors selon les moments de la journée, les BTS de résidence et de travail sont déterminées comme en fonction du nombre d'appels. Une limite spatiale est observée relativement aux oscillations de couverture avec les cellules voisines lorsque le lieu d'ancrage est couvert par plusieurs antennes. Une limitation temporelle découle d'un fait qu'un appel est un évènement aléatoire. En effet, la méthode de détermination des points d'ancrage en fonction uniquement du nombre d'appel présente une limitation illustrée au travers de l'exemple suivant : réaliser de nombreux appels en un endroit de manière exceptionnelle n'est pas la même chose que d'appeler une seule fois de manière récurrente en un même lieu. Alors, une évolution spatiale de l'algorithme est proposée en réalisant un partitionnement spatial sur un diagramme de Voronoï et une évolution temporelle prend en compte la fréquence d'appels et la régularité de présence en un lieu au travers de l'occurrence des appels. La comparaison de la distribution de la distance entre les deux points d'ancrage étudiés, à savoir des points d'ancrage primaires que sont le lieu de résidence et de travail, obtenue par l'algorithme évolué avec cette même distribution construite à partir de données d'enquête s'avère consistance. Toutefois, cette méthode est-elle robuste pour détecter des points d'ancrage secondaires ? En effet, en raison de leur irrégularité, les déplacements pour motifs loisirs ou achats sont plus délicats à étudier. Leur étude passe par une compréhension des schémas d'activités. (LORENZO, et al., 2011, October) propose de projeter les localisations des personnes estimées à partir de traces d'appels de mobiles sur une segmentation en points de visite du territoire géographique. La méthode de reconstruction des schémas d'activité est basée sur une analyse en composante principale des vecteurs composés de la distribution temporelle à l'échelle d'une journée sur la segmentation d'usage du sol pour chaque utilisateur. Un partitionnement en k-moyenne est appliqué pour regrouper ces usages perçus au travers des données mobiles. Sur le même principe, (BAGROW, et al., 2009) propose une méthode pour caractériser les trajectoires des mobiles projetées sur le « territoire géographique » en estimation des statistiques sur des trajectoires telles que le rayon de giration. Cependant, dans ces deux études les partitionnements d'activité sont assimilés aux cellules d'où les appels sont réalisés. Alors,

connaissant les conditions de déclenchement d'évènement de communication, l'appariement entre ces lieux d'activité et de réalisation d'appel n'était-il pas biaisé par la durée de présence sur le lieu d'activité ? Quelles sont les limites de telles approches ? En effet, la variété des attributs sociaux multiplie les comportements de mobilité et la composition des groupes sociaux. Alors chaque individu aura un comportement d'appel propre à ces différences. (ZHOU, et al., 2010, December) propose une méthodologie pour déduire les attributs sociaux à partir de comportement d'appel en estimant le temps passé au travail, en famille ou avec des amis à partir de CDR. Cette méthodologie tient en deux étapes. La première permet de déterminer les connections sociales des usagers et la deuxième permet un partitionnement en 8 modes d'activité d'appel qui sont corrélées au métier exercé. Ces méthodes de partitionnement reposent sur l'exploitation des volumes importants de données engendrés par les comportements d'appels des abonnés. En effet, il s'agit d'une source peu dense lorsqu'un seul usager est observé. (ZHENG, et al., 2013, March) montre que les données d'un seul abonné sont loin d'être suffisantes pour révéler ses caractéristiques de comportement de déplacement. Toutefois, en exploitant les gros volumes de données produites par une masse d'abonnés mobiles, les comportements d'abonnés similaires peuvent se compléter l'un et l'autre, représentant des comportements routiniers et alors chaque abonné peut être caractérisé proprement. Un modèle de prédiction des activités humaines à partir de schémas individuels appris est présenté. Il considère les schémas quotidiens individuels comme un jeu de transposition temporelle régulière entre différents états.

L'approche eulérienne proposée dans cette section a montré que chaque cellule « observe » un usage du sol particulier. Cela laisse à penser que des méthodes de partitionnement permettraient de dégager des groupes de cellules selon l'usage du sol qu'elles couvrent. De plus, l'approche lagrangienne a fait ressortir des relations entre les pratiques des territoires au travers de la confrontation entre la mobilité géographique et l'activité de communication, puis entre l'immobilité relative sur le « territoire géographique » et l'inactivité sur le « territoire mobile ». Ainsi, sous deux approches méthodologiques différentes, nous avons observé des relations entre la pratique des territoires en exploitant à la fois le volume des données dont nous disposions et leurs corrélations selon différentes coupes. Ces caractéristiques de volume de données et de méthodes d'analyse exploratoires qui apparaissent régulièrement dans la littérature nous confortent dans la poursuite des investigations menées dans cette section.

2 Travaux futurs

Cette section propose une présentation de travaux futurs et de pistes ultérieures à creuser. La présentation est dans l'ordre des priorités que suggère l'auteure, et fondée d'une part sur l'expérience acquise, et d'autre part sur une analyse bibliographique.

A l'issue des travaux présentés dans ce manuscrit, nous faisons le constat suivant : les résultats produits ont montré l'énorme potentiel que notre source et nos méthodes offrent pour la mesure des déplacements de personnes. Cependant, une étape cruciale n'a pu être

abordée : celle du redressement. En effet, les indicateurs présentés ici ont au mieux été estimés par l'application d'un coefficient de proportionnalité basé sur une part de marché nationale de l'opérateur Orange pour les études sur le réseau de transport ferré souterrain d'Ile de France lorsque la configuration particulière du système de capture nous assurait de capturer tous les mobiles en transit. Cependant, dans le cas standard de configuration du réseau de télécommunications en Seine-et-Marne, cette condition n'est plus vérifiée. Alors une méthode de redressement basée sur l'application d'un coefficient multiplicatif de part de marché est à exclure. Comme cela a été souligné au fur et à mesure de la présentation des résultats obtenus, la question du redressement est un point essentiel afin que les promesses du système de capture et nos méthodologies de traitements répondent aux attentes des acteurs du transport.

A ce titre, nous proposerons des axes de travail que nous estimons d'intérêt pour traiter ce sujet en premier lieu. Nous insistons sur le fait que le redressement est un enjeu majeur et prioritaire pour poursuivre les travaux présentés ici car il demeure un besoin essentiel de médiation entre les fournisseurs de données numériques et les acteurs de transport pour qui les promesses d'une telle source de données ne seront tenues qu'à condition d'assurer une transition ou un complément comparable avec les données actuellement à disposition telles que les enquêtes. De plus, notre source a pour vocation d'apporter des compléments aux enquêtes traditionnelles, ainsi qu'une disponibilité multipliée de par son caractère ubiquitaire et son coût, en complément des méthodes traditionnelles.

Ensuite, nous nous interrogeons sur la pérennité de la production de mesure de déplacements à partir de solutions numériques telles que les réseaux de téléphonie. Tout d'abord, nous aborderons la notion de stabilité du système de capture, à savoir l'infrastructure des réseaux de télécommunications. La croissance rapide des technologies de télécommunications et des avancées techniques en matière de communications sans fil rendent légitime de questionner les architectures qui existeront dans le futur.

Enfin, nous avons vu que les évolutions techniques sont conjointes à des évolutions d'usages des réseaux. Dès lors, nous discuterons des mutations des intrications d'usages des réseaux de transports et des réseaux de télécommunications.

2.1 Proposition de travaux à mener autour du redressement

Les résultats prometteurs exposés dans ce travail de thèse ne seront exploitables qu'à condition d'accéder à un volume de personnes enrichi de l'intervalle de confiance des indicateurs construits. Ce travail est nécessaire pour l'utilisation par des acteurs du transport dans leurs analyses et leurs modèles afin d'assurer la compatibilité avec les autres sources de données dont ils disposent actuellement. Notre source doit également être calibrée par rapport aux sources existantes.

Au cours des études réalisées, trois axes limitants pour accéder à l'observation de tous les mobiles à tout moment ont été identifiés. Ils amènent alors cette problématique du redressement. Premièrement, il existe une limite spatiale dans les observations que nous faisons. Elle est relative à la fois à la dimension de la cellule, à ses frontières fluctuantes en

fonction de différents paramètres et au décalage entre les découpages des deux territoires. Deuxièmement, l'aspect temporel impacte nos mesures d'une part en raison des comportements non-synchrones entre les deux territoires et d'autre part par le fait que les conditions d'obtention d'un point de mesure sont gouvernées par les mécanismes de déclenchement des évènements de signalisation. Troisièmement, ces limites, à la fois dans l'espace et dans le temps, régies par des phénomènes différents engendrent des complications dans l'interprétation des comportements construits sur des trajectoires spatio-temporelles. Ces trois aspects limitants identifiés portent à la fois sur les mécanismes de capture propres au réseau de téléphonie et sur les intrications d'usage et de superposition des deux territoires. Pour traiter la problématique de redressement dans le cadre de ces relations complexes, nous proposons la décomposition des chantiers de travaux selon les deux étapes illustrées Figure 85.

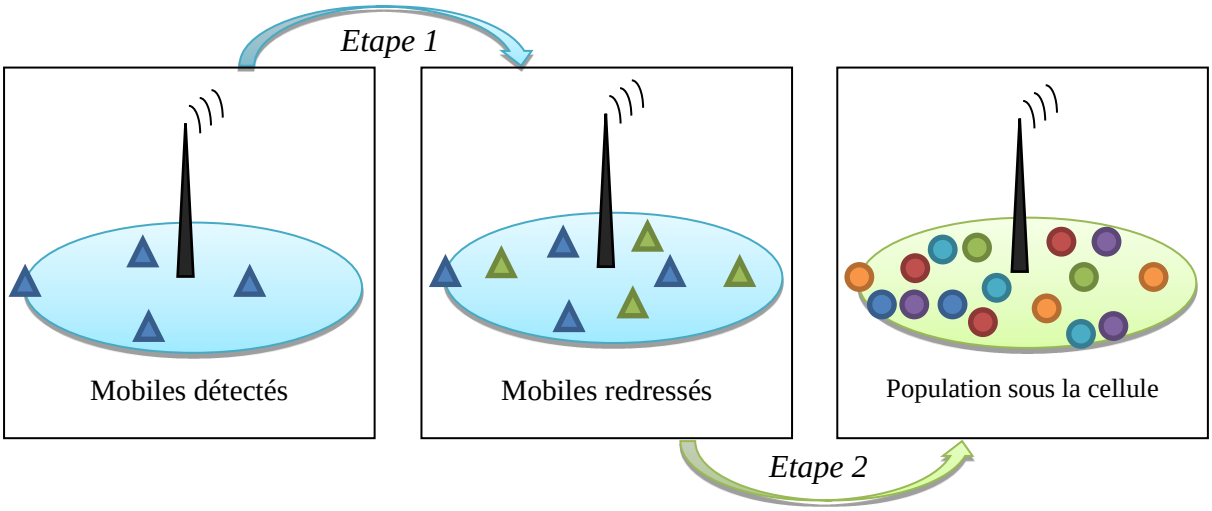


Figure 85 : schématisation des étapes principales du redressement.

Dans une première étape, nous chercherons à redresser les mobiles détectés (triangles bleus) au nombre de mobiles réellement présents sur une cellule (triangles bleu et vert). Cette étape repose sur des mécanismes uniquement « télécom ». Puis, dans une deuxième étape, nous associerons à ce nombre de mobiles redressés, le nombre de personnes (ronds de toutes les couleurs) qu'il représente sur le périmètre du « territoire géographique » délimité par la zone de couverture.

2.1.1 Première étape : redresser le nombre de mobiles observés

Cette première étape doit se baser sur une meilleure compréhension des limitations temporelles de notre système de capture. Elle relève donc d'aspects « télécom ». En effet, le déclenchement d'un évènement de signalisation se produit sous certaines conditions d'usage du réseau, qu'elles soient issues ou à l'insu de l'abonné. A minima, tout mobile allumé va se

signaler au réseau toutes les 3 heures. Cette échelle temporelle n'est pas suffisante pour l'observation fine des déplacements, ou même de la présence en un lieu. Notre besoin de connaitre les schémas d'occupation des cellules pour nos problématiques de redressement des mobiles présents au niveau d'une cellule à un instant donné est documenté dans la littérature télécoms. En effet, pour des besoins d'exploitation des réseaux de téléphonie, les opérateurs cherchent à connaitre la distribution des abonnés sur le « territoire mobile ». La littérature est présentée en deux paragraphes. Le premier est consacré aux distributions statistiques qui permettent d'estimer la probabilité d'avoir un point de mesure, autrement dit qu'un évènement soit généré. Ensuite, nous traiterons des modèles probabilistes proposés dans la littérature télécom qui semblent une voie d'intérêt pour consolider nos ensembles de trajectoires de mobiles.

2.1.1.1 Probabilité d'avoir un point de mesure

Dans le but de tester des scenarii d'exploitation des réseaux de téléphonie mobile, les opérateurs ont recours à des simulations dynamiques basées sur l'estimation de la distribution des abonnés. En effet, les caractéristiques de mobilité et de présence ont d'importants effets sur les performances et la capacité des réseaux cellulaires (NOUSIAINEN, et al., 2002, June). En plus de cette distribution spatiale, l'usage qui est fait du réseau joue un rôle clé pour la planification et la gestion des réseaux. Ainsi, nous empruntons à la littérature télécoms des lois de distributions obtenus de manière empirique qui permettent une meilleure compréhension de l'usage des services offerts par les réseaux de téléphonie mobile.

Tout d'abord, il est usuellement admis dans la communauté des télécommunications que l'arrivée d'un appel ou d'un handover, le moment d'initiation d'une visite d'un serveur web ou encore l'arrivée de paquets vers un nœud du réseau pendant un intervalle de temps peut être modélisé par une loi de Poisson. Cette loi de distribution est souvent utilisée pour construire des modèles de simulation de trafic du réseau, appelé « télétraffic » car les abonnés sont mobiles (ZONOOZI, et al., 1996, November). Or, à partir du jeu de données « Reality Mining » du MIT Media Lab qui contient des données sur les usages de réseaux de téléphonie, (YANG, et al., 2009) ont montré que la distribution des temps entre deux appels arrivant vers une centrale d'appel suit une loi exponentielle et dans certains cas une loi puissance. Le but de cette étude empirique portait sur la compréhension des schémas d'activités humaines. La section précédente a mis en relief le fait que les cellules des réseaux observent des distributions de types d'évènements variables selon l'usage qu'il est fait de ces dernières par les abonnés. La distribution de la distance temporelle entre deux appels entrants sera-t-elle la même pour toutes ces cellules ? Qu'en est-il des autres types d'évènements ? Les évènements de mobilité, comme les LAUN, ne se produiront qu'au niveau de certaines cellules en frontière des zones de localisation. Par conséquent, si un évènement LAUN n'est pas retardé en raison de la surcharge de la cellule ou d'une priorisation de réalisation des évènements, la distribution de ces évènements sera la signature combinée des moyens d'entrée sur le « territoire géographique » couvert par la cellule. Toutefois, une fois qu'un mobile est entré dans une zone de localisation, à moins d'attendre 3 heures ou qu'il ressorte de cette zone, il ne

pourra être capturé que par une communication. Nous avons vu que la probabilité qu'il reçoive un appel pendant un intervalle de temps suit une loi de Poisson, mais quelle loi décrit sa propension à en émettre un ?

Sans information capturée de changement de cellules à l'intérieur d'une zone de localisation, intéressons-nous à la période écoulée sous une même cellule. (ZONOOZI, et al., 1997) proposent une loi Gamma pour modéliser le temps de résidence sous une cellule lorsque les mouvements des abonnés sont régis par des variables aléatoires. Nous avons vu dans le chapitre 3 les limites d'une telle représentation de la mobilité.

La charge d'une cellule est également un élément dont on doit tenir compte car elle va influencer le déroulement de génération des évènements en raison des priorités qui existent dans le fonctionnement du réseau. Ainsi, en plus de la probabilité qu'un appel débute dans une cellule, il s'agit de savoir combien de temps il va occuper les canaux de communication de cette cellule. Il a été montré que le temps d'occupation des canaux GSM suit une loi exponentielle car ce phénomène est dépendant de deux autres processus exponentiels que sont la durée d'appel et le nombre de traversées des cellules (GUERIN, 1987).

En 3G, la capacité est un enjeu encore plus marqué. Il est alors nécessaire d'étudier les corrélations entre la mobilité et les niveaux d'activité sur le réseau de télécommunications. Une étude sur les réseaux 3G a été menée en ne considérant que les communications de type « data » et montre que la distribution du nombre de cellules visitées est une distribution à queue lourde de type hyperbolique (HALEPOVIC, et al., 2005, October). Ainsi, il existe une faible corrélation entre les activités d'appels et la mobilité sur le « territoire mobile ». En effet, la notion de mobilité se réduisait aux changements de cellules. Cette étude a permis d'introduire la notion d'une cellule d'ancrage depuis laquelle tout abonné initie la majorité de ses appels quel que soit son niveau de consommation. Afin de corréler les comportements de communication et de mobilité sur le « territoire géographique », (YUAN, et al., 2012) proposent de faire ressortir les corrélations entre la fréquence des appels et des indicateurs de comportement de déplacement que sont le rayon de l'ensemble des déplacements, l'excentricité et l'entropie. Ces derniers sont calculés à partir des trajectoires des mobiles construites comme une série de points localisés aux coordonnées du site et horodatés du moment de l'appel. L'excentricité traduit la linéarité de la trajectoire et l'entropie l'hétérogénéité des lieux visités. Les résultats produits montrent que l'excentricité est inversement proportionnelle au nombre d'appels, alors que l'entropie est proportionnelle au nombre d'appels. Toutefois, si un appel permet un point de capture en un lieu, moins il y a d'appels passés par un abonné, moins il sera possible de capturer des localisations par la signalisation. Sa trajectoire sera composée des points où il aura passé le plus de temps (augmentant la probabilité de recevoir ou d'émettre un appel), augmentant ainsi son excentricité - s'approchant d'une ligne droite entre un nombre réduit de lieux - et réduisant l'entropie. Ces conclusions sont-elles relatives à un comportement avéré ou est-ce un biais du système de capture ?

Une combinaison de plusieurs caractéristiques de fonctionnement d'un réseau de téléphonie mobile introduit une composante aléatoire dans la détermination de la réalisation du prochain évènement. Tout d'abord, le déclenchement des évènements dépend de son type, des conditions de couverture radio et de charge du réseau. En effet, la gestion des canaux de communication est optimisée pour assurer la qualité des services et limiter les phénomènes de congestion. Enfin, les usages des services mobiles varient selon les abonnés et leurs terminaux. Cela lève les interrogations suivantes pour estimer la probabilité de détecter un mobile dont l'utilisateur se trouve en un périmètre du « territoire géographique » couvert par un certain nombre de cellules de technologies et de fréquences différentes. Quelle est la probabilité qu'une communication soit reçue ou émise ? Quelle est la probabilité de changer de « couche technologique » ? Quelles sont les conditions de demande au niveau des cellules en frontière des zones de localisation pour que les évènements de signalisation de mobilité sur le « territoire mobile » se déroulent en suivant le processus théorique ? Une brève revue bibliographique sur la modélisation par des distributions statistiques des comportements de communication des usagers a montré qu'il ne s'agit pas d'un sujet nouveau. Toutefois, pour notre méthode nous considérons tous les types d'évènements. Il conviendrait alors de construire une loi de déclenchement d'un évènement qui serait une combinaison des lois de réalisation de chaque type d'évènements et de l'enrichir par des contraintes sur l'état du réseau (charge locale, règle de priorité des évènements, etc.). Malgré cette connaissance de la fréquence d'acquisition de « point de mesure », le nombre d'occurrence des évènements peut s'avérer trop faible pour une mesure fine de certains comportements sur le « territoire géographique ». Le paragraphe suivant est consacré à une revue bibliographique succincte de méthodes proposées pour répondre à cette problématique.

2.1.1.2 Compenser la périodicité aléatoire des évènements

Les avantages d'une source de données basée sur des évènements de signalisation sont la taille des échantillons et sa disponibilité en tout point du territoire. Toutefois, la fréquence d'acquisition aléatoire limite l'observation des comportements entre les déclenchements de signalisation. Pour compléter le manque d'information entre ces points de mesure dans ces ensembles collectés de dimension volumineuse, des modèles prédictifs ont été proposés dans une littérature orientée télécommunications. Nous citons ici quelques-unes des méthodes qui pourraient être exploitées dans la poursuite des travaux conjointement aux méthodes proposées dans la conclusion de l'analyse exploratoire des données du paragraphe 1.4.

Un modèle probabiliste basé sur un modèle de mélange Gaussien (Gaussian Mixture Model), appelé Inter-Call Mobility model, permet une extrapolation de la distribution spatio-temporelle des mobiles entre deux appels (FICEK, et al., 2012, March). Sur la base de l'étude des corrélations et des associations des positions d'un groupe de mobile, (XIONG, et al., 2012, September) ont proposé une méthode de prédiction de localisation à l'échelle du site d'un mobile dans les 6 heures qui suivent sa dernière position connue en connaissant la distribution spatiale du reste des mobiles. Elle combine un indicateur de schéma de comportement collectif des mobiles (Collective Behavioral Patterns predictor) avec un

indicateur Markovien pour intégrer la prédiction individuelle. En se basant sur la fonction d'utilité utilisée en transport, (OUGHDI, et al., 2005) propose un modèle de prédiction de la future période d'appel sous condition d'une réglementation tarifaire des consommations de services de communications. Le but d'une telle approche est de proposer l'évaluation des méthodes de réglementation de tarification des services pour faire de la régulation de trafic dans des réseaux de téléphonie mobile congestionnés. Cela ne va pas sans rappeler les actions rencontrées dans le domaine des transports.

Une analyse des méthodes de prédiction pour l'extrapolation des points de mesures « manquants » que l'on peut trouver aussi bien dans la littérature des dynamiques humaines et des télécommunications semble une voie d'intérêt pour pallier au caractère aléatoire du déclenchement des évènements et donc une perspective de futurs travaux.

2.1.2 Deuxième étape : redresser le nombre de personnes associées aux mobiles redressés

Cette deuxième étape du redressement consiste à redresser le nombre de mobiles présents au niveau d'une cellule du « territoire mobile » que nous avons estimés dans l'étape précédente pour y associer un nombre de personnes. Nous faisons ici la distinction entre le redressement des mobiles connectés à une cellule en un volume de personnes présentes sur la projection de cette cellule sur le « territoire géographique » et le redressement d'une combinaison de conditions de présence au niveau d'une ou plusieurs cellules qui viseraient à traduire un comportement sur le « territoire géographique ».

2.1.2.1 Estimer le nombre de personnes présentes

Nous supposons que l'étape précédente du redressement nous a fourni une estimation du nombre de mobiles effectivement connectés à une antenne sur une période donnée avec un certain intervalle de confiance. Ils sont représentés par des triangles bleus et verts dans la Figure 30. Les triangles bleus représentent les mobiles ayant signalé leur présence dans la cellule et les triangles verts ceux dont on estime la présence au niveau de cette cellule grâce à une méthode développée dans l'étape 1. Afin de passer à la population estimée comme présente sous la couverture de l'antenne à laquelle sont connectés les mobiles (triangles bleus), nous proposons deux étapes. Tout d'abord, nous devons estimer le nombre d'abonnés Orange et d'abonnés en itinérance sur le réseau opéré par Orange et présents dans la cellule. Nous les avons représentés en orange sur la Figure 86. Le taux de pénétration de l'équipement des mobiles dans une population varie selon divers paramètres. Par exemple, une personne possédant deux terminaux mobiles dont l'un communique sur le réseau par un abonnement Orange personnel et l'autre par un abonnement Orange professionnel, peut ainsi être localisée sur une cellule via deux mobiles. Or les évènements déclenchés par chacun des mobiles représentent la même personne. Inversement, un ménage avec des enfants n'ayant pas d'abonnement mobile sera représenté par moins de terminaux que d'individus. Une fois l'estimation du nombre d'abonnés Orange et d'usagers en itinérance présents dans le périmètre couvert, il s'agit d'estimer la population en connaissance de la part de marché locale de l'opérateur.

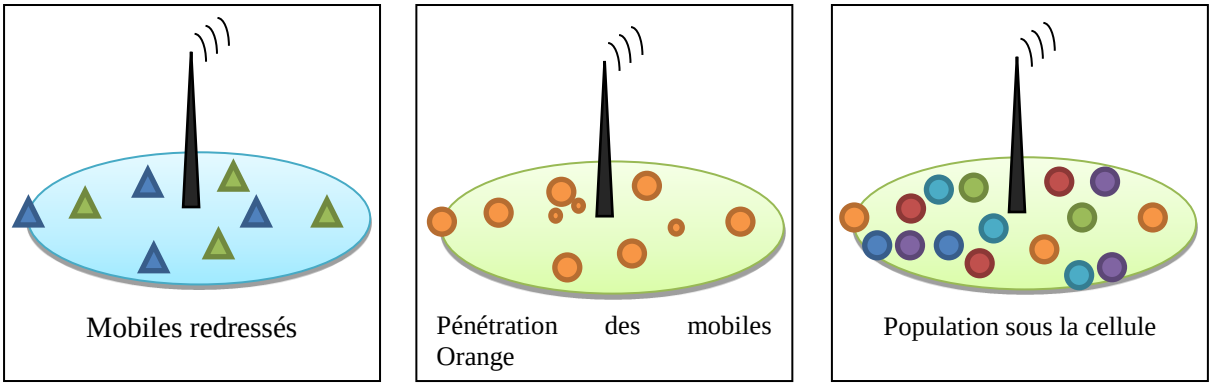


Figure 86 : schématisation des étapes intermédiaires de la deuxième étape du redressement.

Nous avons fait une distinction de couleur de la cellule pour montrer que dans la première étape nous nous référons à la cellule comme unité de découpage du « territoire mobile » sur lequel sont présents des terminaux mobiles (triangles sur fond bleu) et que dans la deuxième étape nous faisons référence à la cellule comme la portion du « territoire géographique » délimité par le rayon de couverture d'une antenne sur laquelle évoluent des individus (ronds sur fond vert). Cet exercice de redressement met alors en relief la notion de projection du « territoire mobile » sur le « territoire géographique ». Il existe des modèles de simulation de la propagation des ondes radio qui permettent d'estimer la section du « territoire géographique » dont une antenne sera la serveuse principale, c'est-à-dire celle qui offrira le champ le plus élevé. Toutefois, selon les conditions de trafic sur le réseau et les conditions de propagation des ondes radio, cette notion de serveuse principale peut ne pas suffire pour prédire la localisation d'un individu lors de la réalisation de son évènement. Ceci est plus particulièrement vérifié aux frontières de ce périmètre à cause du recouvrement entre les cellules. L'impact de ce phénomène sur la projection est inversement proportionnel à la taille des cellules.

Pour l'auteure, l'incertitude spatiale a un impact beaucoup plus néfaste sur la qualité du redressement que sur la construction des indicateurs. En effet, nous avons vu dans la première étape l'importance de l'usage des services fournis par les réseaux de télécommunications. Cela impacte également la deuxième étape car le taux d'équipement et la part de marché dépendent de caractéristiques sociodémographiques. Il est alors important de sous-segmenter les mobiles en fonction des caractéristiques de leur utilisateur, pour ensuite effectuer un redressement selon le taux d'équipement et la part de marché de l'opérateur par strates. Techniquement, des informations issues des bases de facturation des abonnés telles que l'âge, la civilité et l'adresse de facturation peuvent enrichir les évènements de signalisation. Néanmoins, l'utilisation de ces données personnelles pose des questionnements juridiques sans traitement garantissant le respect de la réglementation en vigueur en France. Ainsi, il parait nécessaire d'estimer une distribution des personnes présentes sur un périmètre couvert par une cellule pour un redressement approprié. Alors la connaissance de l'usage du

sol est un atout considérable et les incertitudes de projection introduiraient un biais significatif.

2.1.2.2 Estimer le nombre de personnes réalisant une activité

Jusque-là, nous avons pu mesurer la complexité de l'exercice de redressement pour estimer la densité de personnes présentes dans une unité du « territoire mobile » projetée sur le « territoire géographique » pendant une période donnée. On ne peut que supposer un renforcement des difficultés pour le redressement d'un indicateur de mobilité construit à partir de conditions spatiaux-temporelles. Une dimension supplémentaire apparait, celle de l'usage conjoint des deux réseaux.

En effet, dans le chapitre 2, nous avons vu que les caractéristiques sociodémographiques influencent les individus dans leur manière de pratiquer un territoire. Il en va de même pour l'usage des services de téléphonie. De plus, notre source composée d'évènements de signalisation est issue à la fois des usages de la téléphonie au travers des appels et des usages du sol au travers des évènements de localisation. Nous représentons ces relations sur la Figure 87. La flèche orange symbolise ce qu'on essaie de faire : utiliser la signalisation transitant sur les réseaux de signalisation pour mesurer l'usage des réseaux de transport.

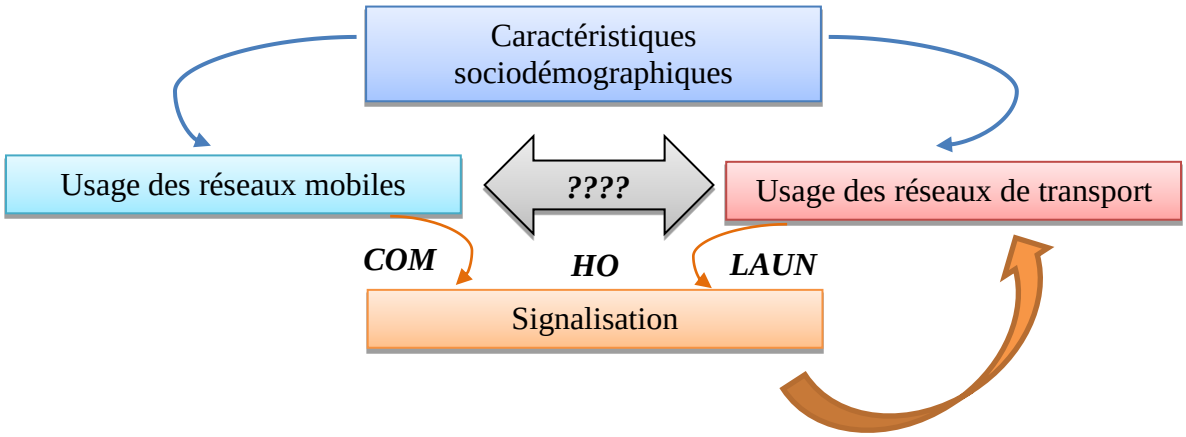


Figure 87 : schéma des intrications entre les réseaux de transport et les réseaux mobiles.

Nous voyons sur ce schéma qu'un élément manquant à notre compréhension est le lien entre l'usage de réseaux de téléphonie et l'usage des réseaux de transport. Nous avons observé quelques-unes des relations dans nos travaux. D'une part, à partir d'une connaissance a priori des comportements d'usage des sols, nous avons construit des indicateurs de mobilité à partir de l'usage des réseaux mobiles dont les résultats sont présentés dans les chapitres 5 et 6. D'autre part, dans la première section de ce chapitre, nous avons observé l'usage des réseaux de téléphonie au travers d'une analyse exploratoire des données et constaté une corrélation avec l'usage du sol au niveau des cellules. Cependant, ces relations d'usage complexes et intriquées méritent un intérêt plus particulier pour la maitrise du redressement des indicateurs produits.

Nous n'avons pas abordé le redressement des « roamers étrangers » car il doit être traité séparément en raison de ses particularités. Ce segment d'abonnés présente des difficultés de redressement supplémentaires. En effet, pour le cas des abonnés étrangers, les usages peuvent varier tout autant que les services mobiles qui sont proposés par les acteurs des pays. De plus, malgré des normalisations, les terminaux peuvent fonctionner de manière différente sur les réseaux de téléphonie mobile français et donc produire une signalisation particulière. Enfin, l'accès à la part de marché et à la représentativité des mobiles allumés à l'étranger est une question délicate.

2.2 Mutations des intrications d'usage des réseaux

Que ce soit dans le domaine des dynamiques humaines ou des télécommunications, la littérature s'enrichit d'études telles que (YUAN, et al., 2012), qui visent à corréler les comportements de communications et les comportements de déplacements en tenant compte des caractéristiques sociodémographiques des individus. Les objectifs de ces études sont souvent fondés sur les besoins d'une meilleure connaissance des comportements humains ou encore de modélisations pour la gestion des réseaux. Pour nos recommandations de futurs travaux, elles apparaissent essentielles pour améliorer les méthodologie de redressement des indicateurs que nous proposons de construire à partir d'une source composée des traces de signalisations présentes dans les réseaux mobiles. Ainsi, les relations entre les usages des réseaux doivent être surveillées car en évoluant, elles redéfinissent la nature de notre système de capture. Il s'agit toutefois d'évolutions comportementales et l'on peut alors supposer des mutations à moyen terme plutôt qu'à court terme. Dans ce paragraphe, nous citerons quelques modifications d'usage sur l'un des réseaux qui entraineraient des répercutions sur l'autre en débutant par l'impact des modifications d'usage de transports sur les réseaux télécoms et en terminant par la relation inverse. Il est important de noter que les étroites relations qu'entretiennent les usages de deux réseaux ne garantissent pas une incidence directe et unique. Nous ne considérons ici que la direction de la tendance que nous estimons comme étant la plus forte.

Tout d'abord, la mutation de la relation entre l'espace et le temps qu'a engendrée la diversification et les performances des réseaux de transports, a redéfini le rapport à l'espace et au temps. De la possibilité d'aller plus vite et plus loin, a grandi le sentiment d'optimisation du temps consacré à la réalisation d'activités. Alors se sont développées les possibilités de travailler en mobilité et de télétravail qui se doivent d'être accompagnées par des réseaux de communication adaptés. De plus, l'exigence face aux « économies de temps » a accru la demande de connexion en mobilité afin de réduire la perte de temps de transport. Des travaux de déploiement de réseaux dédiés aux axes de transport principaux, notamment autour des transports en communs sont un nouvel axe de priorité pour les opérateurs de télécommunications. On notera le renforcement des intrications des réseaux au travers de l'exemple du déploiement des réseaux de télécommunications dédiées au LGV qui font à présent partie de la mise en service de certaines portions des lignes. Enfin, dans un souci d'optimisation de leur temps, les usagers des réseaux de transport dont l'offre s'est diversifiée

et complexifiée ont besoin de supports disponibles en tout lieu pour adapter leurs déplacements en temps réel.

La direction de la relation d'incidence de l'information aux usagers via les possibilités de service télécoms est plutôt bilatérale. En effet, cette possibilité offerte aux usagers influence l'usage des réseaux de transports en proposant des itinéraires alternatifs. En plus, des services d'aide à la navigation ou des informations de trafic, les applications disponibles sur les Smartphones offrent de nouvelles possibilités de validation ou de paiement des services de transports comme pour les parkings ou des titres de transport numériques pour les transports en communs. Ces possibilités qui facilitent les usages des transports influencent les choix des usagers. Parmi les applications disponibles, certaines ont permis l'expansion rapide de nouveaux modes de déplacement comme le co-voiturage. Des applications comme celles proposées par blablacar [22] démocratisent cette manière de se déplacer. Enfin, les télécommunications et la volonté d'optimisation du temps consacré aux activités ont facilité le développement des achats en ligne et des livraisons à domicile. On observe alors une modification du schéma de transport de ces activités.

On remarquera que le sens d'influence ne ressort pas nettement. Toutefois, une notion domine : celle de l'individu. Un individu qui utilise conjointement les deux réseaux au travers de services personnalisés par ses soins. Lorsque des fournisseurs d'informations trafic, comme Google, proposent des itinéraires bis différents de ceux proposés sur des PMV par les opérateurs, comment se distribueront les usagers sur ces voies ? Lorsque deux modes de transport offrent un service équivalent en temps de transport, le processus de choix de mode dépendra-t-il du service en télécommunications offert ? Les intrications d'usage des réseaux sont indéniables, et cette thèse montre également le rapprochement entre ces deux domaines. Se dirige-t-on alors vers une co-exploitation des réseaux à l'heure du renforcement des intrications des usages? Un des objectifs de cette thèse était de produire des mesures de déplacements exploitables par les acteurs du transport pour réduire les situations de saturation. Or, par une connaissance accessible via les informations disponibles sur leurs terminaux mobiles, les usagers des transports se placent en quelque sorte également comme des acteurs de l'offre par effet d'influence individuelle démultipliée au travers du réseau de télécommunication. Un usager peut proposer de partager son véhicule le long d'un trajet, il peut recommander un autre itinéraire sur une plateforme de communication et ce faisant, il utilise les réseaux de télécommunications. Les efforts de désaturation des réseaux de transports vont-ils entrainer une saturation des réseaux de télécommunications ? Ces réseaux vont-ils alors connaitre des mutations infrastructurelles pour faire face à cette demande ?

2.3 Mutations technologiques des réseaux de télécommunications

La naissance récente des réseaux de la téléphonie mobile date des années 1990, témoins de l'engouement qu'ont connu les réseaux 2G. A cela, on associe une évolution rapide des

[22] www.blablacar.fr

techniques accompagnée d'une mutation des usages. Le succès rencontré par les services offerts amène des difficultés d'exploitation des réseaux qui doivent absorber une demande croissante dans un contexte concurrentiel. Il est alors légitime de s'interroger sur les adaptations techniques que vont proposer les acteurs de l'offre radiotéléphonique pour proposer des services innovants et attractifs et garantir une qualité de service optimale. Quelles seront alors les conséquences sur nos travaux basés sur l'architecture actuelle des réseaux de télécommunications ? Nous distinguerons deux types d'évolutions qui engendreraient une revisite de l'approche développée dans cette thèse, certaines portant sur certains éléments de l'infrastructure actuelle et d'autres sur des modifications structurelles plus importantes.

2.3.1 Evolutions des éléments d'infrastructure des réseaux de téléphonie mobile

Débutons par une évolution des usages encouragés par les services offerts : l'accroissement des communications de type « data ». Cette famille de communications présente un intérêt pour notre système de mesure de déplacement en augmentant la fréquence de déclenchement d'évènements de signalisation. En effet, les mises à jour depuis des serveurs (compte e-mail, applications, etc.) qui sont réalisées sans action de l'abonné sont autant de points de mesures supplémentaires. De plus, l'intrication des usages des réseaux dont nous avons parlée dans le paragraphe précèdent, offre aussi un espoir de consommation accrue de « data » en situation de mobilité d'un abonné. Ceci renforcerait notre accès à des informations exploitables pour la mesure des déplacements. Les technologies des réseaux évoluent donc autour du transfert des données. Citons deux conséquences techniques de ces évolutions technologiques : la réduction de la taille des cellules et l'évolution des mécanismes de gestions inter-couches. L'effet combiné sur notre travail est mitigé. D'une part, la réduction de la taille des cellules permet un gain de précision spatiale, mais d'autre part les mécanismes de signalisation dans un réseau hétérogène multicouche sont plus complexes à modéliser et à appréhender. L'importance de la compréhension des intrications d'usage du sol et d'usage des télécoms ressort également sur la détection d'espace radio à désengorger rapidement par l'équipement de cellules dédiées à absorber une charge de trafic locale. Cette configuration tend à favoriser la superposition du « territoire mobile » sur le « territoire géographique » à condition d'appréhender rigoureusement les mécanismes de signalisation.

Il est naturel d'observer des adaptations des méthodes de recueil des données. Le paragraphe 2.1.2 du chapitre 3 a présenté les évolutions des enquêtes traditionnelles pour répondre aux besoins de modélisation d'une part, mais également s'adapter aux évolutions des dispositions des enquêtés. Dans le cas d'étude abordé dans ce travail, la configuration des réseaux mobiles est à prendre en compte pour adapter les méthodologies proposées dans le contexte actuel d'opération. En effet, le déploiement d'une couche technologique 3G a débuté en 2013 pour couvrir les portions souterraines du réseau de transport public ferré francilien. Toutefois, la configuration de type « cordon de zone de localisation » a été conservée.

2.3.2 Evolutions des infrastructures des réseaux de téléphonie mobile

Face à la croissance du trafic sur les réseaux de télécommunications, on peut s'interroger sur les évolutions des mécanismes de signalisation qui pourraient être réduits pour augmenter la « capacité utile » dédiée aux services offerts par les opérateurs. En effet, on pourra noter que les messages de HO présents en 2G n'existent plus sur la couche 3G. De plus, la fréquence de déploiement de nouvelles technologies de réseaux augmente depuis le lancement de la 2G. Qu'en sera-t-il alors de la pérennité de la méthode basée sur les évènements de signalisation que nous proposons ici ?

Une évolution naturelle dans un contexte d'optimisation est la nouvelle génération de réseaux auto-organisés, les SON (pour Self-Organized Network) qui repose sur une adaptation du réseau à la distribution spatiale et temporelle des abonnés sur le réseau. Quelles seront les méthodes choisies pour prédire cette distribution ? Sera-t-elle bénéfique pour la mesure des déplacements en proposant d'autres traces du réseau de télécommunication qui refléteront l'adaptation de l'offre de télécommunications pour des abonnés en mobilité ?

Enfin, nous constatons l'apparition des réseaux ad-hoc et des méthodes dites « opportunistes » comme les réseaux de communication Vehicule-to-Vehicule (V2V) ou Device-to-Device dont le but primaire était d'assurer un niveau de service dans des « zones blanches », c'est-à-dire n'offrant pas de couverture suffisante via les infrastructures classiques. Ces architectures de réseaux semblent plébiscitées dans les White paper 5G[23]. Ces architectures de réseaux de communications ont des mécanismes de fonctionnement propres et différents du cas de configuration traité dans cette thèse. Toutefois, leur opération et leur déploiement sont fortement soumis aux conditions de mobilités des objets qui constituent le réseau. Alors, des besoins de modèles de mobilité, proches de ceux que l'on trouve dans la littérature transport, sont requis pour caractériser les conditions d'opérations de ces réseaux ad hoc. Par exemple, (AIT ALI, et al., 2015) propose un modèle de mobilité qui prend en compte les attractions des lieux et reproduit une étape de génération sur une échelle microscopique et une échelle macroscopique afin de d'évaluer les paramètres des réseaux VANET (pour Vehicular Ad-Hoc NETwork).

[23] https://access.atis.org/apps/group_public/download.php/25314/ATIS-I-0000050.pdf

Conclusion de partie

Dans un cadre particulier de configuration des réseaux de téléphonie et de transport, les méthodologies de traitement des messages de signalisation donnent accès à une estimation des facteurs explicatifs du comportement de déplacement des individus. L'estimation de la valeur du confort ressenti par un usager lorsqu'il emprunte les transports en commun, était un sujet très peu traité, principalement pour des raisons de difficultés de recueil d'informations, malgré son importance pour la modélisation des comportements des usagers des transports en commun. Nous avons vu que la quantification de la perception par les passagers était peu abordée dans la littérature jusqu'il y a peu de temps. Toutefois, en 2013 et 2014, l'opérateur des lignes étudiées (ligne A et ligne M1), la RATP, a communiqué sur la nécessité de prendre en compte la perception des usagers pour l'enrichissement de modèles de transport telles que l'amélioration de l'évaluation des projets (LANGLOIS, et al., 2014), la prise en compte des comportements détaillés des passagers dans un réseau de transport public complexe (LEBLOND, et al., 2013) et l'amélioration des modèles d'affectation (PRAT , et al., 2014). Alors, les traces mobiles semblent un complément, ou une alternative intéressante aux enquêtes terrains – préférences déclarées ou révélées – et, comme nous l'avons observé dans la partie II, aux données de type AFC.

Dans un cadre de configuration générique des réseaux, nous avons mené deux analyses sur le territoire de Seine-et-Marne. Les indicateurs issus de ces analyses s'appliquent au diagnostic de fonctionnement des territoires. Le caractère de disponibilité universelle de la signalisation permet notamment l'observation de déplacements pour motifs loisirs ou achats. Toutefois, certaines limites sont apparues pour accéder, avec une précision spatiale et temporelle similaire à celle des estimations en souterrain, à l'ensemble des attributs des déplacements. En effet, en essayant d'appliquer des méthodes similaires au cas des transports souterrains, nous avons observé des limites relatives au nombre de traces permettant la reconstitution de trajectoires et l'incertitude relative qui découle de la juxtaposition des deux territoires et de leur pratique. Le système de capture à l'échelle de la cellule entraine une incertitude spatiale proportionnelle à la dimension de la cellule mais également à ses « relations » avec les cellules voisines (changement de technologie, charge de la cellule). Ceci entraine un décalage entre la compréhension théorique « a priori » du mécanisme de génération d'évènements de signalisation dans une situation donnée et la compréhension des traces générées, notamment concernant l'interprétation des évènements. Ainsi, tout comme les attributs d'un déplacement sur le « territoire géographique » dépendent des activités qu'il propose et qui y sont réalisées, les déplacements sur un « territoire mobile » dépendent des pratiques des abonnés, de la charge de la cellule mais aussi de la fonctionnalité de la cellule. En effet, le paramétrage d'un ensemble de cellules dédiées au service d'une zone rurale est différent de celui adapté à la couverture d'une LGV ou d'une zone urbaine dense. Alors, nous avons mené une analyse exploratoire sur l'ensemble des données collectées à l'échelle du

département afin d'investiguer les intrications de pratiques entre le « territoire mobile » et le « territoire géographique ».

Les observations proposées dans la première section du chapitre 7 encouragent des poursuites de travaux selon l'angle de l'analyse exploratoire des données. En effet, des corrélations entre la pratique des territoires apparaissent et leur maitrise semble requise pour mener des travaux de redressement non abordés dans les productions de ce travail de thèse. En effet, la source de données radio-mobiles assure disponibilité et robustesse sur le plan technique. D'une part, les réseaux déployés offrent une large couverture géographique et sont en constant déploiement. D'autre part, la robustesse est garantie par les régularités statistiques assurées par le taux de pénétration des mobiles au sein de la population et au volume des traces de signalisation. Toutefois, cela n'exclut pas l'existence de biais. Alors pour que les acteurs du transport disposent d'un instrument de mesure des déplacements robuste, disponible en tout lieu, et pouvant répondre à un large éventail de questions posées par le fonctionnement et l'exploitation des réseaux de transport, l'exploration des travaux présentés dans cette thèse doit se poursuivre. Un axe de poursuite à court terme concerne les problématiques de redressement, que cela soit pour fournir aux acteurs des transports des mesures comparables et complémentaires aux méthodes traditionnelles d'enquêtes et aux traitements d'autres sources numériques, mais également pour affiner les méthodes et résultats de traitements de la source étudiée. Cela entraine des sujets à traiter à moyen et long terme concernant les évolutions de l'intrication des usages des réseaux et les évolutions des réseaux de télécommunications pour assurer la pérennité de l'approche de mesure de déplacements à partir des messages de signalisation.

Conclusion générale

Les acteurs des transports ont besoin de mieux connaitre les comportements individuels et leur dynamique. En effet, la modélisation des transports nécessite une connaissance fine de la demande, dans l'espace et dans le temps. Ce type de connaissance fait défaut aujourd'hui et montre les limites des enquêtes traditionnelles. Un intérêt émerge alors pour les instruments de mesure numérique avec des capteurs embarqués au niveau de l'individu pour une meilleure estimation de sa perception de la pratique des réseaux. Parmi ces solutions numériques de capture de déplacement, la technologie GPS est désavantagée par rapport aux réseaux de téléphonie mobile notamment en raison de son indisponibilité en zone souterraine. Dans cette thèse, nous avons présenté des méthodes de traitement des messages de signalisation en transit sur les réseaux radio-mobiles afin de construire des statistiques de mobilité. Cette source de données numériques a révélé un potentiel intéressant pour répondre aux problématiques transports de l'exploitation des réseaux, leur fonctionnement et l'aide au diagnostic des territoires. En effet, les données de signalisation sont disponibles en tout point d'un territoire couvert, collectées de manière dynamique et constituent des volumes importants pour l'ensemble d'une population largement équipée de terminaux mobile qui assurent une représentativité statistique.

Le potentiel d'une telle source pour traiter des problématiques de transport a été démontré par les méthodologies de traitement développées dans cette thèse sur deux périmètres d'étude distincts. Premièrement, des éléments de diagnostic du territoire sont proposés pour le département de Seine-et-Marne, pour traiter des problématiques de planification et d'aménagement. Deuxièmement, des indicateurs de qualité de service selon la perception de l'usager sont estimés sur le réseau de transport public ferré d'Ile-de-France (AGUILERA, et al., 2015). De tels indicateurs ont une utilité pour l'exploitation mais également pour la modélisation des comportements, notamment au niveau de l'étape d'affectation. Le choix de ces périmètres d'étude n'a pas été motivé que par les exemples de problématiques à adresser. En effet, la configuration du réseau télécom dédié à la couverture des portions souterraines du système de transport francilien a facilité l'appropriation des mécanismes de signalisation. Dans ce cadre particulier offert par le réseau mobile d'Orange, nous avons pu :

- Observer la trajectoire des trains et proposer une méthode pour estimer la charge des rames amont pour chacune des stations du tronçon central. De telles informations sont constructibles en temps réel en connaissant la capacité des trains.
- Construire des indicateurs de qualité de service tels que la fiabilité (AGUILERA, et al., 2012)
- Estimer des volumes par paires de stations considérées comme Origine et Destination et confronter les résultats obtenus à ceux produits à l'aide de données billettiques fournies par le STIF (AGUILERA, et al., 2014).

  Estimer le confort ressenti par des passagers supposé être un des facteurs explicatifs de choix d'itinéraires (MILION, et al., May 2014).

Soulignons que l'année de présentation de ces derniers travaux, d'autre acteurs ont également publié sur l'estimation de confort à partir d'autres sources de données numériques et enquêtes. Le fait que la littérature ne traitait que peu de ce sujet jusqu'alors montre qu'il s'agit d'un thème actuel d'intérêt.

Dans un cadre standard, nous avons pu construire des indicateurs de comportements de déplacements pour motifs loisirs et achats tels que le temps de présence dans un centre commercial, les choix d'horaires d'arrivées et de départs et les itinéraires d'accès au centre. Nous avons également identifié des segments d'abonnés selon un comportement sur le « territoire géographique » et sur le « territoire mobile » qui nous a permis d'identifier des modes de transports. Au travers de ces exemples, nous avons mis en relief l'ubiquité d'une telle source dont le coût théorique est seulement porté par le traitement des données et des équipements d'écoute du réseau.

Pour ces deux cas d'étude, la méthodologie proposée se base sur la composition de contraintes spatiales et temporelles sur les évènements déclenchés sur un « périmètre mobile » qui couvre avec la plus grande unicité possible le périmètre géographique d'intérêt. Cela suppose une connaissance a priori des comportements attendus sur le « territoire géographique » que l'on interprète au travers de la signalisation sur le « territoire mobile ». Les études menées sur les deux périmètres ont révélé une hétérogénéité de la précision spatio-temporelle accessible relative à la superposition du « territoire mobile » sur le « territoire géographique ». Néanmoins, les indicateurs qui ont pu être construits intéressent les acteurs du transport, comme en témoigne la sortie d'une offre de mesure de la mobilité estimée à partir des messages de signalisation, proposée par Orange nommée FluxVision. Nous citerons deux exemples d'applications en rapport avec les cas d'études présentés dans cette thèse pour lesquelles FluxVision est sollicitée. Tout d'abord, des indicateurs de fréquentation des départements découpés en bassins touristiques, sont estimés tout au long de l'année et permettent une meilleure compréhension des pratiques des territoires lors des saisons touristiques (ONDET, 2015). Ensuite, pour un cas particulier d'opération – la coupure de certaines sections du tronçon central de la ligne A pendant l'été – l'opérateur RATP souhaite accéder à deux indicateurs de trafic que sont les volumes de voyageurs en entrée et en sortie des gares souterraines par tranche d'heure et la chalandise du RER A par tranche horaire. L'opérateur a identifié plusieurs champs d'application des données de téléphonie. Les indicateurs estimés semblent appropriés pour la consolidation des études d'impact de la coupure du RER A en confrontant les hypothèses de variation de fréquentation des réseaux entre l'hiver et l'été, pour apporter des éléments de connaissance sur cette situation nouvelle et pour alimenter un retour d'expérience sur la première année de travaux pour mieux préparer les étés suivants (LEBLOND, et al., 2015).

Concernant les perspectives de recherche, le chapitre 6 a révélé quelques limites pour l'estimation de l'ensemble des attributs dans le cas de configuration standard du réseau mobile. Elles portent sur des aspects temporels relatifs au déclenchement des évènements et sur des aspects spatiaux concordant au découpage cellulaire. Afin d'étudier les relations entre les deux territoires au travers des données de signalisation, nous avons procédé à une exploration de ces traces numériques dans le chapitre 7. Les résultats montrent qu'il existe

des liens entre les usages des deux territoires sans pour autant que des corrélations évidentes n'apparaissent. Les mécanismes reliant les comportements sur ces deux réseaux, méritent des investigations supplémentaires et appuient l'approche par analogie que nous avons choisie dans la partie introductive. Il semble qu'une poursuite des travaux sous l'angle de l'analyse exploratoire permettrait de mieux caractériser les liens d'usages des deux réseaux. Ces liens sont une clé à la fois pour le développement de méthodes de redressement nécessaires pour offrir le potentiel d'une telle source aux acteurs de transport, mais également pour assurer la pérennité des travaux débutés ici.

Bibliographie

ABBOT, C. 2007. *Urban America in the Modern Age : 1920 to the Present.* 2. s.l. : Wheeling, Harlan Davison, 2007. p. 2.

ABDULHAI, B. and TABIB, S. M. 2003. *Spatio-temporal inductance-pattern recognition for vehicle re-identification.* s.l. : Transportation Research Part C, 11(3), 2003. pp. 223-239.

AGUILERA, V. 2013. *Eco-exploitation du trafic routier.* Paris : Presses des MINES, collection Développement durable, 2013. chapitre de l'ouvrage "Eco-conception des ensemble bâtis et des infrastructures".

AGUILERA, V., et al. 2012. *Estimating the quality of service of underground transit systems with cellular network data.* s.l. : Procedia-Social and Behavioral Sciences, 48, 2262-2271, 2012.

—. 2014. *Using cell phone data to measure quality of service and passenger flows of Paris transit system.* s.l. : Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 43, 2014. pp. 198 - 211.

AGUILERA, V., MILION, C. and ALLIO, S. 2014, April. *Territory analysis using cell-phone data.* s.l. : Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment, 2014, April.

AGUILERA, Vincent, et al. 2015. *Statistiques de mobilité et traces numériques de déplacements.* s.l. : Actes des XIIème journées de modélisation statistique de l'INSEE, 2015.

AHAS, R., et al. 2008. *Evaluating passive mobile positioning data for tourism surveys: an Estonian case of study.* s.l. : Tourism Management, 2008. pp. 469 - 486. Vols. 29, n.3.

AIT ALI, Kahina, BAALA, Oumaya and CAMINADA, Alexandre. 2015. *On the Spatiotemporal Traffic Variation in Vehicle Mobility Modeling.* s.l. : Vehicular Technology, IEEE Transactions, vol. 64, no 2, p. 652-667, 2015.

AKYILDIZ, I. F. and HO, J. S. M. 1995. *A mobile user location update and paging mechanism under delay constraints.* 1995.

AMPT, ES. and SAWANSON, J. September 8-11, 1996. *Pictorial representation of SP : Does it work ?* Oxford : 4th International Conference onSurvey Methods in TRnspoert, Steeple Aston, September 8-11, 1996. Vol. 2.

ANDAN, O., BONNEL, P. and C., RAUX. 1988. *Les analyses de comportements de mobilité individuelles quotidienne, une synthèse bibliographiques.* Lyon : Laboratoire d'Economie des Transports, pour le compte du SERT, Ministère des Transports, 1988. p. 118.

ANDRE, M. and HAMMARSTRÖM, U. *Driving speeds in Europe for pollutant emissions estimation.* s.l. : Transportation Research Part D: Transport and Environment. pp. 321-335. Vol. 5.

ARMOOGUM, Jimmy, et al. 2007-2008. *Enquête nationale transport et déplacements.* s.l. : ENTD, Rapport technique, 2007-2008.

ATEC. 1997. *Pour une charte de l'information multimodale sur les déplacements de personnes.* s.l. : ATEC, 1997.

AXHAUSEN, K. 2003. *social networks and travel : some hypothesis.* s.l. : Arbeitsbericht Verkehrs und Raumplannung, Institut für Verkehrsplannung und Transportsysteme, ETH Zürick, 2003. Vol. 197.
AXHAUSEN, KW. 1995. *Travel Diaries : an annoted catalogue.* London : working Center for Transport Studies, 1995.
BAGROW, J. P. and KOREN, T. 2009. *Investigating bimodal clustering in human mobility.* s.l. : Computational Science and Engineering 2009, CDS'09, International Conference, 2009. pp. 944 - 947. Vol. 4.
BALBO, F. and ARGAYOUNA, H. M. 2004. *Serveur Agent d'Information: application à l'information des voyageurs.* 2004.
BANISTER, D. 1998. *Transport policy and the environnement.* Londres : E&FN SPON, 1998.
BANOS, Arnaud and THEVENIN, Thomas. 2010. *Système de transport urbain : caractérisation de l'offre et estimation de la demande.* s.l. : Hermes science : Lavoisier (Traité IGAT), 2010. pp. 240, chapitre 1, p21-40.
—. 2010. *Système de transport urbain : caractérisation de l'offre et estimation de la demande.* s.l. : Hermes science : Lavoisier (Traité IGAT), 2010. pp. 240, 2010, chapitre 1, p.21-40.
BAO, L. and INTILLE, S. S. 2004. *Activity recognition from user-annotated acceleration data.* s.l. : Proc. Of the 2nd International Conference on Pervasive Computing, 2004. pp. 1 - 17.
BAR-GERA, H. 2007. *Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel.* s.l. : Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007. pp. 380 - 391. Vols. 15, n.6.
BAYIR, M. A., DEMIRBAS, M. and EAGLE, N. 2009. *Discovering spatiotemporal mobility profiles of cellphone user.* s.l. : In World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops, 2009. WoWMoM 2009. IEEE International Symposium, 2009. pp. 1 - 9.
BAZIN, S., BECKERICH, C. and DELAPLACE, M. 2010. *Ligne à Grande Vitesse et marchés immobiliers résidentiels à Reims : entre attractivité, aménités et anticipations.* s.l. : Revue d'Economie Régionale Urbaine, 2010. pp. 313-336. Vol. 2.
BEN-AKIVA, M. and LERMAN, SR. 1985. *Discrete choice analysis, theory and application to travel demande.* 4. s.l. : MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Etats-Unis, 1985.
BERNADET, M., et al. 2007. *Inventaire des besoins d'information sur les transports.* s.l. : Rapport du Groupe de travail du Cnis, 2007.
BERTINI, R. and EL-GENEIDY, A. 2003. *Generating transit performance measures with archived data.* s.l. : Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1841, 2003. pp. 109 - 119.
BINUCCI, N., HEPSAYDIR, E. and CANDY, E. 2004. *UE receive diversity as a performance enhancement to 3GPP Rel99, Rel5 and Rel6 radio features.* 2004.
BOITEUX, Marcel. juin 2001. *Transports: choix des investissements et coût des nuisances.* Paris : Paris, La Documentation française, juin 2001.

BONNAFOUS, A. and PUEL, H. 1983. *Physionomies de la ville, édition économie et humanisme.* Paris : les éditions ouvrières, série initiation économique, 1983. p. 165.
BONNEL, P. and CHAUSSE, A. 2000. *Urban travel : Competition and pricing, Transport reviews.* 2000. pp. 385-401. Vols. vol.20, N°4 .
BONNEL, P. and KLEIN, O. 1999. *Séminaire TGV, document pédagogique réalisé dans le cadre du cours Politique et Economie des Transports.* Lyon : ENTPE, 1999.
BONNEL, P. 2004. *Prévoir la demande de transport.* 2004.
BONNEL, P., CLAISSE, G. and MIGNOT, D. 2000. *Economie et politique des transports, cours de 2ème année.* Vaulx-en-Velin : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2000. p. 176.
BONNEL, P., et al. 6-8 décembre 1998. *Les enquêtes de déplacements urbains : mesure le présent, simuler le futur.* Lyon : Programme Rhône-Alpes, Recherche en Sciences Humaines, collection, Les chemins de la recherche, actes du colloque de Lyon, 6-8 décembre 1998.
BOUF, D. 1989. *Un nouvel instrument d'analyse stratégiques pour la RATP : le modèle Gros QuinQuin.* Lyon : thèse de l'Université Lumières Lyon 2, LET, 1989.
BOUGHRIET, Rachida. 2011. La production automobile mondiale en hausse de plus de 8 % en 2012. *www.actu-environnement.com.* [Online] octobre 6, 2011.
BOULIN, Jean-Yves. 2008. *Villes et politiques temporelles.* Paris : La Documentation française, 2008.
BOURSEUL. 1954. *Transmission électrique de la parole, L'Illustration BASKEVITCH, F. Origine des télécoms Chronologie, de 1793 à 1945.* 1954.
BREMOND, J. 1990. *Les économistes néoclassiques de L. Walras à M. Allais, de F. Von Hayek à M. Friedman.* 2. Paris : Hatier, 1990.
BRETEAU, V. 2011. *Manifestations spatiales de la congestion et localisation des emplois et des ménages* . s.l. : Doctoral dissertation, Université Paris-Est, 2011.
BROCKMANN, D. D., HUFNAGEL, L. and GEISEL, T. 2006. *The scaling laws of human trave.* s.l. : Nature 439, 2006. pp. 462 - 465.
BROEKX, Steven and Liu, RONGHUI. *Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits.* 1. s.l. : Science of The Total Environment. pp. 270-285. N° 371.
BRUNNER, C. and FLORE, D. Avril 2009. *Generation of Pathloss and Interference Maps as SON Enabler in Deployed UMTS Networks. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conf.* Barcelona, Spain : VTC Spring '09, Avril 2009.
BUISSON, C. and LEBACQUE, J.P. 1997. *Le modèle de trafic STRADA.* s.l. : Actes INRETS, 1997. pp. 69-90.
BUISSON, C. and LESORT, J. B. 2010. *Comprendre le trafic routier: Méthodes et calculs. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.* 2010.
—. 2010. *Comprendre le trafic routier: Méthodes et calculs. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.* 2010.
BULOZ, François. 1933. *Revue des deux mondes.* s.l. : Au bureau de la Revue des deux mondes, 1933.

BURREL, JE. 1968. *Multiple road assignment and its application to capacity restraint.* Karlsruhe : Leutzbach W and Baron P, 1968. Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft.
CACERES, N., et al. 2010. *Traffic Flow Estimates Inferred from Mobile Phone Networks.* Lisbon, Portugal : 12th WCTR, 2010.
CAENEN, Y., et al. 2001. *Les Franciliens utilisent autant les transports en commun que la voiture pour se rendre au travail.* s.l. : INSEE Ile de France, 2001.
CALABRESE, F. and RATTI, C. 2006. *Real time Rome. Networks and Communication studies,.* 2006. pp. 20(3-4), 247-258.
CALABRESE, F., et al. 2013. *Understanding individual mobility patterns from urban sensing data: A mobile phone trace example.* s.l. : Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013. pp. 301 - 313. Vol. 26.
CEREMA. 30 septembre 2013. Modèles « transports-urbanisme » : fiches de synthèses sur les modèles LUTI. *http://www.territoires-ville.cerema.fr/modeles-transports-urbanisme-fiches-de-syntheses-a872.html.* [Online] CEREMA, 30 septembre 2013.
CERTU. février 2012. *fiche 23 mobilité urbaine.* s.l. : CERTU, février 2012.
—. février 2012. *la mobilité urbaine en France - Principaux enseignements des années 2000-2010, Mobilités et transports, le point sur.* s.l. : Editions du CERTU, février 2012.
—. janvier 2013. *Les enquêtes déplacements « standard CERTU », note de présentation.* s.l. : CERTU, janvier 2013.
CHANDRAR, R. Bhat. 2012. *Travel demand forecasting : parameters and techniques.* Washington DC : Transportation Research Board, Cambridge Systematics Vanasse Hangen Brustlin, Gallop Corporation, Shapiro Transportation Consulting, Martin/Alexiou/Bryson,, 2012. national cooperative highway research program report N°176.
CHAPLEAU, R., et al. 1997. *Symphonie des usages des grandes enquêtes Origine-Destination, en totalement désagrégé majeur, opus Montréal 87 et 93, Les enquêtes de déplacements urbains : mesurer le présent, simuler le futur.* Lyon : Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1997. pp. 33-59.
CHATZIS, K. 2013. *Une histoire comparée de la modélisation des déplacements urbains en France et en Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada) sur la longue durée (1950 à nos jours).* 2013.
CLAISSE, G. 1997. *L'abbaye des télémythes, techniques, communication et société.* Lyon : Aléas, 1997. p. 385.
CLEMENT, L. 1996. *Review of existing land/uses transport models.* Lyon : CERTU, 1996.
COCHRANE, RA. 1975. *A possible economic basis for the gravity model.* s.l. : Journal of Transport, Economics and Policy, 1975. pp. 34-49. Vol. 9, N°1.
CODE DES TRANSPORTS. 2015. Article L2111-9. s.l. : legifrance.gouv.fr, 2015.
COHEN, S., et al. 1998. *Limitations de vitesse: les décisions publiques et leurs effets.* 1998.
COLLING, Alfred. 1949. *La Prodigieuse Histoire de la Bourse.* Paris : Société d'éditions économiques et financières, 1949. p. 225.
COMBES, P. P. and LAFOURCADE, M. 2012. *Revue de la littérature académique quantifiant les effets d'agglomération sur la productivité et l'emploi. .* 2012. Rapport réalisé

pour la Société du Grand Paris, dans le cadre de la mission d'études des éléments de l'évaluation socioéconomique du réseau de transport du Grand-Paris (Lot 3).
COPPOLA, P. and ROSATI, L. 2009. *simulation-based evaluation of advanced public transportation information systems (APTIS).* New York : N.H.M. Wilson and A.Nuzzolo, Scheduled-Based Modeling of Transportation Networks : Theory and Applications, 2009. pp. 195-216.
COUREL, J., MEYERE , A. and NGUYEN-LUONG, D. Avril 2005. *L'impact des modes de vie sur les déplacements.* s.l. : Les cahiers de l'Enquête Globale de Transport, Avril 2005. Vols. No. 10, 5.
DANFLOUS, D. 2003. *Déploiement national des systèmes d'information multimodale: transport direct: l'exemple anglais.* 2003.
DE LAPPARENT, Matthieu. Avril 2013. *Les modèles occupation du sol-transports comme outils d'évaluation , L'évaluation socio-économique en période de transition.* s.l. : Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Émile Quinet, Avril 2013. Vol. 2, chapitre 21.
DE MONTJOYE, Yves-Alexandre, et al. 2013. *Unique in the Crowd: The privacy bounds of human mobility.* s.l. : Scientific reports, 2013. Vol. 3.
DE PALMA, A. and PICARD, N. 2005. *Route choice decision under travel time uncertainty. Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2005. pp. 39(4), 295-324.
DE SOLERE, Régis, GUILLAUX, Tristan and VARNAISON-REVOLLE, Patricia. février 2012. *mobilité urbaine en France, mobilité et transports.* s.l. : Le point sur, CERTU, février 2012. fiche n23.
DECISION ARCEP. 26 février 2008. Décisions n° 2008-0228 et n° 2008-0229 de l'Arcep sur la réutilisation des fréquences GSM pour l'UMTS. s.l. : Arcep, 26 février 2008.
DECRET-LOI. 31 août 1937. *APPROBATION ET PUBLICATION DE LA CONVENTION DU 31 août 1937 RÉORGANISANT LE RÉGIME DES CHEMINS DE FER.* 31 août 1937.
DI LORENZO, G. and CALABRESE, F. 2011. *Identifying spatio-temporel patterns from mobile-phone traces.* s.l. : Intelligent Transportation systems (ITCS), International IEEE conference, 2011. pp. 1069-1074.
DIAL, RB. 1971. *A probabilistic multipath traffic assignment model with obviates path enumeration.* s.l. : Transportation Research, 1971. pp. 83-112. Vol. 5, N°2.
DJIKSTRA, EW. 1959. *Note on two problem in connection with graphs (spanning tree, shortest path).* s.l. : Numerical mathematics, 1959. pp. 269-271. Vol. 1, N°3.
DOCUMENTATION FRANCAISE. 1994. *Transports: pour un meilleur choix des investissements: rapport du groupe présidée par Marcel Boiteux.* s.l. : Documentation française, 1994.
DOMENCICH, T. A. and McFADDEN, D. 1975. *Urban travel demande : a behavioural analysis.* s.l. : North-Holland, Elsevier, Amsterdam, 1975.
DOUMAYROU, Vincent. 2007. *La fracture ferroviaire : pourquoi le TGV ne sauvera pas le chemin de fer.* s.l. : Editions de l'Atelier, 2007. p. 131.
DRANE, C., MACNAUGHTAN, M. and SCOTT, C. April 1998. *Positionning GSM Telephones.* s.l. : IEEE Communications Magazine, April 1998.

DREIF. 1995. *Les déplacements des Franciliens en 1991-1992.* Paris : Enquête Globale de Transport, 1995. p. 70.
—. 2001. *Les déplacements des Franciliens en 1997-1998.* Paris : Enquête Globale de Transport, 2001. p. 71.
DUPUY, G. 1975. *Une technique de planification au service de l'automobile, les modèles de trafics urbain, document de travail, action concertée de recherches urbains.* Paris : s.n., 1975.
DZOUNDOU, R. 2009. *Rôle des sondes dans les réseaux de téléphonie mobile.* s.l. : Master 2 Télécommunications, Université de Lille, 2009.
EAGLE, N. and PENTLAND, A. S. march 2006. *Reality Mining: sensing complex social systems.* s.l. : Journal Personla and Ubiquitous Computing, march 2006. pp. 255 - 268. Vols. 10, Issue 4.
EBOLI, L. and MAZZULLA, G. 2008. *A stated preference experiment for measuring service quality in public transport.* s.l. : Transportation Planning and Technology 31(5), 2008. pp. 509-523.
ELURU, N., CHAKOUR, V. and EL-GENEIDY, A. 2012. *Travel Mode Choice and Transit Route Choice Behavior in Montreal : Insigths from McGill University Members Commute.* s.l. : Public Transport : Planning and Operations, vol 4(2), 2012. pp. 129-149.
ENQUETE MENAGES DEPLACEMENTS. mai 2008. *L'enquête ménages déplacements « standard Certu ».* s.l. : Guide méthodologique, mai 2008.
FARRAHI, K. and GATICA-PEREZ, D. 2010. *Probabilistic mining of socio-geographic routines from mobile phone data.* s.l. : Signal Processing, IEEE, 2010. pp. 746 - 755. Vols. 4, n.4.
FICEK, M. and KENCL, L. 2012, March. *Inter-call mobility model: a spatio-temporal refinement of call data records using a gaussian mixture model.* s.l. : INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE, 2012, March. pp. pp. 469-477.
G., DIDIER. 2003. *La Défense - Issy-Plaine : Historique.* s.l. : le site de Métropole, 2003.
GENRE-GRANDPIERRE, C. 2010. *Systèmes de transport urbain – Caractérisation de l'offre et estimation de la demande.* s.l. : édition Lavoisier, 2010. chapitre 4, p83-104.
GEORGES, Mathieu. 2003. *Le Matériel moteur de la SNCF.* s.l. : La Vie du Rail, 2003.
GONZALEZ, M. C., HIDALGO, C. A. and BARABASI, A. L. *Understanding individual human mobility patterns.* s.l. : Nature. pp. 779 - 782. Vols. 453, n. 7196.
GUDE-CATALAN, S. and USTER, G. 2000. *Recherche Institutionnelle et Juridique sur L'Information Multimodale.* s.l. : Rapport technique, INRETS, 2000.
GUERIN, R. 1987. *Channel occupancy time distribution in a cellular radio system.* s.l. : Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 36(3), 1987. pp. 89-99.
GUITTON, H. 1964. *Statistiques et économétrie.* Paris : Daloz, 1964.
HALEPOVIC, E. and WILLIAMSON, C. 2005, October. *Characterizing and modeling user mobility in a cellular data network.* s.l. : Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks, 2005, October. pp. 71-78.

HUANG, Wenhao, et al. 2010. *Anchor points seeking of large urban crowd based on the mobile billing data.* s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 346-357. Vol. Advanced Data Mining and Applications.
HUBERT, J.P. 2009. s.l. : INSEE Première, 2009. Vol. N°1252.
INRETS. 1989. *Un milliard de déplacements par semaine.* Paris : La Documentation Française, 1989. p. 293.
INSEE INRETS. 1997. *Spécial enquête Transports et Communications, Recherche, Transports, Sécurité.* Paris : Dunod, 1997. Vols. N°56-57.
ITU/TGI. 1999. *Direction of traffic.* s.l. : ITU/TGI, 1999.
JIANG, S., FERREIRA, J. and GONZALES, M-C. 2012. *Clustering daily patterns of human activities in the city* . s.l. : Data Mining Knowledge Disc, 2012. pp. 478-510. Vol. 25.
JONES, PM., et al. 1980. *Understanding travel behavior.* s.l. : Oxford studies of Transport, Gower, 1980.
JOUMAA, Chibli, CAMINADA, Alexandre and LAMROUS, Sid. 2008. *Mobility simulation for the evaluation of UMTS power control algorithms.* s.l. : New Technologies, Mobility and Security, 2008. NTMS'08. IEEE,p. 1-5, 2008.
KAMOUN, M. A. 2007. *Conception d'un système d'information pour l'aide au déplacement multimodal: Une approche multi-agents pour la recherche et la composition des itinéraires en ligne.* s.l. : Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille, 2007.
KANG, C., et al. 2012. *Intra-urban human mobility patterns: an urban morphology perspective.* s.l. : Physic A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012. pp. 1702 - 1717. Vols. 391, n.4.
KIRK, B., FAGAN, K. and RENNER, R. 2005. *Development and demonstration of a system for using cell phones as traffic probes.* Canada : Globis Data Inc. Report No. Report, TP 14359E Transport Canada, Transportation Development Center, 2005.
KONSTANTINOS, Chatzis. Décembre 2013. *La Modélisation des déplacements urbains en Amérique du nord et en France (1945 à nos jours). Administrations, universités et bureaux d'études.* s.l. : Université de Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEM), Décembre 2013. Vol. 2, unpublished "HDR" Thesis.
KROES, E., et al. September 2013. *On the Value of Crowding in Public Transport in Île-de-France.* Paris : OECD/ITF Discussion Paper 2013-18. Prepared for OECD/ITF Roundtable on Valuing Convenience in Public Transport, September 2013.
LA DOCUMENTATION FRANCAISE. juin 2005. *Présentation du Rapport d'information déposé par la Commission des Finances, de l'Économie générale et du Plan sur la valorisation du patrimoine autoroutier.* juin 2005.
LAMALICE, C. and MORENCY, C. A. P. Avril 2009. *Définition et mesure de la mobilité durable à l'aide d'indicateurs statiques et dynamiques.* Montréal : 44ème Congès de l'AGTR, Avril 2009.
LANGLOIS, Crystal and LEBLOND, Vincent. 2014. *Improving Projects Evaluations in Analysing Transport Models Ability to Explain the Past.* s.l. : European Transport Conference, 2014.

LAVIELLE, Jean-Pascal. 2008. *Évolutions des rythmes sociaux et étalement de l'heure de pointe.* s.l. : travail de fin d'études, École nationale des travaux publics d'État, 2008.
LE FIGARO. 28 mars 2013. *Trains bondés ? Allez travailler plus tard, conseille la SNCF.* 28 mars 2013.
LE JEANNIC, T. 2010. *La mobilité des Français, panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008.* Paris : ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2010.
LE PARISIEN. 4 avril 2014. *Le tramway, quel succès !* s.l. : Le Parisien, 4 avril 2014.
—. 28 mars 2013. *Trains saturés : et si on travaillait en décalé ?* 28 mars 2013.
LEBLOND, Vincent and LANGLOIS, Crystal. 2015. *La prolifération des données pour l'aide à la décision.* s.l. : Congrès ATEC ITS France : Les Rencontres de la Mobilité Intelligente, 2015.
—. 2013. *Modelling Detailed Passengers' Behaviours in a Complex Public Transportation Network.* s.l. : European Transport Conference, 2013.
LEGISLATION EUROPEENNE TRANSPORT. Service public de transport de voyageurs par chemin de fer et par route. *www.europa.eu/legislation_summaries.* [Online]
LEURENT, F. 1995. *Constitution d'une boite à outils pour opérer divers affectations statiques du trafic routier.* s.l. : INRETS, Arcueil, 1995. note de travail 95.2.
—. 2013. *L'équipement territorial au prisme de l'éco-conception: quels principes et quelles méthodes pour l'aménagement et de transport?* Paris : Presses des MINES, collection Développement durable, 2013. chapitre de l'ouvrage "Eco-conception des ensemble bâtis et des infrastructures".
—. 2006. *Modélisation du trafic, des déplacements sur un réseau et de l'accessibilité aux activités grâce au transport.* s.l. : Université Paris Dauphine-Paris IX, 2006. Doctoral dissertation.
LEURENT, Fabien. 2008. *Modelling seat congestion in transit assignment.* . s.l. : Transportation Research Part B, manuscript TRB-D-08-00194 , 2008.
—. Jul 1996. *The Theory and Practice of a Dual Criteria Assignment Model with a continuously distributed Value-of-Time.* Lyon, France : s.n., Jul 1996. pp. 455-477. J.B. Lesort. ISTTT, Pergamon.
L'HUMANITE. 29 avril 2013. *Flexibiliser des horaires de travail, la fausse bonne idée de la SNCF.* 29 avril 2013.
—. 4 Août 2009. *La 4e licence fait des vagues.* s.l. : L'Humanité, 4 Août 2009.
LICHERES, V. and RAUX, C. 1997. *Développement d'un modèle stratégiques de simulations des déplacements, présentation générale.* LYON : SEMALY, LET, 1997.
LINAARTZ, J-P, M., G., WESTERMAN, M., HAMERSLAG, R. October 1994. *Monitoring the Bay Area Freeway Network Using Probe Vehicles and Random Access Radio Channels.* s.l. : California PATH research report, U.C. Berkeley-ITS-PRR-94-23, October 1994.
LIPOVETSKY, Gilles. 2006. *Le Bonheur paradoxal. Essai sur la société d'hyperconsommation.* Paris : Gallimard, 2006.

LORENZO, G. D. and CALABRESE, F. 2011, October. *Identifying human spatio-temporal activity patterns from mobile-phone traces.* s.l. : Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference, 2011, October. pp. 1069-1074.
LUCE, R., SUPPES, P., BUSH, R. and GALANTER, E. 1965. *Preference, utility and subjective probability.* New York : Handbook of Mathematical psychology, Wiley, 1965. Vol. 3.
MAHMASSANI, H.S., HU, T. and JAYAKRISHNAN, R. 1992. *Dynamic traffic assignment and simulation for advanced network informatics (DYNASMART).* Capri, Italy : Proceedings of the 2nd International CAPRI Seminar on Urban Traffic Networks, 1992.
MANHEIM, ML. 1984. *Fundamentals of transportation systems analysis, vol. 1 : basic concepts.* 4. s.l. : MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Etats-Unis, 1984.
MANUAL, H.C. 2000. *Highway capacity manual.* Washington, DC : s.n., 2000.
MARGAIL, F. 1989. *Vers une perspective des déplacements urbains.* Lyon : Mémoire de DEA, ENTPE, Université Lumière Lyon 2, 1989. pp. 29, 40.
MASSOT, M-H. and ORFEUIL, J-P. 1991. *Offre et demande de transport en commun dans les villes française sans métro – Sensibilité de l'usage à l'offre.* s.l. : Rapport INRETS, 1991. Vol. 3, N°148.
MATHEW, Tom V. and KRISHNA RAO, K. V. . 2006. *Introduction to Transportation Engineering.* s.l. : NPTEL, 2006. chap. 1.
METROPOLE. 29 août 2002. *La ligne A prête à affronter l'hiver.* s.l. : MétroPole, 29 août 2002.
—. *Projets : Prolongement vers Nanterre.* s.l. : MétroPole.
MILION, C., ALLIO, S. and AGUILERA, V. May 2014. *A Use of Cellular Network Records to Sense the Impact of Urban Transit Systems Comfort on Users Route Choices.* s.l. : Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014 IEEE 79th, May 2014. pp. 1 - 5.
MINISTERIE VAN VERKEER. 2006. *Le vélo aux Pays Bas.* s.l. : Ministerie Van Verkeer en Waterstaat, 2006.
MUNCH, Emmanuel. 2014. *L'harmonisation des horaires de travail: en finir avec l'heure de pointe?* s.l. : Métropolitiques, 2014. p. 5.
NANGERONI, Cécile. 23 avril 2013. *Horaires décalés, transports moins bondés.* s.l. : Ville, rail et transports, 23 avril 2013. pp. 29-33. Vol. 550.
NATURE. 2008. *A flood of hard data.* s.l. : Nature 453(7196):698, 2008.
NICOLAS, J-P. 1996. *Villes transports et environnement. Contributions relatives des paramètres du trafic routier affectant la pollution sonore et atmosphérique en milieu urbain.* Lyon : Université Lumière Lyon 2, thèse de doctorat, 1996.
NOUSIAINEN, S., KORDYBACH, K. and KEMPPI, P. 2002, June. *User distribution and mobility model framework for cellular network simulations.* s.l. : IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, 2002, June. pp. 518-522.
O'BRIEN, P. D. and NICOL, R. C. Juillet 1998. *FIPA — towards a standard for software agents.* s.l. : BT Technol J, 16,3, Juillet 1998. pp. 51 - 59.

OFFNER, J-M. 1985. *Aspects méthodologiques d'un suivi exploratoire du VAL sur deux quartiers lillois, acte des journées CETUR, sur les Suivis des grandes infrastructures de déplacements urbains, 13 et 14 juin 1985.* Bagneux : s.n., 1985. p. 317.
OMNIL. juillet 2012. *Enquête Globale transport, la mobilité en Ile-de-France.* s.l. : Observatoire de la Mobilité deb Ile de France, juillet 2012. N°1.
ONDET, Olivier. 2015. *Le Big Data, au service du tourisme.* s.l. : Annales des Mines-Réalités industrielles, 2015. (No. 3, pp. 77-79).FFE.
ORDONNANCE. 7 janvier 1959. Ordonnance n° 59-151 du 7 janvier 1959 - Article 2. s.l. : www.legifrance.gouv, 7 janvier 1959.
ORFEUIL, Jean-Pierre. 2005. *Mobilité, planification et développement urbain en France: 1960 à 2000.* Créteil : Institut d'urbanisme de Paris, 2005.
ORLANDI, Barbara and SCAHILL, Frank . 2012. *Wi-Fi Roaming – Building on ANDSF and Hotspot2.0.* s.l. : ALCATEL-LUCENT, WHITE PAPER IN COLLABORATION WITH BT, 2012.
ORTUZAR, J de D. and WILLUMSEN, LG. 1994. *Modelling transport.* 2. s.l. : John Wiley & Sons, UK, 1994.
ORTUZAR, J. and WILLUMSEN, L. 2011. *Modelling transport.* 4. s.l. : John Wiley and Son, 2011.
ORTUZAR, WONNACOTT, TH. and WONNACOTT, RJ. 1991. *Statistiques (traduction française de l'ouvrage Introductory statistics for business and economics, 4ème edition, John Wiley&Sons, New York, Economica).* 1991.
OTSASON, V., et al. *Accurate GSM Indoor Localization.*
OUGHDI, Mustapha, et al. 2005. *Load regulation in mobile network with planned pricing model based on user behaviour.* s.l. : utonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services, 2005. ICAS-ICNS 2005. Joint International Conference on. IEEE, p. 53-53, 2005.
PARKINSON, T. and FISHER, I. 1996. *Rail transit capacity.* s.l. : Transportation Research Board, 1996. Vol. 13.
PATURLE, Claude and BLAIS, Jean-Paul. 1977. *Le Temps de l'aménagement. Analyse de l'aménagement du temps en milieu urbain.* s.l. : compte rendu de fin de recherche, Paris: ministère de l'Équipement, 1977.
PEUPORTIER, Bruno. 2013. *Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures,.* s.l. : Paris: Presses des MINES, collection Développement durable, VINCI Mines ParisTech, Agro ParisTech, École des Ponts ParisTech, 2013.
PLASSARD, F. 1988. *Le réseau TGV et les transformations de l'espace.* s.l. : la Région Rhône-Alpes, les Annales de la Recherche Urbains, 1988. Vol. 39.
PRAGER, Jean-Claude. Avril 2013. *Les effets des infrastructures sur la répartition spatiale des populations et des emplois , L'évaluation socio-économique en période de transition.* Avril 2013. Vol. 2, chapitre 21. Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Émile Quinet.
PRAT , Cécile and LEBLOND, Vincent. 2014. *Passengers' Density Impact on Route Choice in Urban Public Transport Networks.* s.l. : European Transport Conference, 2014.

PREDIT. 2001. Publication Actions fédératives Intermodalité-Voyageurs / Information-communication , Rapport final du groupe de définition. *http://www.predit.prd.fr/02%2Dpredit/01/publication/fiches/pub0043.htm.* [Online] 2001.
QUINET, E. 2013. *L'évaluation socioéconomique des investissements publics.* 2013.
RAENTO, M., et al. 2005. *ContextPhone – a prototyping platform for context-aware mobile applications.* s.l. : IEEE Pervasive Comput, 2005. pp. 51 - 59. Vols. 4, n.2.
RAIL PASSION. novembre 2006. *Hors-série « Spécial Île-de-France ».* s.l. : Rail passion, novembre 2006.
RAPPORT ARCEP. Novembre 2012. *Rapport sur la couverture et la qualité des services mobiles en France métropolitaine, la couverture 3G en métropole au 1er juillet 2012.* s.l. : Arcep.fr, Novembre 2012. p. 77.
RAPPORT BOITEAUX, I. 1994. *Transports : pour un meilleur choix des investissements.* s.l. : Commissariat général du Plan, 1994.
RAPPORT SENAT. juin 1998. *Rapport de la Commission sur les choix stratégiques concernant les infrastructures de communication, Troisième partie : Achevons et maintenons un réseau autoroutier de qualité dans une perspective d'aménagement du territoire.* s.l. : www.senat.fr, juin 1998.
RATP. 5 septembre 2005. *Doublement des rames du tramway T2 Val de Seine – La Défense à partir du 5 septembre 2005.* s.l. : Communiqué RATP, 5 septembre 2005.
RATTI, C., FRENCHMAN, D. and PULSELLI? R. M., WILLIANS, S. 2006. *Mobile Landscapes: using location data from cell phones for urban analysis.* s.l. : Environment and Planning B: Planning and Design, 2006. pp. 727 - 748. Vol. 33.
READES, J., et al. 2007. *Cellular census: Explorations in urban data collection.* s.l. : Pervasive Computing, IEEE, 6(3), 2007. pp. 30-38.
RECLUS, F. 6 décembre 2011. *Recueil de l'information routière par capteurs mobiles, COTITA, L'information aux usagers sur les déplacements.* s.l. : CETE de Lyon, 6 décembre 2011.
RENAUD, J-F. and TABOURIN, E. 1998. *Les grandes fonctions économiques, la production et les dépenses.* Paris : Ellipses, 1998.
ROQUIGNY, Quentin. 2013. *Valeurs du temps.* s.l. : France Stratégie (www.strategie.gouv.fr), 2013. p. 77. annexe 9.
—. 2012. *Valeurs du temps.* [ed.] France Stratégie (www.strategie.gouv.fr). 2012. p. 77. Annexe 9.
ROSA, Hartmut. 2012. *Aliénation et accélération. Vers une théorie critique de la modernité tardive.* Paris : La Découverte, coll. «Théorie critique », 2012.
ROSE, G. May 2006. *Mobile Phones as Traffic Probes: Practices, Prospects and Issues.* s.l. : Transport Review, Vol. 26, No. 3, May 2006. pp. 275-291.
RUBIO, A., SANCHEZ, A. and FRIAS-MARTINEZ, E. 2013. *Adaptive non-parametric identification of dense areas using cell phone records for urban analysis.* s.l. : Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013. pp. 551 - 563. Vols. 26, n. 1.

SAUTORY, Olivia. 2013. *Organisation, rythmes et durées du travail des salariés en 2010.* s.l. : conférence d'ouverture de l'université des Cadres et de l'association Tempo territorial, 2013.
SCHLEIFFER, R. 2002. *Transportation Research part C : emerging technologies (special issue)* . s.l. : Intelligent agents in traffic and transportation, 2002. p. 202. Vols. 10C, Numbers 5-6.
SCHLICH, R., et al. 2004. *Structures of leisure travel : Temporal and spatial variability* . s.l. : Transportation Review, 2004. pp. 219-228. Vol. 24(2).
SENAT. 2003. *Financement des infrastructures de transport à l'horizon 2020.* s.l. : www.senat.fr, 2003.
SMITH, L., BECKMAN, R. and BAGGERLY, K. 1995. *TRANSIMS: Transportation analysis and simulation system (No. LA-UR--95-1641).* . s.l. : Los Alamos National Lab., NM (United States), 1995.
SOSSLAU, AB., et al. 1978. *Quick-response urban travel estimation techniques and transferable parameters, user's guide.* Washignton DC : National Cooperative Highway Research Program, 1978. report 187, TRB.
STIF. 6 juin 2012. *Communiqué de presse du Conseil du 6 juin 2012 : « Le conseil du STIF approuve le plan de modernisation du RER A ».* s.l. : STIF, 6 juin 2012.
—. *Délibération n°2012/378 Prolongement de la ligne 1 du métro à l'est de Château de Vincennes à Val de Fontenay, Convention de financement des études de faisabilité.* s.l. : stif.info.
—. 9 février 2011. *Délibération n°2012-0163 issue de la séance du 9 février 2011 : « RER A – Schéma directeur ».* s.l. : STIF, 9 février 2011. pp. 22 - 24.
—. 2005. *Données de fréquentation : Les chiffres 2005,.* s.l. : STIF, 2005. p. 16.
—. 8 février 2012 . *Modernisation du métro.* s.l. : Conseil du STIF, 8 février 2012 .
—. 3 novembre 2009. *Présentation de la SNCF et de la RATP lors du comité de ligne du RER B du 3 novembre 2009.* s.l. : STIF, 3 novembre 2009.
—. 2011. *Rapport d'activité.* 2011.
—. 31 janvier 2008. *RERA : une nouvelle offre pour répondre aux besoins des voyageurs.* s.l. : Communiqué de presse STIF, 31 janvier 2008.
STOPHER, P. 1993. *deficiencies of travel-forecasting methods relatives to mobile emissions.* s.l. : journal of transportation engineering, 1993. pp. 723-741. Vol. 19, N°5.
STOPHER, P., et al. février 2012. *GPS-based household interview survey for the Cincinnatti, Ohio Region.* s.l. : Ohio Department of Transportation /office of research and develppment and the US Department of the Transportation/ federal highway administration, février 2012.
STOPHER, P.R. and GREAVES, S.P. 2007. *household travel surveys : where are we going ? part A.* s.l. : transport research, 2007. pp. 367-381. Vol. 41.
STOPHER, PR. 1998. *A review of separate and joint strategies for the use of data on revealed and stated choices.* s.l. : Transportation, special issue : Extending the scope of travel survey, vol.25, N°2, 1998. pp. 187-205.

SYTRAL COURLY. 1990. *Comment de déplacent les lyonnais.* Lyon : SYTRAL, COURLY, Conseil Général du Rhône, Ministère des Transports, 1990. p. 29.
TABOURIN, E. 1989. *Un modèle de simulation du financement des transports collectifs urbains à l'an 2000 : le modèles QuinQuin, application à l'agglomération lyonnaise.* Lyon : thèse de l'Université Lumière Lyon 2, LET, 1989.
TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM. 2003. *Transit Capacity and Quality of Service Manual.* 2. s.l. : Transit Cooperative Research Program, 2003.
TRICOIRE, Jean. 2007. *Le Tramway à Paris et en Île-de-France.* 2e éd. s.l. : La Vie du Rail, 2007. p. 143.
—. 1999. *Un siècle de métro en 14 lignes.* s.l. : La vie du rail & et des transports, 1999. p. 188.
TURCK, Christine. 2009. *prédiction de couverture des champs radioélectriques pour les réseaux mobiles : l'apport des Systèmes d'Informations Géographiques. Application en milieu urbain.* Strasbourg : Thèse, Géographie ULP, 2009.
—. 2009. *Thèse : prédiction de couverture des champs radioélectriques pour les réseaux mobiles : l'apport des Systèmes d'Informations Géographiques. Application en milieu urbain.* Strasbourg : Géographie ULP Strasbourg, 2009. Thèse.
USINE OUVELLE. 18 novembre 2004. *usinenouvelle.com.* [Online] 18 novembre 2004.
VALIQUETTE, F. MORENCY, C. 12 juillet 2010. *Trip chaining and its impact on travel behavior.* s.l. : WCTR, 12 juillet 2010.
VALIQUETTE, F. août 2010. *Typologie des chaînes de déplacements et modélisation descriptive des systèmes d'activités des personnes.* s.l. : mémoire de maitrise ès sciences appliquées (génie civil), août 2010.
VAN DE BERG, P., ARENTZE, T. and TIMMERMANS, H. *A path analysis of social netwoks, telecommunication and social-activity patterns.* s.l. : Transportation Research Part C : Emerging Technologies, 26. pp. 256-268.
WAGNER, D.P. 1997. *Lexington Area Travel Data Collection Test: Global Positionning Systems for Personnal travel surveys, Final report for Office of Highway Information Management.* Washington DC : office of Technology Application, Federal Highway Administration, US departement of transportation, 1997.
WAHBA, M. and SHALABY, A. 2009. *MILATRAS : A new modeling framework for the transit assignement problem.* New York : N.H.M Wilson and A.Nuzzolo, Scheduled-Based Modeling of Transportation Networks : Theory and Applications, 2009. pp. 171 - 194.
WANG, H., et al. September 2010. *Transportation Mode Inference from Anonymized and Aggregated Mobile Phone Call Details Record.* s.l. : 13th International IEEE, September 2010. pp. 318 - 323.
WARDROP, JG. 1952. *Some theoretical aspects of road traffic research* . s.l. : Proceedings of Institution of Civil Engineers, 1952. pp. 325-378. part II-1.
WASSON, J., STURDEVANT, J. R. and BULLOCK, D. M. June 2008. *Real-Time Travel Time Estimates using Media access Control address Matching.* s.l. : ITE Journal, June 2008. pp. 20 - 24.

WHITE, J. and WELLS, I. 2002. *Excracting origin-destination information from mobile phone data.* 2002.
WOLF, J. and LEE, M. 2008. *Synthesis of and statistics for recent GPS-enhanced travel surveys.* France : international conference on Survey Methods in Transport: harmonization and data comparability, 2008.
WOLF, J. juillet 2000. *Using GPS Data Loggers to Replace Travel Diairies in the Collection of Travel Data.* s.l. : Ph.D dissertation Georgia Institute of Technology, juillet 2000. Chap. 2.
WOLSHON, B. and LAMBERT, L. 2006. *Reversible Lane Systems : synthesis of Practice* . s.l. : Journal of Transportation Engineering, 2006. pp. 933-944. Vol. 132(12).
XIONG, H., ZHANG, D. and GAUTHIER, V. 2012, September. *Predicting mobile phone user locations by exploiting collective behavioral patterns.* s.l. : Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Autonomic & Trusted Computing (UIC/ATC), 2012 9th International Conference, 2012, September. pp. 164 - 171.
YANG, C. and ITOH, M. 2009. *Empirical study on inter-call time distribution.* s.l. : Consumer Electronics, ISCE'09, IEEE 13th International Symposium, 2009. pp. 52 - 53.
YGNACE, J. 2001. *Travel time/speed estimates on the French Rhone corridor network using cellular phones as probes.* Lyon, France : SERTI V Program, STRIP (System for Traffic Information and Positionning) Project, INRESTS – LESCOT 0201, 2001.
YGNACE, J., et al. 2000. *Travel time estimation on San-Francisco bay area network using cellular phones as probes.* s.l. : University of California, Berkeley, PATH Working, Paper UCB-ITS-PWP-2000-18, 2000.
YUAN, Y., RAUBAL, M. and LIU, Y. 2012. *Correlating mobile phone usage and travel behavior–A case study of Harbin, China.* [ed.] Environment and Urban Systems 36(2) Computers. 2012. pp. 118-130.
ZAPA. novembre 2012. *Projet d'expérimentation d'une zone d'actions prioritaires pour l'air.* s.l. : ZAPA, Airparif surveillance de la qualité de l'air en IDF, novembre 2012.
ZHANG, C., et al. 2001. *Définition de la typologie de la mobilité adaptée à la modélisation de la demande, partie 1.* Lyon : Programme de recherche Prédit, SIS, LET, 2001.
ZHENG, J., LIU, S. and NI, L. M. 2013, March. *Effective routine behavior pattern discovery from sparse mobile phone data via collaborative filtering.* s.l. : Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2013 IEEE International Conference, 2013, March. pp. 29 - 37.
ZHOU, C., XU, Z. and HUANG, B. 2010, December. *Activity Recognition from Call Detail Record: Relation Between Mobile Behavior Pattern And Social Attribute Using Hierarchical Conditional Random Fields.* s.l. : Green Computing and Communications (GreenCom). IEEE/ACM Int'l Conference on & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), 2010, December. pp. 605-611.
ZONOOZI, M. M. and DASSANAYAKE, P. 1997. *A novel modelling technique for tracing mobile users in a cellular mobile communication system.* s.l. : Wireless Personal Communications, 4(2), 1997. pp. 185-205.

—. 1996, November. *Effect of handover on the teletraffic performance criteria.* s.l. : Global Telecommunications Conference. GLOBECOM'96.'Communications: The Key to Global Prosperity. IEEE, 1996, November. pp. 242-246. Vol. 1.

Annexes

1 Les phases d'évolutions technologiques des réseaux

Ce paragraphe contient une documentation complémentaire des phases d'évolutions technologiques des réseaux

2.4 Phase 1 : Franchir de longue distance

2.4.1 De l'invention….

La première locomotive à vapeur fût inventée par Richard Trevithick vers 1802. Elle pouvait rouler à une vitesse de 20km/h à vide et à 8km/h en charge. Cependant, les chemins de fer ayant pour vocation de transporter des voyageurs, n'apparaissent en France qu'en 1827. Cette possibilité de voyager plus loin est née avec la ligne de chemins de fer de Saint-Etienne à la Loire. Elle était longue de 23km et fonctionnait par traction animale. Peu à peu, d'autres lignes isolées apparaissent en France, comme la ligne Saint-Etienne-Lyon. Son système de traction animale fût remplacé par des locomotives à vapeur en 1836.

En France, en 1854, Charles Bourseul, agent du télégraphe, pose le principe du téléphone (BOURSEUL, 1954). En 1876, Graham Bell dépose un brevet pour l'invention du téléphone qui fût exploitée commercialement en 1877 aux Etats-Unis. Ainsi, il fût possible de converser à distance.

2.4.2 …. à l'engouement collectif

De 1830 à 1914, le chemin de fer est en évolution rapide (voir Figure 88). Des lignes sont créées sur l'ensemble du territoire français, le confort, la sécurité et la vitesse des trains s'améliorent. Des avancées dans le domaine de l'ingénierie civile permettent aux chemins de fers de surmonter les obstacles naturels (massifs montagneux).

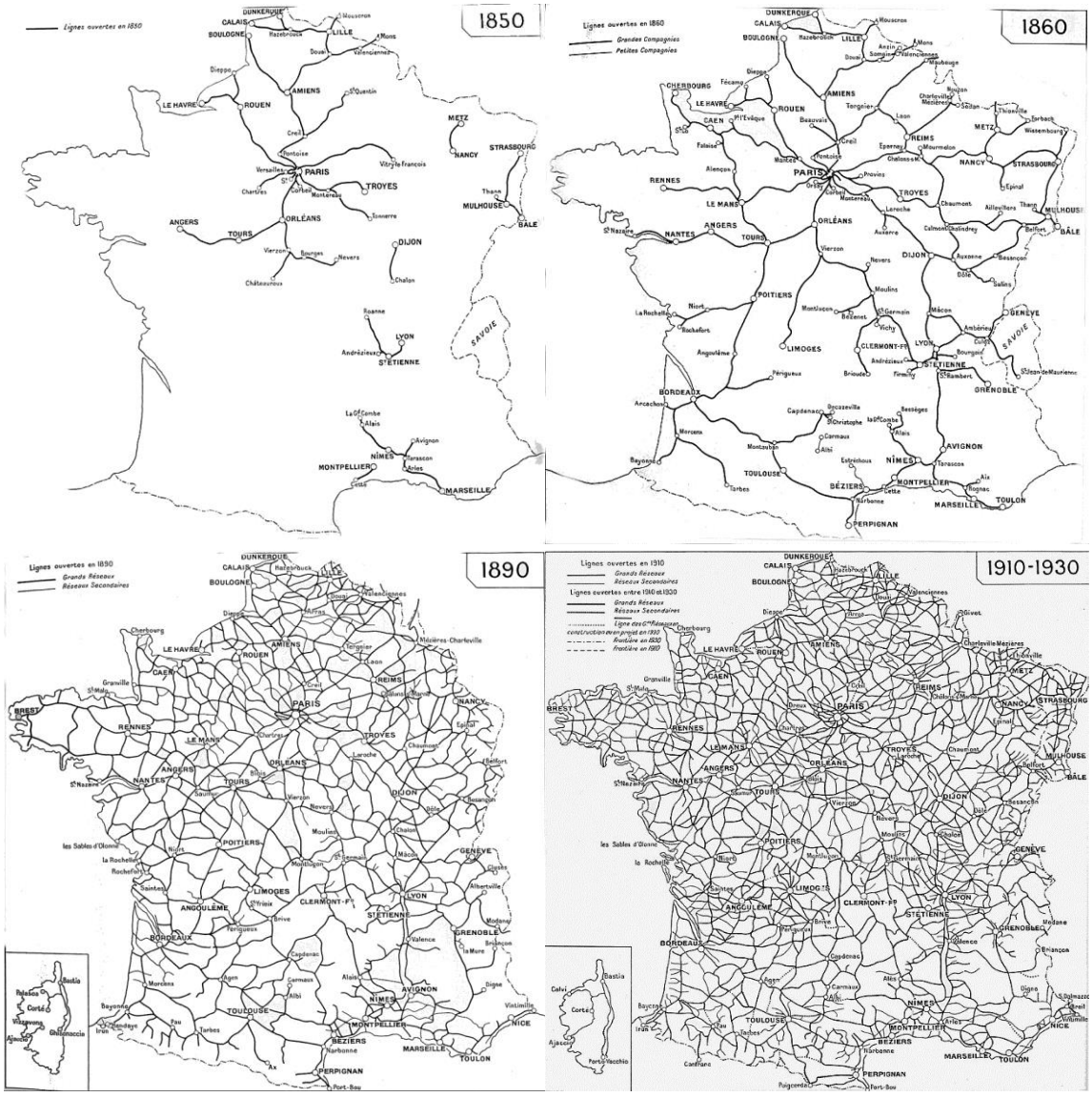


Figure 88 : développement des reseaux ferrés en France de 1850 à 1930

La popularité du chemin de fer allant de manière croissante, l'idée de prolonger les lignes inter-urbaines au cœur des villes mûrit. Pour l'exposition universelle de 1900, les autorités françaises décident de lancer la construction du métro sur l'exemple des capitales étrangères. L'objectif visé était de desservir une ville de plus en plus paralysée par ses transports de surface par un métropolitain. La première ligne du « chemin de fer métropolitain », ouvre le 19 juillet. Elle rencontre un succès tel que la mise en œuvre d'un réseau de plus en plus vaste ne tarde pas. Ainsi, le réseau atteint 159 km de longueur pour 332 stations à la veille de la Seconde Guerre Mondiale (voir Figure 89).

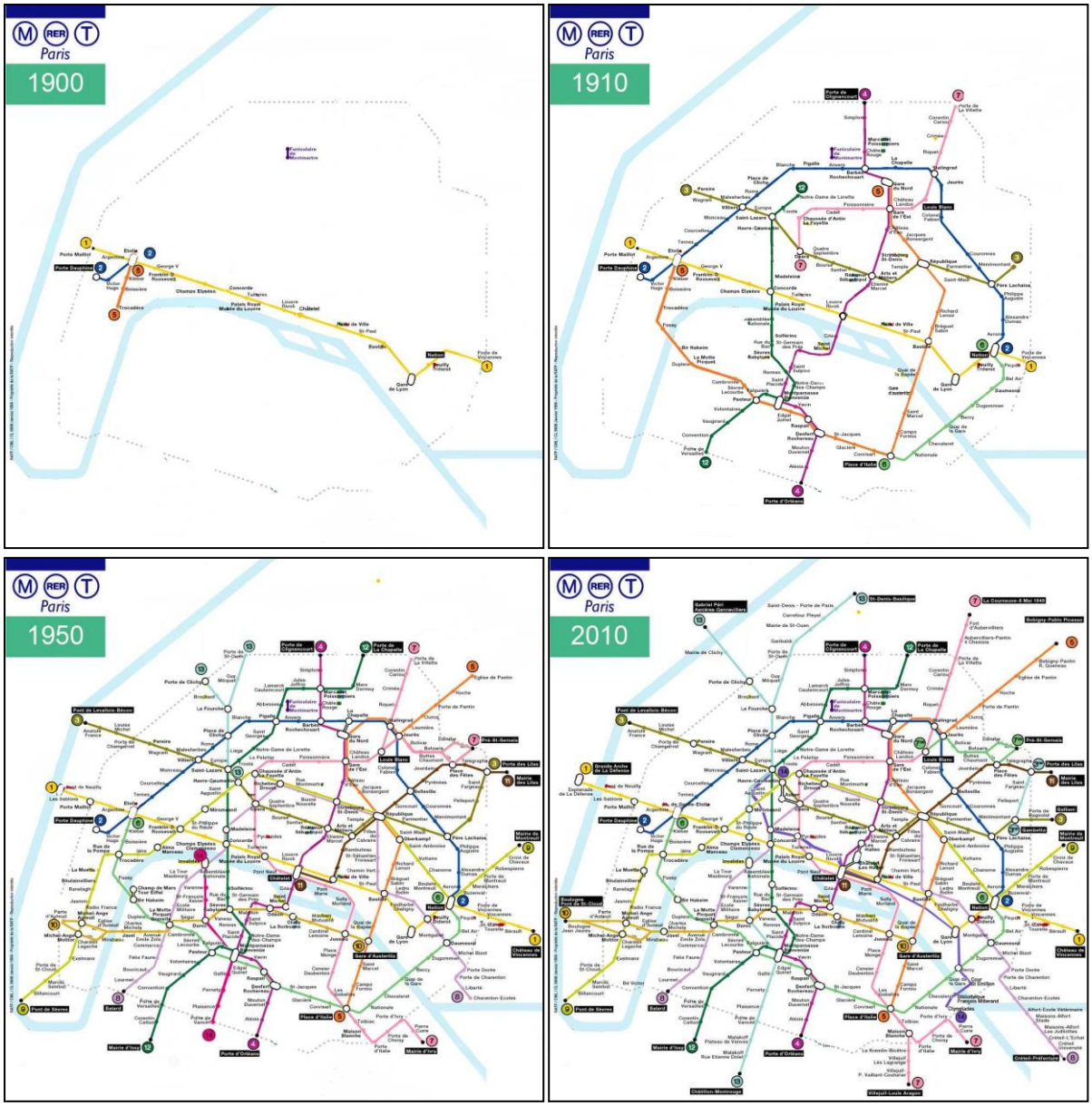


Figure 89 : développement du réseau métlopoliotain de Paris de 1900 à 2010 [24]

A ses débuts, le réseau téléphonique filaire (appelé RTC pour Réseau Téléphonique Commuté) nécessitait des commutations manuelles. Le procédé de commutation automatique fût inventé vers 1891 par l'américain Almon Strowger. L'intérêt était d'appeler directement un correspondant sans passer par une opératrice pour la mise en communication. Ces progrès techniques ont permis de simplifier l'exploitation du réseau et ainsi en 1912, le réseau de téléphonie automatique fait son apparition en France. Il faudra attendre 1979, pour que toute la France soit passée aux commutations automatiques. Dans les années 1950, s'achève le

[24] www.ratp.fr

déploiement du RTC à l'échelle du territoire national. En raison, du nombre d'abonnés croissant, le nombre de chiffres associés à chaque ligne ne cesse de croître. La numérotation à 10 chiffres est lancée en 1996.

2.5 Phase 2 : une nouvelle liberté de mouvements

Le premier véhicule automobile fonctionnel a été inventé en 1769 par Joseph Cugnot. Ce n'est qu'à partir de la révolution industrielle que les véhicules automobiles personnels se développent et prennent finalement leur nom actuel d'automobile. Deux facteurs vont contribuer à son développement. Premièrement, le revêtement progressif des routes en ville puis en campagne a facilité l'usage des bicyclettes et des voitures. Deuxièmement, le développement de nouvelles méthodes de production (taylorisme, fordisme) mènent à la première voiture de grande série, la Ford T en 1908. Elle pouvait rouler jusqu'à 70km/h. A la fin du XIXème siècle, de nombreux constructeurs automobiles voient le jour. Ainsi, en 1903 la France produit 30 204 voitures, soit 48,77 % de la production mondiale, et la France compte 21 523 voitures vers la fin de l'année 1905 (BULOZ, 1933).

La téléphonie mobile est fondée sur la radiotéléphonie. Elle permet la transmission de la voix à l'aide d'ondes radioélectriques. La voix est transmise entre un terminal mobile et un élément d'entrée du réseau (communément appelé une station de base). Les différents éléments du réseau se chargent alors d'acheminer la conversation vers le destinataire. Sur le principe du réseau commuté, se développe un nouveau réseau dont les voies d'acheminement de la parole ne sont plus des canaux filaires mais des canaux de propagation radio. Ainsi, le principe de téléphonie mobile naquit dans les années 1950 aux Etats-Unis. Les premiers réseaux nécessitaient l'allocation d'une fréquence par communication avec des secteurs géographiques larges (densité des abonnés très faible). Cependant, l'invention du terminal mobile adapté aux communications sur le réseau radio n'est attribué qu'en 1973 à Martin Cooper, alors ingénieur chez Motorola. Le premier modèle est développé par Motorola en 1983. Néanmoins, il est alors qualifié de trop encombrant pour être portable. En raison des progrès en miniaturisation des composants nécessaires pour conférer au téléphone son caractère portable, il faudra attendre l'année 1992 pour assister à la naissance du premier téléphone portable et non juste transportable. Celui-ci arrive sur le marché américain à un prix exorbitant. Bien que les spécifications de la norme GSM (Global System for Mobile Communication) datent de 1982, c'est à partir de 1995 que les mobiles connaissent le succès qu'on leur connait aujourd'hui. En effet, d'une part, des innovations successives sont apportées aux terminaux, les mobiles qui deviennent petits, performants et dotés de batterie efficace. D'autre part, le principe de fonctionnement actuel de réseaux cellulaires est inventé et permet un usage plus optimisé des fréquences de communications pour une augmentation très significative de la capacité des réseaux. Ces mobiles fonctionnent alors sur des réseaux de télécommunications de deuxième génération connus sous l'appellation 2G ou GSM. Ils fonctionnent dans un premier temps uniquement sur la bande 900MHz. Ce réseau a été conçu pour une transmission idéale des communications de type « voix » sur le principe d'un réseau

commuté comme le RTC. Cela signifie que les ressources ne sont allouées que pour la durée de la communication.

2.6 Phase 3 : Amélioration des performances de portée et de vitesse

A partir des années 1950, on observe des avancées techniques fulgurantes sur chacun des modes de transport. Des travaux sont mis en œuvre parallèlement sur le matériel roulant, les canaux de diffusion (routes, chemins de fer) et sur les techniques de génie civil. Ils partagent un objectif commun : augmenter la vitesse de déplacement. Dans cette course à la vitesse apparait un nouveau concurrent de l'automobile et du rail, l'avion. A partir de 1970, la vitesse commerciale réalisable en automobile, qui atteint celle des trains, entraine le déploiement d'un réseau autoroutier qui se densifiera au cours des années (voir Figure 59). En réaction, les technologies ferroviaires évoluent pour donner naissance aux Trains à Grande Vitesse (TGV). Le premier tronçon de Ligne Grande Vitesse (LGV) est inauguré en 1981 sur le tronçon Lyon-Paris. Il relie Paris à Lyon en 2 h 40, c'est-à-dire à une vitesse maximum sur la ligne de 260 km/h. Elle sera portée plus tard à 270km/h puis à 300 km/h. Le déploiement des LGV signe la fin du déploiement des lignes traditionnelles en 1980. Le réseau ferroviaire d'origine n'évoluera plus que par des suppressions de lignes, des rectifications de tracé pour accroître les vitesses, des doublements de lignes ou des électrifications de ligne (BONNEL, 2004). Actuellement, les vitesses de circulation sur les réseaux de transport ne sont pas ralenties par des problèmes techniques à proprement dit, mais plutôt par des réglementations qui garantissent la sécurité des usagers des réseaux ou réduisent les impacts environnementaux.

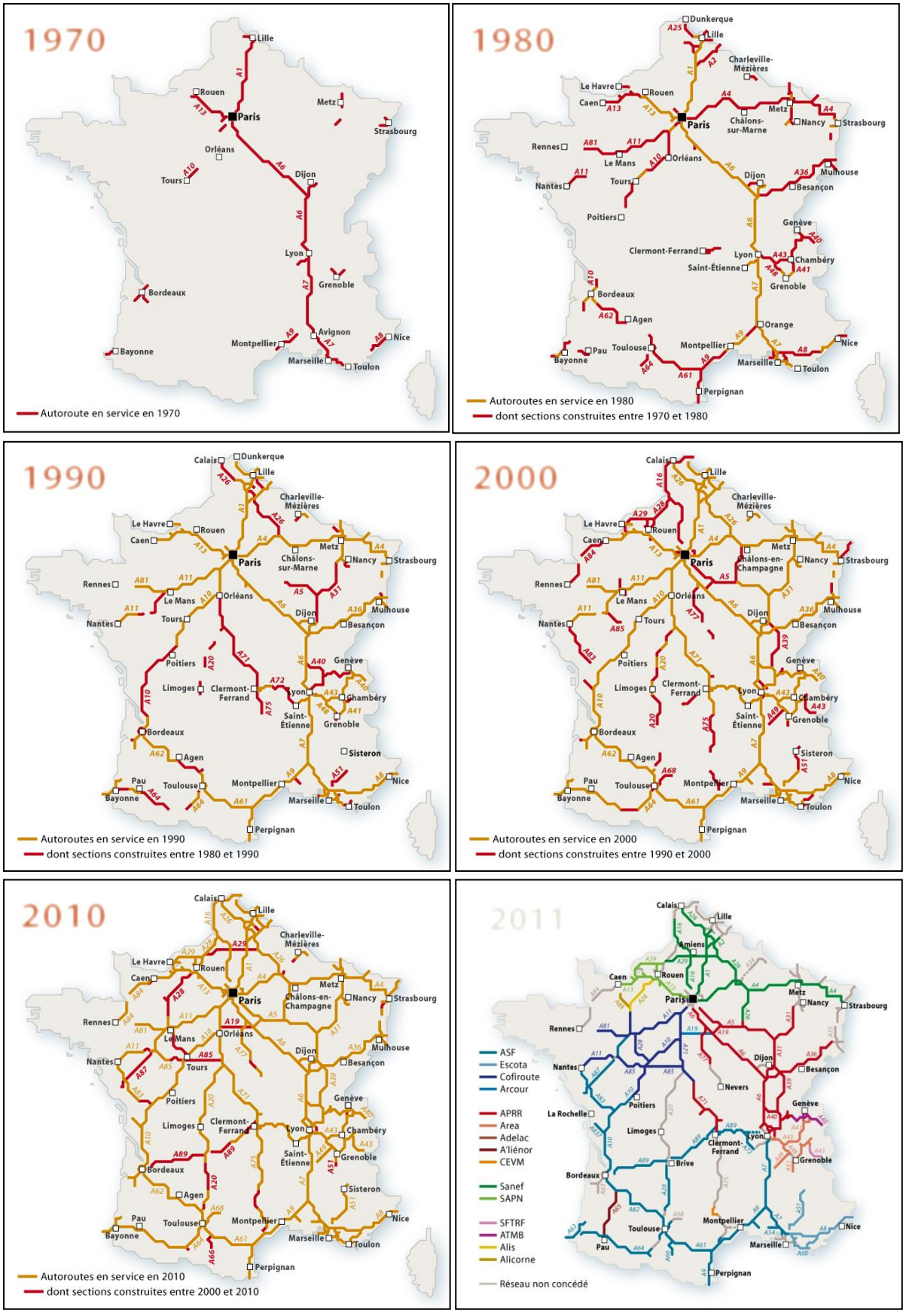

1970
Lille
Rouen
Paris
Metz
Strasbourg
Orléans
Tours
Dijon
Lyon
Grenoble
Bordeaux
Avignon
Nice
Montpellier
Marseille
Toulon
Bayonne
Autoroute en service en 1970
1980
Dunkerque
Lille
Charleville-Mézières
Le Havre
Rouen
Caen
Paris
Châlons-sur-Marne
Metz
Nancy
Strasbourg
Rennes
Le Mans
Orléans
Nantes
Tours
Dijon
Mulhouse
Besançon
Poitiers
Genève
Clermont-Ferrand
Lyon
Chambéry
Saint-Étienne
Grenoble
Bordeaux
Agen
Orange
Pau
Toulouse
Montpellier
Nice
Bayonne
Marseille
Toulon
Perpignan
Autoroutes en service en 1980
dont sections construites entre 1970 et 1980
1990
Calais
Dunkerque
Lille
Charleville-Mézières
Le Havre
Rouen
Caen
Paris
Châlons-sur-Marne
Metz
Nancy
Strasbourg
Rennes
Le Mans
Orléans
Dijon
Mulhouse
Besançon
Nantes
Tours
Poitiers
Genève
Limoges
Clermont-Ferrand
Lyon
Chambéry
Saint-Étienne
Grenoble
Bordeaux
Sisteron
Agen
Pau
Toulouse
Montpellier
Nice
Bayonne
Marseille
Toulon
Perpignan
Autoroutes en service en 1990
dont sections construites entre 1980 et 1990
2000
Calais
Lille
Charleville-Mézières
Le Havre
Rouen
Caen
Paris
Châlons-en-Champagne
Metz
Nancy
Strasbourg
Rennes
Le Mans
Orléans
Dijon
Mulhouse
Besançon
Nantes
Tours
Poitiers
Genève
Limoges
Clermont-Ferrand
Lyon
Chambéry
Saint-Étienne
Grenoble
Bordeaux
Sisteron
Agen
Pau
Toulouse
Montpellier
Nice
Bayonne
Marseille
Toulon
Perpignan
Autoroutes en service en 2000
dont sections construites entre 1990 et 2000
2010
Calais
Lille
Charleville-Mézières
Le Havre
Rouen
Caen
Paris
Châlons-en-Champagne
Metz
Nancy
Strasbourg
Rennes
Le Mans
Orléans
Dijon
Mulhouse
Besançon
Nantes
Tours
Poitiers
Genève
Limoges
Clermont-Ferrand
Lyon
Chambéry
Saint-Étienne
Grenoble
Bordeaux
Sisteron
Agen
Pau
Toulouse
Montpellier
Nice
Bayonne
Marseille
Toulon
Perpignan
Autoroutes en service en 2010
dont sections construites entre 2000 et 2010
2011
Calais
Lille
Amiens
Caen
Rouen
Paris
Metz
Nancy
Strasbourg
Rennes
Nevers
Nantes
Dijon
Besançon
Poitiers
La Rochelle
Genève
Limoges
Lyon
Clermont-Ferrand
Grenoble
Brive
Bordeaux
Toulouse
Montpellier
Nice
Pau
Marseille
Perpignan
ASF
Escota
Cofiroute
Arcour
APRR
Area
Adelac
A'liénor
CEVM
Sanef
SAPN
SFTRF
ATMB
Alis
Alicorne
Réseau non concédé

Figure 90 : les différentes phases de construction du réseau autoroutier français de 1970 à 2011 © Le Baron

Un besoin de vitesse comparable émerge sur les réseaux de télécommunications, surtout avec l'apparition du service de transport des données. Ainsi, le RTC passe à l'ère numérique avec le déploiement du RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Services) qui permet d'intégrer l'offre de différents services (voix, vidéo, données) sur un même réseau. Il évoluera en 1990 vers un réseau ATM (Asynchronous Transfer Mode) qui permet un transport sur de plus longues distances avec un débit plus important. A partir de 1996, ces réseaux filaires numériques migreront vers des technologies IP. Les réseaux mobiles suivent la même tendance pour intégrer le service d'échange de données. Des extensions de la 2G sont alors développées. Une variante du GSM appelée DCS (Digital Communication System) qui utilise la bande de fréquence 1800MHz apparait. La norme GSM est ainsi étendue aux normes GPRS (General Packet Radio Services) et EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) pour supporter des débits plus élevés. Les réseaux se scindent alors en deux circuits: le circuit voix et le circuit paquet qui permettent l'acheminement respectivement de la voix et celui des données transférées en « mode paquet ». Les modes GPRS et EDGE peuvent cohabiter avec le mode « voix commutée » du GSM traditionnel et utilisent les mêmes antennes et les mêmes bandes de fréquences. Ainsi, les téléphones mobiles permettent d'autres usages que la communication vocale et l'envoi de texte court (SMS Short Message Service). Depuis 2002, des services d'envoi de messages multimédias MMS (Multimedia Messaging Service) et d'accès au Web sont disponibles. La course aux débits entrainera le déploiement d'une troisième génération de réseaux qui permet un débit maximum théorique de données descendantes (vers le terminal mobile) de 1,9Mb/s. Il est nettement supérieur au débit proposé par la technologie EDGE de 384kb/s. Cette génération repose sur la norme UMTS (Universal Mobile Télécommunications System). Tout comme la technologie 2G, des extensions telles que la 3,5G et la 3,75G sont apparues permettant des débits de plus en plus élevés (jusqu'à 84Mb/s en 3,75G). Cela a permis notamment d'améliorer la qualité des appels en visiophonie. Grâce à sa vitesse accrue de transmission de données, l'UMTS ouvre la porte à des applications et services nouveaux. L'UMTS permet en particulier de transférer en temps réel des contenus multimédia tels que les images, le son et la vidéo. Initialement, on a pu croire que les nouveaux services concerneraient surtout l'aspect vidéo : visiophonie, MMS Vidéo, vidéo à la demande, télévision. Cependant, ces derniers dépendent fortement des performances des terminaux mobiles (qualité et taille de l'écran, qualité du son, etc.). Ainsi, la 3G a en fait été principalement colonisée par une utilisation de type Internet, et ce depuis l'explosion du marché des smartphones et des réseaux sociaux. La sortie de l'Iphone d'Apple en 2007 rencontre un succès planétaire et révolutionne l'utilisation de la téléphonie en tant que symbole de la convergence des médias (téléphone, internet, musique et vidéo). Depuis, le début de l'année 2013, une quatrième génération, aussi appelée LTE, est en déploiement sur le territoire national. Cette dernière technologie a permis, en plus d'accroître les débits, de réduire les coûts grâce à une technologie de réseau entièrement basée sur de l'IP et de combler les problèmes de détérioration de la qualité de service en situation de mobilité

observés en 3G. Des débits réels descendants ont été mesurés à 30Mb/s, c'est-à-dire de l'ordre d'une connexion fixe VDSL lorsque la longueur de la ligne est inférieure à 1km[25]. Le débit théorique annoncé par les opérateurs est de 100Mb/s pour la technologie LTE et supérieur à 1Gbit/s pour le LTE Advanced.

3 Une évolution des segments d'usagers

Ce paragraphe contient une documentation complémentaire des phases d'évolutions des segments des usagers des réseaux.

3.1 D'un segment de niche…

On distingue deux types de segmentations ; la segmentation spatiale induite et la segmentation sociale.

A ses débuts, le rail n'était accessible que par un faible groupe de personnes desservies. La Figure 91 représente le tracé des lignes de chemins de fer français en 1850. L'offre des chemins de fers se limitait à certaines agglomérations françaises sur des tronçons restreints. On notera que seules les grandes villes du nord et du centre sont connectées à la capitale. Le réseau RTC a connu le même type de segmentation géographique.

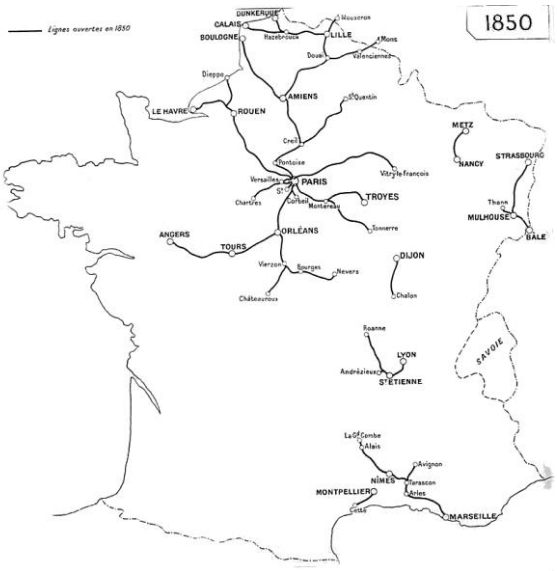


Figure 91 : Réseau férré français en 1850

Le routier et la téléphonie mobile ont segmenté leurs premiers usagers principalement par le coût du matériel roulant (automobile) et du terminal mobile. En effet, à l'inverse des chemins ferrés, les routes existaient au début de la commercialisation de la voiture. Pour la

[25] www.arcep.fr

téléphonie mobile dont la segmentation de niche des premiers clients est à imputer principalement au prix du terminal et minoritairement à la disponibilité du réseau.

3.2 … vers une distribution massive

L'offre proposée par le rail entre 1830 et 1914, en réponse à une demande massive est le reflet d'une nouvelle société. La possibilité d'accélérer les déplacements a permis un essor économique tel que certaines villes étaient remodelées autour des gares. Cette « civilisation du ferroviaire » dominante jusqu'à l'aube de la première guerre mondiale, a laissé sa place entre 1920 et 1960 à la « civilisation automobile ». Très rapidement, l'automobile s'impose comme l'un des principaux modes de transport des individus ou des marchandises. Ainsi, le secteur industriel de l'automobile est l'un des plus importants et des plus influents depuis 1945. En effet, le parc mondial s'élevait à 250 000 automobiles en 1907, 500 000 en 1914 avec l'apparition de la Ford T et 50 millions avant la Seconde Guerre mondiale. Ce parc automobile triple pendant les Trente Glorieuses et atteint les 300 millions de véhicules en 1975. En 2011, la production annuelle mondiale d'automobiles aurait atteint les 76 millions d'unités (BOUGHRIET, 2011). L'arrivée de l'automobile a été une révolution dans le domaine des transports. Ce mode est synonyme de liberté, permettant d'aller où on souhaite, quand on le souhaite, en s'affranchissant des contraintes temporelles et spatiales inhérentes à l'usage des transports en commun (BANOS, et al., 2010). On a alors observé des bouleversements sociaux, notamment dans le rapport des individus à l'espace car elle a favorisé le développement des échanges économiques et culturels. L'automobile est aujourd'hui diffusée en tant qu'objet grand public. Elle représente, à l'instar d'objets comme la télévision, le réfrigérateur ou le téléphone mobile, un équipement largement considéré comme indispensable dans les foyers des pays développés. En France, en 2009, plus de 80% des ménages possèdent au moins une voiture (voir Figure 92).

a)

Équipement automobile des ménages en %

	1980	1990	2000	2009 (p)
Ménages motorisés	70,8	76,8	80,3	83,2
Monomotorisés	54,3	50,5	50,7	47,5
Bimotorisés	14,8	23,0	25,4	30,5
Trimotorisés ou plus	1,7	3,3	4,2	5,2
Ménages non motorisés	29,2	23,2	19,7	16,8
Âge moyen du véhicule (en années)	...	5,9	7,3	8,0
Durée moyenne de détention (en années)	...	3,7	4,4	4,9
Voitures particulières d'occasion	...	50,0	56,1	59,6

Sources : CCFA ; Sofres ; Inrets-Ademe ; Insee ; SOeS.

b)

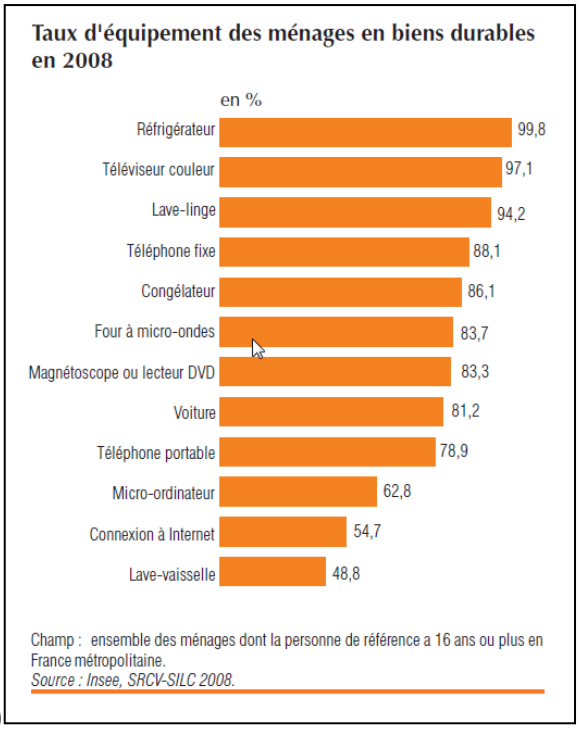


Figure 92 : évolution de l'équipement automobile des ménages de 1980 à 2009 (a) et taux d'équipement des ménages en biens durables en 2008 (b)

L'équivalent de la Ford T côté télécommunication est le Nokia 3210 qui fait son entrée sur le marché en 1995 et révolutionne le monde de la téléphonie mobile**.** Petit, performant et doté d'une batterie efficace, ce modèle connait immédiatement un succès planétaire. Ces innovations sont à l'origine du boom de la téléphonie mobile. En 2010, devant le succès des téléphones mobiles, commence une pénurie des numéros commençant par 06. On assiste au début de l'attribution de numéros en 07. Depuis l'apparition de la téléphonie mobile, il y a seulement une vingtaine d'années, le nombre de clients des services mobiles ne cesse d'augmenter. Au 31 mars 2012, le taux de pénétration des mobiles au niveau de la population nationale française (métropole et outre-mer) était de 106,5%[26]. Cela représente 66,8 millions de clients en France métropolitaine. Le mobile peut être considéré comme indispensable au quotidien des français.

[26] ARCEP, www.arcep.fr

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1: CORRELATION ENTRE LA DENSITE D'ANTENNES D'ORANGE ET LA DENSITE D'HABITATION A L'ECHELLE DE LA COMMUNE SUR LE DEPARTEMENT DE SEINE-ET-MARNE 22
FIGURE 2: EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DES SERVICES VOIX VIA LA TELEPHONIE MOBILE ET VIA LA TELEPHONIE FIXE ET DES SERVICES SMS DE PAR TRIMESTRES DE 2008 A 2014 (SYNTHESE DES « OBSERVATOIRE DES MARCHES DES COMMUNICATIONS ELECTRONIQUES EN FRANCE » PROPOSES PAR L'ARCEP) 26
FIGURE 3 : LE RESEAU AUTOROUTIER FRANÇAIS EN 2015. © THOMAS G 31
FIGURE 4 : LES ETAPES IMPORTANTES DE L'AUTOMATISATION DU METRO PARISIEN 43
FIGURE 5: SCHEMA DES COMPOSANTES D'UN EXEMPLE D'UNE CHAINE DOMICILE-TRAVAIL 55
FIGURE 6 : CARTE DU POTENTIEL D'ACCESSIBILITE DE LA VILLE DE BESANÇON (BANOS, ET AL., 2010) 56
FIGURE 7: EVOLUTION DE LA REPARTITION DES DEPLACEMENTS LOCAUX SELON LES MODES DE TRANSPORT. SYNTHESE DES ENQUETES NATIONALES TRANSPORT DE 1982, 1994 ET 2008 PAR (LE JEANNIC, 2010) 59
FIGURE 8: EQUIPEMENT AUTOMOBILE DES MENAGES DE 1982 A 2008. SYNTHESE DES ENQUETES NATIONALES TRANSPORT DE 1982, 1994 ET 2008 PAR (LE JEANNIC, 2010) 60
FIGURE 9: PART DES VELOS DANS LES MODES DE DEPLACEMENT DANS PLUSIEURS PAYS D'EUROPE (MINISTERIE VAN VERKEER, 2006) 63
FIGURE 10: TROIS APPROCHES POUR JUGER DE L'IMPORTANCE RELATIVE DES ACTIVITES (COUREL, ET AL., AVRIL 2005) 66
FIGURE 11: DISTRIBUTION DU TEMPS DE TRAJET DOMICILE-TRAVAIL DES ACTIFS DE PLUS DE 15 ANS SELON LES LIEUX DE RESIDENCE (COUREL, ET AL., AVRIL 2005) 68
FIGURE 12: CONFRONTATION DE LA DISTANCE DOMICILE-TRAVAIL ET LE TEMPS DE TRAJET DOMICILE-TRAVAIL (HUBERT, 2009) 71
FIGURE 13 **:** L'IMPACT DE LA CONSOLIDATION DES ACTIVITES POUR L'OPTIMISATION DES DEPLACEMENTS 77
FIGURE 14 : VALEURS DU TEMPS PAR MODE SELON LA DISTANCE POUR TOUS MOTIFS (EN EUROS/H) (QUINET, 2013) 99
FIGURE 15 : NOTION D'EQUILIBRE DANS UN SYSTEME DE TRANSPORT (LEURENT, 2006) 114
FIGURE 16 : REPRESENTATION DES INTERACTIONS ENTRE LES DIFFERENTS SOUS-SYSTEMES SELON LES FAMILLES DE MODELES (BONNEL, 2004). 118
FIGURE 17: FONCTIONS D'OFFRE (A) ET DE DEMANDE (B) EN TRANSPORT SELON MANHEIM (MANHEIM, 1984). 120
FIGURE 18 : ILLUSTRATION DE LA NOTION D'EQUILIBRE (A) ET DE LA NOTION DE DEPLACEMENT DE L'EQUILIBRE EN CAS DE MODIFICATIONS DU SYSTEME DE TRANSPORT (B) 121
FIGURE 19 : ETAPES DE GENERATION ET DISTRIBUTION DES DEPLACEMENTS DANS LA MODELISATION A 4 ETAPES (BONNEL, 2004) 127
FIGURE 20 : LES TROIS REPRESENTATIONS DU DIAGRAMME FONDAMENTAL (BUISSON, ET AL., 2010) 138
FIGURE 21 : SYNTHESE DE LA CHRONOLOGIE DES ETAPES DE MISE EN PLACE DES RESEAUX DE TRANSPORTS SOUS L'ANGLE DE LA SEGMENTATION DE LA DEMANDE, LE LA GOUVERNANCE, DE L'EXPLOITATION ET DE LA MODELISATION 142
FIGURE 22 : SYNTHESE DE LA CHRONOLOGIE DES ETAPES DE MISE EN PLACE DES RESEAUX DE TRANSPORTS SOUS L'ANGLE DES AVANCEES TECHNIQUES 143
FIGURE 23 : SCHEMA DES INFORMATIONS FOURNIES PAR LES EMD 151
FIGURE 24 : REPRESENTATION DES ELEMENTS OBSERVES LORS D'UNE ENQUETE CORDON 153
FIGURE 25 : POINTS DE COLLECTE DE DONNEES DISPONIBLES DANS UN RESEAU DE TELECOMMUNICATIONS MOBILES AU TRAVERS D'UNE REPRESENTATION FONCTIONNELLE SIMPLIFIEE 161
FIGURE 26 : PRINCIPE DU FMD 168
FIGURE 27 : ARCHITECTURE SIMPLIFIEE D'UN PLMN EQUIPE DES TECHNOLOGIES 2G ET 3G 173
FIGURE 28 : REPRESENTATION SIMPLIFIEE DES SUPERPOSITIONS EN COUCHE MOBILES EN SUPPOSANT DES ANTENNES ISOTROPES 176
FIGURE 29 : DISPONIBILITE DES SONDES SUR LES INTERFACES A ET GB DU RESEAU MOBILE OPERE PAR ORANGE A L'ECHELLE DE LA FRANCE EN 2011 - SOURCE INTERNE ORANGE 186
FIGURE 30: TRACE DES LIGNES A (A) ET B (B) DU RER (AUTEUR BENOIR MORTAGT) 194
FIGURE 31: EVOLUTIONS DU NOMBRE DE VOYAGES EFFECTUES UN JOUR OUVRABLE EN BLEU ET EN FIN DE SEMAINE EN ROUGE (LES VOLUMES DE TRAFIC DU SAMEDI ET DU DIMANCHE SONT CUMULES) DE 1999 A 2008 D'APRES UN RECENSEMENT RATP. 196

FIGURE 32 : CHAMP REÇU PAR UN MOBILE PRESENT A BORD D'UNE RAME DE RER PARCOURANT LA LIGNE A DE VINCENNES VERS AUBER EN HEURE CREUSE 199
FIGURE 33 : CORRELATION ENTRE LE CHAMP REÇU PAR UN MOBILE ET LE DECLENCHEMENT D'EVENEMENTS LAUN PAR L'ENSEMBLE DES MOBILES CONNECTES AU NIVEAU DE LA CELLULE QUI COUVRE LA STATION VINCENNES (DBM +100) 200
FIGURE 34 : CORRELATION ENTRE LE CHAMP REÇU PAR UN MOBILE ET LE DECLENCHEMENT D'EVENEMENTS LAUN PAR L'ENSEMBLE DES MOBILES CONNECTES AU NIVEAU DES CELLULES QUI COUVRENT LA STATION CHATELET (DBM +100) 201
FIGURE 35 : SCHEMA SIMPLIFIE DE LA CONFIGURATION DES TRAJETS REALISABLES PAR LES USAGERS DE LA LIGNE A 206
FIGURE 36 : DISTRIBUTION PAR TRANCHE DE 30 MINUTES DES VALIDATIONS SUR L'ENSEMBLE DES STATIONS DU TRONÇON CENTRAL OBTENUES A PARTIR DES DONNEES BILLETTIQUE 208
FIGURE 37 : DISTRIBUTION DES **LAUN** PAR TRANCHE DE 30 MINUTES SUR LE TRONÇON CENTRAL A PARTIR DES DONNEES DU 7 AVRIL 2011 209
FIGURE 38 : DISTRIBUTION DES LAUN COLLECTES SELON LES STATIONS DU TRONÇON CENTRAL 211
FIGURE 39 : EVOLUTION DE LA DISTRIBUTION DES LAUN PARMI LES STATIONS DU TRONÇON CENTRAL AU COURS DE LA JOURNEE DU 7 AVRIL 2011 212
FIGURE 40 : DISTRIBUTION DE LA REPETITION DES EVENEMENTS AU NIVEAU D'UNE STATION 213
FIGURE 41: DISTRIBUTION DES DISTANCES TEMPORELLES INTER-EVENEMENTS POUR DIFFERENTES STATIONS ... 214
FIGURE 42 : TRAJECTOIRES DE TAILLE 2 ENTRE VINCENNES ET NATION A L'ECHELLE DE LA JOURNEE 217
FIGURE 43 : TRAJECTOIRES DE TAILLE 2 ENTRE VINCENNES ET NATION ENTRE 8H ET 9H LE 7 AVRIL 2011 218
FIGURE 44 : TRAJECTOIRES DE TAILLE 6 (A) ET TRAJECTOIRES DE TAILLE 3 (B) 219
FIGURE 45: DENSITE D'EVENEMENTS POUR DES TRAJECTOIRES DE TAILLE 2 ENTRE VINCENNES ET NATION ENTRE 8H ET 9H LE 7 AVRIL 2011 220
FIGURE 46 : VARIATION DE $P_{95}(S)$ POUR DIFFERENTES STATIONS LE MATIN POUR UN PARCOURS DE LA LIGNE D'EST EN OUEST (A) ET LE SOIR POUR UN PARCOURS D'OUEST EN EST 222
FIGURE 47 : SIMULATION DE LA COUVERTURE RADIO (2G 900MHZ) A 50M AUTOUR DE LA PARTIE AERIENNE DE LA STATION NATION 223
FIGURE 48 : DISTRIBUTION DU TEMPS DE TRAJET DE NATION VERS AUBER PENDANT L'HEURE DE POINTE DU MATIN (A) ET DISTRIBUTION DU TEMPS D'ARRET DU TRAIN A QUAI SUR UNE JOURNEE POUR 5 STATIONS SUR TRONÇON CENTRAL DU RERA 225
FIGURE 49 : ESTIMATION DU TAUX DE CHARGE DES TRAINS CIRCULANT DE VINCENNES VERS CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE PENDANT L'HEURE DE POINTE DU MATIN LE 7 AVRIL 2011 228
FIGURE 50 : DENSITE DE RETARD CUMULE SUR LE TRAJET ENTRE VINCENNES ET CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE SUR LA JOURNEE DU 7 AVRIL 2011 229
FIGURE 51: DEBIT DE COLLECTE DES DONNEES DE SIGNALISATION ET DES DONNEES DE BILLETTIQUES PAR STATION 231
FIGURE 52 : DISTRIBUTION DES TEMPS DE PARCOURS PAR TRANCHE DE 30 MINUTES 233
FIGURE 53 : RESULTAT D'UNE SIMULATION DE TEMPS DE PARCOURS POUR UN TRAJET DE NATION VERS AUBER UN JEUDI MATIN (06/03/14) REALISEE SUR LE SITE DE L'OPERATEUR RATP 234
FIGURE 54 : RESULTAT D'UNE SIMULATION DE TEMPS DE PARCOURS POUR UN TRAJET DE VINCENNES VERS CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE UN JEUDI MATIN (06/03/14) REALISEE SUR LE SITE DE L'OPERATEUR RATP 235
FIGURE 55 : SIMULATION DE LA COUVERTURE RADIO (2G 900MHZ) A 50M AUTOUR DE LA PARTIE AERIENNE DE LA STATION LA DEFENSE (AU CENTRE) 236
FIGURE 56 : ESTIMATION DU FLUX DE VOYAGEURS A DESTINATION DE LA DEFENSE POUR DIFFERENTES ORIGINES DE LA LIGNE A PENDANT LA MATINEE DU 13/10/2011 A PARTIR DES DONNEES BILLETTIQUE ET DES DONNEES DE SIGNALISATION 239
FIGURE 57 : ESTIMATION DU TAUX DE CHARGE DES TRAINS CIRCULANT ENTRE LES STATIONS VINCENNES ET CHARLES-DE-GAULLE-ETOILE PENDANT LA MONTEE EN CHARGE MATINALE LE 7 AVRIL 2011. 257
FIGURE 58 : DISTRIBUTION DES TEMPS DE PARCOURS POUR LES MOBILES DU SOUS-ENSEMBLE M1_S ET DU SOUS-ENSEMBLE RER_S EN PROPORTION DE L'ENSEMBLE DES MOBILES 260
FIGURE 59 : DISTRIBUTION DES TEMPS DE PARCOURS POUR LES MOBILES ASSOCIES A CHACUNE DES LIGNES (M1 ET RER A). 261
FIGURE 60 : PROPORTION DES MOBILES ASSIGNES A LA LIGNE 1 PARMI TOUS LES MOBILES DE TN,D SELON L'HEURE D'ARRIVEE A LA DEFENSE DE 7H30 A 10H00 LE 13 OCTOBRE 2011. 262
FIGURE 61 : EVOLUTION DU TEMPS DE TRAJET MOYEN POUR VOYAGER DE NATION VERS LA DEFENSE EN RERA SELON L'HEURE D'ARRIVEE A DESTINATION. 263

FIGURE 62 : EVOLUTION DE LA MONTEE EN CHARGE DU NOMBRE DE TRAJECTOIRES NATION-LA DEFENSE CAPTUREE SELON L'HEURE D'ARRIVEE A LA DEFENSE. 264
FIGURE 63 : VARIATION DE BN PENDANT LA PERIODE DE POINTE DU MATIN LE 13 OCTOBRE 2011 SELON L'HEURE D'ARRIVEE A LA DEFENSE 266
FIGURE 64 : VARIETES DES PAYSAGES EN SEINE-ET-MARNE. A) VUE AERIENNE D'UNE PARTIE DU COMPLEXE DE LOISIRS DISNEYLAND PARIS. B) CHAMP DE BLE EN SEINE-ET-MARNE, PRES DE SAINT-FARGEAU-PONTHIERRY. 269
FIGURE 65 : GEOGRAPHIE DE LA SEINE-ET-MARNE. A) POSITION DU DEPARTEMENT DANS LA REGION ILE-DE-FRANCE. B) RESEAU DE TRANSPORT PRINCIPAL EN ILE-DE-FRANCE ET POSITION DU CENTRE COMMERCIAL DE VAL D'EUROPE ET DE DISNEYLAND PARIS. 271
FIGURE 66: POSITION DES SITES CONSTITUANT LES PERIMETRES D'ETUDE AUTOUR DU CENTRE COMMERCIAL DE VAL D'EUROPE ET DU PARC DISNEY 272
FIGURE 67 : CORRELATIONS ENTRE LE « TERRITOIRE GEOGRAPHIQUE » DE SEINE-ET-MARNE ET L'ACTIVITE DES MOBILES SUR LE « TERRITOIRE MOBILE » DE SEINE-ET-MARNE LE 22 DECEMBRE 2012. A) CARTE DE DENSITE DE POPULATION DU DEPARTEMENT. B) CARTE DE DENSITE D'EVENEMENTS SUR UN DIAGRAMME DE VORONOÏ DES CELLULES. 273
FIGURE 68 : DISTRIBUTION DE LA DUREE DE PRESENCE ESTIMEE SUR LE CENTRE COMMERCIAL DE VAL D'EUROPE A PARTIR DES DONNEES DE SIGNALISATION COLLECTEES LE 22 DECEMBRE 2012 275
FIGURE 69 : DISTRIBUTION A LA JOURNEE DU NOMBRE DE MOBILES CAPTES AU NIVEAU DU CENTRE COMMERCIAL A PARTIR DES DONNEES DE SIGNALISATION COLLECTEES LE 22 DECEMBRE 2012 276
FIGURE 70 : DEBITS ESTIMES D'ENTREE ET DE SORTIE DU CENTRE COMMERCIAL A PARTIR DES DONNEES DE SIGNALISATION COLLECTEES LE 22 DECEMBRE 2012. 276
FIGURE 71 : CARTE DE DENSITE DES TRAJECTOIRES DES MOBILES QUI ONT ETE DETECTES SUR LE CENTRE AU MOINS UNE FOIS. 277
FIGURE 72 : CARTE DES TEMPS D'ACCES MINIMAL VERS LE CENTRE COMMERCIAL. 278
FIGURE 73 : PERIMETRE « DISNEY CŒUR » REPRESENTE PAR UNE CARTE DE COUVERTURE DES SERVEUSES PRINCIPALE 2G-900MHZ. 281
FIGURE 74 : DISTRIBUTION DU TEMPS DE PRESENCE ESTIME DES MOBILES SUR LE PERIMETRE « DISNEY CŒUR ». A) DISTRIBUTION DU TEMPS DE PRESENCE PAR TRANCHE D'HEURES. B) DISTRIBUTION DU TEMPS DE PRESENCE DES MOBILES PRESENTS MOINS D'UNE HEURE SUR LE PERIMETRE PAR TRANCHE DE MINUTES. 282
FIGURE 75 : CARTE DE COUVERTURE DES SERVEUSES PRINCIPALE 2G-900MHZ SUR LE PERIMETRE « DISNEY CŒUR ». 284
FIGURE 76 : DISTRIBUTION DES EVENEMENTS INTER-TECHNOLOGIES PARMI TOUS LES EVENEMENTS DECLENCHES AU NIVEAU DES SITES DU PERIMETRE « DISNEY CŒUR » LE 22 DECEMBRE 2012 288
FIGURE 77 : DISTRIBUTION DES CHANGEMENTS INTRA-TECHNOLOGIES PARMI TOUTES LES PAIRES D'EVENEMENTS SUCCESSIFS DECLENCHES AU NIVEAU DES SITES DU PERIMETRE « DISNEY CŒUR » LE 22 DECEMBRE 2012. 290
FIGURE 78 : CARTE DE L'EMPLACEMENT APPROXIMATIF DES SITES 2G CONSTITUANT LE PERIMETRE MOBILE DE L'ETUDE ET REGROUPES PAR ZONES DE LOCALISATION (UNE COULEUR PAR ZONE DE LOCALISATION). 296
FIGURE 79 : DISTRIBUTION DU TYPE D'EVENEMENTS DE L'ENSEMBLE DE DONNEES DU « TERRITOIRE MOBILE COMPLET » LE 22 DECEMBRE 2012. 297
FIGURE 80 : REPRESENTATION SUR DEUX AXES DE L'ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES TYPES D'EVENEMENT PAR CELLULES. 299
FIGURE 81 : DISTRIBUTION DU NOMBRE DE MOBILES EN FONCTION DU NOMBRE D'EVENEMENTS GENERES PAR CES MOBILES LE 22 DECEMBRE 2012. 301
FIGURE 82 : DISTRIBUTION DES MOBILES SELON L'ECART TEMPOREL ENTRE DEUX EVENEMENTS CONSECUTIFS. 302
FIGURE 83 : DISTRIBUTION DU NOMBRE DE MOBILES ET DE LA PORTEE DE LEUR TRAJECTOIRE MOBILE EN FONCTION DU NOMBRE DE COMMUNICATIONS EMISES. 303
FIGURE 84 : PROJECTION SUR UN DIAGRAMME DE VORONOÏ DE L'INDICE D'IMMOBILITE. 305
FIGURE 85 : SCHEMATISATION DES ETAPES PRINCIPALES DU REDRESSEMENT. 309
FIGURE 86 : SCHEMATISATION DES ETAPES INTERMEDIAIRES DE LA DEUXIEME ETAPE DU REDRESSEMENT. 314
FIGURE 87 : SCHEMA DES INTRICATIONS ENTRE LES RESEAUX DE TRANSPORT ET LES RESEAUX MOBILES. 315
FIGURE 88 : DEVELOPPEMENT DES RESEAUX FERRES EN FRANCE DE 1850 A 1930 342
FIGURE 89 : DEVELOPPEMENT DU RESEAU METLOPOLIOTAIN DE PARIS DE 1900 A 2010 343
FIGURE 90 : LES DIFFERENTES PHASES DE CONSTRUCTION DU RESEAU AUTOROUTIER FRANÇAIS DE 1970 A 2011 © LE BARON 347
FIGURE 91 : RESEAU FERRE FRANÇAIS EN 1850 348

FIGURE 92 : EVOLUTION DE L'EQUIPEMENT AUTOMOBILE DES MENAGES DE 1980 A 2009 (A) ET TAUX D'EQUIPEMENT DES MENAGES EN BIENS DURABLES EN 2008 (B)..... 350