



HAL
open science

Efficacité énergétique des systèmes de transports urbains en IDF : jusqu'à quelle valeur densifier ?

Michel Lamboley

► **To cite this version:**

Michel Lamboley. Efficacité énergétique des systèmes de transports urbains en IDF : jusqu'à quelle valeur densifier ?. Géographie. Université Gustave Eiffel, 2023. Français. NNT : 2023UEFL2046 . tel-04413960

HAL Id: tel-04413960

<https://theses.hal.science/tel-04413960v1>

Submitted on 24 Jan 2024

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

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



Université de Marne-La-Vallée

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Marne-La-Vallée

Spécialité :

Transport

Présentée et soutenue publiquement par

Michel Lamboley

Le 05/09/2023

Efficacité énergétique des systèmes de transports urbains en IDF : Jusqu'à quelle valeur
densifier ?

Energy efficiency of the urban transport in Paris and the surrounding area: up to what value
densify?

Directeur de thèse

Olivier Bonin

Jury :

Mme Elodie Castex, professeur des universités Lille 1

M Laurent Chapelon, professeur des universités Montpellier 3

Mme Liu Liu, maitresse de conférences, Cergy pontoise.

M Jean Pierre Nicolas, directeur de recherche ENTPE

© UMLV

*Pour soulever un poids si lourd,
Sisyphé, il faudrait ton courage !
Bien qu'on ait du cœur à l'ouvrage,
L'Art est long et le Temps est court*
Baudelaire, les fleurs du mal, le guignon 1857

A mes parents

A Martine.

Remerciements

Mes remerciements vont particulièrement à MM Bonin Olivier, Laterrasse Jean et Salini Patrice dont l'aide à divers degré m'a permis d'entreprendre et de rédiger cette thèse. La longueur de mes remerciements est inversement proportionnelle à ma sincère reconnaissance...

Résumé

Nous travaillons sur une limite de densité avec la construction d'un modèle d'évaluation de la densification à proximité des stations, pour mettre en œuvre une ligne de métro efficace énergétiquement vis à vis de la voiture (VP). Nous vérifions en premier si le TC (Transport en Commun) est plus efficace que la voiture dans le temps selon un découpage en couronnes concentriques de la région IDF. Deux éléments composent l'efficacité énergétique du voyageur. La consommation spécifique et le taux de remplissage. Le premier élément dépend du progrès technique, le second du trafic. Selon ces deux variables nous examinons l'évolution des efficacités du TC et de la voiture et nuancions selon les espaces et les jours l'assertion de plus grande efficacité du TC vis-à-vis de la VP. Néanmoins, un voyageur n'est pas un habitant. Aussi il nous faut déterminer comment cette évolution des efficacités énergétiques des voyageurs a modifié celle des habitants ce qui invite à mettre en œuvre une méthode multi-échelle de mesure de l'efficacité énergétique du déplacement, intégrant les parts modales et les portées, à partir des mesures de mobilités des enquêtes globales transport. Nous montrons une variation de l'efficacité énergétique du déplacement selon un découpage territorial administratif de l'Enquête Globale Transport (les secteurs EGT). Nous étudions alors si la forme urbaine modifie l'efficacité énergétique. Nous observons que la hausse de l'efficacité énergétique des milieux denses en région IDF dépend des parts modales. Néanmoins, ce n'est pas la densité qui explique cette hausse mais la concentration d'activité au travers de sa relation avec la différence des temps de transport des modes motorisés. L'absence de lien entre densités et parts modales interroge alors la pertinence de la densification à proximité des stations de TC pour augmenter le trafic. Nous faisons alors l'hypothèse d'une relation entre trafic et concentration d'habitants pour une part modale donnée. Ensuite, nous construisons notre modèle en lien avec l'aménagement actuel du territoire en IDF et au besoin de densification auprès des gares. Nous définissons un potentiel de densité à partir de l'efficacité énergétique de voyageurs des lignes du réseau ferré au parisien. Nous déterminons alors des valeurs de l'indicateur.

Mot clef : consommations unitaires, charge moyenne, densité, parts modales, forme urbaine.

Abstract

We are working on a density limit with the construction of a densification evaluation model near the stations to implement an energy efficient metro line with respect to the car (VP). We first check if the TC (Public Transport) is more efficient than the car in time according to a concentric cutting of the IDF region Specific consumption and fill rate. The first element depends on technical progress the second of traffic. According to these two variables we examine the evolution of the efficiencies of the TC and the Car and cloud according to the spaces and the days the assertion of greater effectiveness of the TC vis-à-vis the VP. Nevertheless, a traveller is not a resident. We must therefore determine how this change in passenger energy efficiency has changed that of the inhabitants, which calls for the implementation of a multi-scale method for measuring the energy efficiency of travel, integrating modal shares and ranges, from the mobility measures of the global Transport surveys. We show a variation in the energy efficiency of displacement according to an administrative territorial division of the Global Transport Survey (the EGT sectors). We then study whether the urban form changes energy efficiency. We observe that increasing the energy efficiency of dense environments in IDF regions depends on modal shares. Nevertheless, it is not the density that explains this increase but the concentration of activity through its relationship with the difference in transport times of the motorized modes. The absence of a link between density and modal shares thus questions the relevance of densification in the vicinity of TC stations to increase traffic. We then assume a relationship between traffic and concentration of inhabitants for a given modal share. Then we build our model in line with the current land use planning in IDF and the need for densification at stations. We define a density potential based on the energy efficiency of passengers on the lines of the rail network in Paris. We then determine values for the indicator.

Keywords: Convergence, Unitarian consumption, average load, density, modal parts, urban form

Contenu

Introduction : La relation entre densité brute et l'efficacité énergétique justifie-t-elle les politiques densification autour d'une ligne de TC ?	12
<i>Contexte</i>	12
<i>Problématique</i>	14
<i>Question de recherche</i>	15
<i>Méthodologie</i>	17
Partie 1 : Efficacité énergétique comparée des TC et le la VP en Ile-de-France	19
<i>Introduction ; de l'approche réticulaire à l'approche aréolaire</i>	19
Section 1 : vers une égalité des efficacités énergétiques des voyageurs des modes urbains ?	23
<i>Introduction</i>	23
Chapitre 1 : consommations unitaires (voyageur.km) TC et VP : définition des concepts et facteurs explicatifs	24
<i>Introduction : consommation unitaire et convergence : du réseau à l'espace</i>	24
1) <i>Cadre spatial et énergétique des réseaux de transport en IDF</i>	25
1-1) <i>Cadre spatial</i>	25
1-2) <i>Les sources d'énergies des systèmes de transport en IDF</i>	33
1-3) <i>La mesure de l'énergie</i>	40
2) <i>L'efficacité énergétique du transport de voyageur : la consommation unitaire réticulaire</i>	47
2-1) <i>Définition</i>	47
2-2) <i>Taux de remplissage et d'occupation</i>	49
2-3) <i>La consommation spécifique</i>	61
3) <i>La vitesse comme facteur de variation réticulaire des consommations spécifiques</i>	81
3-1) <i>La vitesse réticulaire</i>	81
3-2) <i>Vitesse de circulation et fluidité ;</i>	83
3-3) <i>Calcul des vitesses réticulaires des réseaux routiers en IDF</i>	85
3-4) <i>La vitesse des lignes TC RATP</i>	86
3-5) <i>Vitesse et variation des consommations spécifiques</i>	88
3-6) <i>Consommation spécifique : l'effet spatial</i>	89
4) <i>Conclusion</i>	90
Chapitre 2 : Mise-en-évidence de la convergence des consommations unitaires TC et VP (voyageur.km) en Ile-de-France	91
<i>Introduction</i>	91
1) <i>Elément de méthodes modèles versus empirisme</i>	92
1-1) <i>Les modèles énergétiques</i>	92
1-2) <i>La méthode empirique</i>	93
1-3) <i>L'approche quantitative : l'exemple du taux d'occupation</i>	93
2) <i>Consommations unitaires moyennes VP en IDF selon les secteurs</i>	95
2-1) <i>Calcul de la consommation réticulaire</i>	95
2-2) <i>Calcul des consommations VP par secteur</i>	99
3) <i>Consommation unitaire TC</i>	105
3-1) <i>Calcul de la consommation réticulaire</i>	105
3-2) <i>Calcul des efficacités énergétiques par secteur</i>	109
4) <i>Convergence des consommations unitaires en IDF</i>	112
4-1) <i>L'indice de convergence</i>	112
4-2) <i>Convergence moyenne par modes en IDF</i>	113
4-3) <i>Variation de l'indice de convergence selon les jours</i>	113
4-4) <i>Variation selon les couronnes et les jours</i>	114
4-5) <i>Discussion des résultats</i>	115
5) <i>Conclusion : des facteurs croisés</i>	116
Conclusion section 1 :	117
Section 2 Quels effets des variations de l'efficacité énergétique des voyageurs sur l'efficacité énergétique des habitants ?	119

<i>Introduction</i>	119
Chapitre 3 : Comment passer des consommations unitaires (voyageur.km) aux consommations spatiales par habitant ? Application à l'Ile-de-France selon l'enquête ménages déplacements	121
<i>Introduction</i> :	121
1) <i>La mobilité quotidienne en IDF</i>	123
1-1) Mesure de la mobilité des enquêtes EGT en IDF	123
1-2) Les parts modales	127
1-3) Le TC un mode spécialisé	128
1-4) La VP un mode non spécialisé	131
1-5) La distance du déplacement	134
1-6) Les temps du déplacement	137
1-7) Les « pseudo-vitesses » spatiales	139
1-8) Pseudo vitesse et vitesse de circulation où l'existence de deux espaces disjoints	142
2) <i>La consommation par habitant comme problème</i>	144
2-1) La reconstitution des consommations par les trafics	144
2-2) Pertinence et limite de l'approche combinée à grande échelle	148
2-3) Vers une extension de la méthode	154
3) <i>Conclusion</i>	156
Chapitre 4 Efficacité énergétique spatiale des habitants et des territoires et convergence dans les secteurs	157
<i>Introduction</i> ;	157
1) <i>Consommation du déplacement d'un habitant ou du territoire : une proposition</i>	158
1-1) Consommation d'un habitant	158
1-2) Evaluation de l'indicateur sur la base UITP	158
1-3) Consommation par déplacement sans chaînage dans les secteurs EGT	160
2) <i>La question du chaînage des voyages</i>	161
2-1) Du déplacement chaîné au déplacement à voyage chaîné sur la base UITP	161
2-2) Estimation de la consommation du chaînage d'un TC en IDF	163
3) <i>Variation de la consommation par déplacement</i>	165
3-1) Consommation domicile travail	165
3-2) En fonction des jours 2008	166
3-3) Consommation par déplacement des secteurs	167
3-4) Convergence et consommation par déplacement selon les couronnes en jour ouvrable	168
3-5) discussion des résultats	169
4) <i>Conclusion</i> :	170
Conclusion section 2	171
Conclusion partie 1: Vers une relation efficacité énergétique spatialisée et densités des habitants des secteurs EGT	173
Partie 2: Densification des territoires milieu urbain et efficacité énergétique des lignes du réseau fer de TC : une proposition	175
<i>Introduction</i>	175
Section 1 : La densité est-elle en relation avec les consommations d'énergie par habitant liées au transport ?	179
<i>Introduction</i>	179
Chapitre 5 : L'organisation spatiale de l'Ile-de-France explique-t-elle la relation entre densité de population et efficacité énergétique ? ..	181
<i>Introduction : Une relation débattue</i>	181
1) <i>Forme urbaine monocentrique et efficacité énergétique</i>	183
1-1) Formes urbaines et flux	183
1-2) Modèles monocentrique et polycentrique	184
1-3) Relation avec les variables de l'efficacité énergétique	192
1-4) Quelles relations entre espace aréolaire et réticulaire ?	198
1-5) Conclusion : une relation discutable	204
2) <i>Une forme mono-polycentrique en IDF</i>	204
2-1) Une forme « mono-polycentrique » en IDF	204
2-2) L'interaction réticulo-spatiale	215
2-3) Conclusion de la revue de littérature	224

3) Relation densité efficacité énergétique dans une forme mono-polycentrique en IDF.	224
3-1) Une causalité densité consommation par habitant remise en cause : la base UITP.	224
3-2) Forme monocentrique et effet rebond en IDF.	225
3-3) Densité et consommation du déplacement un phénomène reproduit en IDF.	229
4) Conclusion : des résultats qui interrogent.	234
Chapitre 6 : La densité entraîne-t-elle une modification des parts modales TC ? Une approche par les coûts généralisés du modèle GLOBAL.	236
Introduction.	236
1) Élément de méthode : les coûts généralisés du modèle GLOBAL.	237
1-1) Les modèles 4 étapes.	237
1-2) Les coûts généralisés utilisés.	243
1-3) Conclusion :	249
2) Parts modales et différence de coûts généralisés dans les secteurs EGT.	250
2-1) Méthode de transposition des coûts généralisés dans les secteurs EGT.	250
2-2) Calcul de la valeur du temps.	250
2-3) Calcul des coûts du temps par secteur.	253
2-4) Les coûts d'usage VP.	254
2-5) Calcul des coûts d'usage du TC par secteur.	257
2-6) Les hypothèses vérifiées dans les secteurs.	261
3) Effet induit et direct des concentrations d'activité sur les variables du temps.	263
3-1) La relation densité part modale comme problème théorique.	263
3-2) Les facteurs réticulaires du temps.	267
3-3) Taux de motorisation et écart de temps.	276
3-4) L'effet d'échelle et interaction spatiale-réticulaire.	278
3-5) L'effet du maillage sur la spécialisation du TC.	280
4) Conclusion : la relation concentration d'activité choix modal comme interaction spatiale-réticulaire.	284
Conclusion section 1 : quel effet de la densification sur le trafic ?.	286
Section 2 : Quel impact d'une densification sur le système de TC ? Réciproquement, quel impact de l'offre TC sur une possible densification, à proximité des stations, efficace énergétiquement ?.	288
Introduction :	288
Chapitre 7 : Les TC comme outil d'aménagement de l'espace : accessibilité et développement territorial selon l'offre de transport.	290
Introduction :	290
1) L'aménagement local comme problème complexe.	292
1-1) Le TOD.	292
1-2) Le projet d'aménagement en IDF : un exemple du TOD ?.	294
1-3) La méthode node place.	296
2) La marche à pied comme marque de la proximité spatiale à l'échelle réticulaire.	300
2-1) La proximité du réseau comme point de convergence des projets d'aménagement en IDF.	300
2-2) L'accessibilité.	300
2-3) Accessibilité et chaîne de déplacement.	301
2-4) La marche à pied comme effet de la proximité dans le réseau.	304
3) La question de l'offre.	305
3-1) Trafic et offre.	305
3-2) La question de la saturation.	307
3-3) Le taux minimum de remplissage des modèles énergétiques.	311
3-4) Spécificités du réseau ferré.	312
4) Conclusion de l'état de l'art.	314
Chapitre 8 : Effet des densités d'habitants sur le trafic autour des stations : une étude à Paris.	316
Introduction.	316
1) Méthode.	318
1-1) L'hypothèse de recherche.	318
1-2) Un mode le réseau ferré parisien RATP.	319

1-3) Un motif spécifique le trajet domicile travail.....	319
1-4) Les données	319
2) <i>Vérification de l'hypothèse</i>	320
2-1) La matrice de répartition.....	320
2-2) Les parts de trafic à pied dans les stations.	320
2-3) La variation des parts de marche à l'entrée des stations pour le motif domicile travail.	321
2-4) La variation des motifs de trafic	322
2-5) Répartition des correspondances par station dans la matrice de répartition.	322
2-6) Des hypothèses vérifiées	323
3) <i>Maillage et densité d'une ligne du réseau ferré parisien</i>	325
3-1) Station et accessibilité réticulaire.....	325
3-2) La densité d'une ligne.....	327
3-3) Effet de l'accessibilité sur la densité d'une ligne.	329
4) <i>Conclusion : Densité et trafic</i>	330
Chapitre 9 : Existe-t-il des limites de densité autour des stations pour lesquelles le TC présente un avantage énergétique par rapport aux autres modes ?	331
<i>Introduction</i>	331
1) <i>Offre et taux de remplissage du réseau ferré RATP : une approche empirique</i>	333
1-1) Effet de la hausse du taux de remplissage dans un véhicule : l'effet cumulatif.....	333
1-2) Baisse du taux de remplissage à offre constante dans une ligne	335
1-3) Variation de l'offre à trafic constant	337
1-4) Baisse de l'offre et du trafic à taux de remplissage constant.....	338
1-5) Compétitivité énergétique et taux de remplissage dans le cadre d'une densification.	340
2) <i>Densité et efficacité énergétique : l'exemple du réseau ferré parisien</i>	340
2-1) Evaluation d'un taux de remplissage à partir du trafic entrant des lignes à offre constante	340
2-2) Du taux de remplissage aux densités à offre donnée.....	342
2-3) Potentiel de densité à partir des taux de remplissage actuels.	343
2-4) Offre et potentiel de densité.....	344
2-5) Variation du potentiel de densité avec intégration des correspondances.....	344
3) <i>Conclusion du chapitre : Intérêts et limites du modèle</i>	346
Conclusion section 2:.....	348
Conclusion partie 2	350
Conclusion générale : Territoires et sobriété énergétique à l'heure des pandémies en perspective	353
<i>Densité et efficacité énergétique : une relation complexe multiscalaire</i>	353
<i>Quelles conséquences pratiques ?</i>	353
<i>Quelles recherches supplémentaires ?</i>	355
Figures.....	357
Graphiques.....	359
Tableaux	362
Bibliographie	367

Table des abréviations

ACEMO = Activité et Condition d'Emploi de la Main d'Oeuvre
ACV= analyse du cycle de vie du produit.
ADEME = Agence De Maîtrise de L'Energie.
ALUR = Loi pour l'Accès au Logement et un Urbanisme Rénové
APEREC = Asia Pacific Research Center.
APUR = Atelier Parisien d'Urbanisme
BEED = Budgets énergie environnement des déplacements.
BIMBY =Build in my back yard
BIT = Bureau International du Travail.
BTT = Budget temps de Transport
CBD = Central Business District
CETU = Centre d'Etudes des Tunnels
CEE = Certificat des économies d'énergie.
CEREMA= Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERTU = Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme.
CITEPA = Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CH4 = Méthane
CMP = Compagnie du Métropolitain Parisien
CNIT = Centre des Nouvelles Industries et Technologies
CPDP = Comite des Professionnels du Pétrole.
CRDS = Contribution à la Réduction de la Dette Sociale
CO2 = Dioxyde de Carbone
COPERT = Computer Program to calculate Emission from Road Transport
COS = Coefficient d'occupation des sols ;
CSE = Consommation spécifique effective.
CSG = Cotisation Sociale Généralisés
CSP = Catégories Socio Professionnelle
CSPE = Contribution service public de l'électricité.
CTN = Compte Transport Nationaux
DAH = Densité Activité Habitat
DIRIF = Direction des Routes d'Ile de France
DREIA = Direction départementale de l'équipement et de l'aménagement en IDF
DREIF = Direction Régionale de l'Equipement d'Ile-de-France
DT = Domicile Travail (déplacement)
ECAM = Enquête consommation des ménages.
ED= Ensemble des Déplacement (tout motif).
EDF= Equivalent Doorstep Frequency
ERFS = Enquête sur les Revenus Fiscaux et Sociaux
EGT = Enquête Globale Transport.
ENTD = Enquête Nationale des Transport et Déplacement
EPCI= Etablissement public de coopération intercommunale.
EURO = Normes européennes d'émission de GES
EUROSTAT = Bases de Statistique Européennes.
FCA = Fichier Central des Automobiles
FCT = Fichier des Contrôles Techniques.
GC = Grande Couronne
GES = Gaz à Effet de Serre
GEP = Gramme Equivalent Pétrole.

GNC = Gaz Naturel Comprimé
 GNL = Gaz Naturel liquéfié
 GNV = Gaz naturel véhicule
 GTL = Gaz to liquid
 HA = Haute Activité (Déchet)
 HFC = Hydro-fluorocarbures
 HQE= Haute Qualité Environnementale
 HVO =Hydotreated Vegetable Oil ou Huiles Végétales Hydrotraitées
 IAU= Institut Aménagement urbanisme.
 IDF = Ile De France
 IFFSTAR = institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
 IGN = Institut Géographique National)
 INRETS = Institut National des Réseaux de Transport et de leur Sécurité.
 INSEE= Institut National de Statistique et des Etudes Economiques
 IRIS = Ilots regroupés selon des indicateurs statistiques.
 IRSN = Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
 ISO = International Standard Organisation
 JA = Journée Agent.
 KCC = Kilomètre commerciaux parcourus.
 KV = Kilomètre Voiture
 LED = Diode Electroluminescente.
 LOTI = Loi des Transports Intérieurs
 LT= Lieu de Travail.
 LUTI= Land Use Transport Interaction.
 MAP= Marche à pied
 MARCADET = Modélisation Appliqué aux Réseaux de Courant Continu d'Alimentation et de Distribution D'énergie de Traction
 MF = Matériel Fer
 Mj= Mega joule
 MI = Matériel d'Interconnexion
 MIN = Marché d'Intérêt National
 MOBISIM = simulation des mobilités.
 MP =Matériel Pneu
 MS= Métro Suburbain
 N2O = Protoxyde d'Azote
 NASA = National Aeronautics and Space Administration
 NIMBY = Not in my back yard
 NTIC = Nouvelle Technologie de l'Information et de la Communication.
 NYMEX = New York Market Exchange
 OCDE = Organisation de Coopération et de Développement Economique.
 OMNIL = Observatoire de la Mobilité en Ile de France
 OPTILE = Organisation des Transporteurs d'Ile de France.
 ORF = Observatoire Régional du Foncier en IDF
 ORTP = Office régional des Transport Parisien
 PC = Petite Couronne
 PCI = Pouvoir calorifique inférieur
 PDU = Plan de Déplacement Urbain
 PEF = Postes Eclairage et force
 PEM = Proton Exchange Membrane
 PIB =Produit Intérieur Brut
 PIRANDELLO= Programme Interdisciplinaire de Recherche et d'Analyse Numérique sur les Déterminants de La Localisation
 PFC = Perfluorocarbure
 PHT = Poste haute tension (63KV ou 255Kv à Paris)

PKO = Place Kilomètre Offertes.
PL= Poids Lourds
PLAINSUDD = Plateformes numériques innovantes de Simulation Urbaine pour le Développement Durable
PLU = plan local d'Urbanisme
PRG = Pouvoir de Réchauffement Global d'un gaz.
PREDIT = Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres
PTAC = Poids Total Admis en Charge.
RATP = Régie Autonome des Transports Parisiens
ROSE = Réseau d'Observation Statistique de l'Energie en Île-de-France
RER =Réseau Express Régional.
RTE = Réseau de transport d'électricité
RSVERO = répertoire statistique des véhicules routiers
SDAU = Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme.
SETRA = Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
SNCF = Société Nationales des Chemin de Fer
SF6 = Hexafluorure de soufre
SECODIP= Société d'études de la consommation, de la distribution et de la publicité
SES = Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement service de statistique.
SIMBAD = SIMuler les MoBilités pour une Agglomération Durable
SIMAURIF= SIMulation de l'interAction Urbanisation-transport en Région d'Île-de-France.
STCRP = Société de transport en Commun de la Région Parisienne
STP = Syndicat des Transports Parisien
SOFRES = Société française d'enquêtes par sondages
SARECO = Société de conseil et d'études, spécialisée dans le stationnement
TC = Transport en Commun
TFA = Très Faible Activité
TFS= Tramway Français Standard.
TICPE = Taxe intérieure de consommation des produits énergétiques
TLE = Taxe Locale d'Electricité.
TJRF = Trafic Jour Ouvrable Réseau ferré
TOD = transit-oriented development
TUPM = Temps d'utilisation pondéré moyen
TVA = Taxe sur la valeur ajoutée
UNEDIC = Union Nationale Interprofessionnelle pour l'emploi dans l'Industrie et le Commerce
UITP = Union Internationale des Transports Publics
URSS =Union des Républiques Socialistes Soviétiques
URSAFF = Unions de Recouvrement des cotisations de Sécurité Sociale et d'Allocations Familiales
VUL =Véhicule Utilitaire Léger.
VP = Voiture Particulière (véhicules susceptibles de transporter un individu hors taxi.)
ZPIU = Zones de peuplement industriel et urbain

Introduction : La relation entre densité brute et l'efficacité énergétique justifie-t-elle les politiques densification autour d'une ligne de TC ?

Contexte.

Le dictionnaire le Robert définit l'énergie comme le caractère d'un système matériel à produire du travail. Par extension, l'énergie exprime la volonté ou l'efficacité. Cette capacité est envisagée physiquement, avec un système moteur, ou socio-économique, en s'intéressant aux substitutions énergie fossile énergie vivante. Les relations énergie travail sont bien connues au travers du rapport entre la traction animale et mécanique dans le champ économique et social. Les moteurs remplacent les animaux ou les éléments naturels (vent eau) pour fournir de l'énergie. Cette substitution, issue de l'innovation technologique, implique une croissance importante de la consommation d'énergie. Elle s'accompagne d'une transition dans l'utilisation des ressources énergétiques. Le charbon se substitue au bois, la transition biomasse, énergie fossile s'effectue (MARTIN, 1990). La transition énergie vivante énergie non vivante fait l'objet d'une approche économique. Ricardo (1804) montre, avec ses prix relatifs, que la quantité de travail vivante dépend du prix auquel elle est vendue. La « force de travail » aborde alors de manière énergétique l'analyse économique du capital (MARX, 1867); La reproduction de la force de travail renvoie à la régénération de celle-ci, l'individu étant conçu comme une machine vivante dans l'exploitation capitaliste ; Si son prix est supérieur à la mécanisation (et donc à l'énergie non vivante) alors elle est remplacée (RICARDO, 1817). Ce débat renvoie à la question des productivités réciproques de l'énergie mécanique et organique, autrement dit de la substitution travail capital en économie et donc à l'innovation, moteur de l'économie de marché (SCHUMPETER, 1935). Aussi, la productivité, conséquence de la mécanisation et de l'innovation, devient la base de la croissance économique et de la richesse des nations (FOURASTIER, 1979).

La substitution travail capital se manifeste rapidement dans le transport en commun (TC) urbain parisien. L'automatisation des processus implique la disparition de nombreux métiers à l'exemple de la RATP (TRICOIRE, 1999). Le « transport » (mobilité motorisée) se substitue au « transit » (mobilité à traction humaine ou animale) (ILLITCH, 1973). La traction mécanique se substitue à la traction organique (tramway hippomobile) augmentant les vitesses pour l'utilisateur. Le mode plus rapide se substitue aux moins rapides (ALLAIRE, 2007). Une croissance importante de l'énergie consacrée aux transports urbains accompagne donc l'émergence des modes motorisés (voitures, autobus, métro...). La consommation d'énergie est alors un indicateur d'inégalité sociale entre ceux qui « se transportent » (et sont motorisés) et ceux qui effectuent un « transit » (et ne sont pas motorisés) (ILLITCH, 1973) et renvoie alors aux revenus. Le lien énergie et vitesse sert de base à la notion de monopole radical. Ce dernier est un processus de production industrielle qui exerce un contrôle exclusif sur la satisfaction d'un besoin en excluant tout recours à des activités non industrielles (ILLITCH, 1973).

La substitution travail (pédaler pour aller au travail) capital (posséder une voiture pour y aller) s'exerce dans le déplacement. La crise pétrolière de 1973 interroge l'expansion de la consommation d'énergie. Les prix de l'énergie et du carburant augmentent et, avec eux, les coûts des entreprises et la contrainte sur les budgets des ménages. En effet, l'éloignement des travailleurs de leur domicile à un coût (FOURASTIER, 1979). En France, la transition énergétique « énergie nucléaire - énergie fossile » et l'efficacité énergétique prennent corps avec des réglementations sur l'habitat. Néanmoins, ces aspects sont atténués lors du contre choc pétrolier de 1986, qui fait durablement baisser les prix de l'énergie. Deux autres problèmes apparaissent alors.

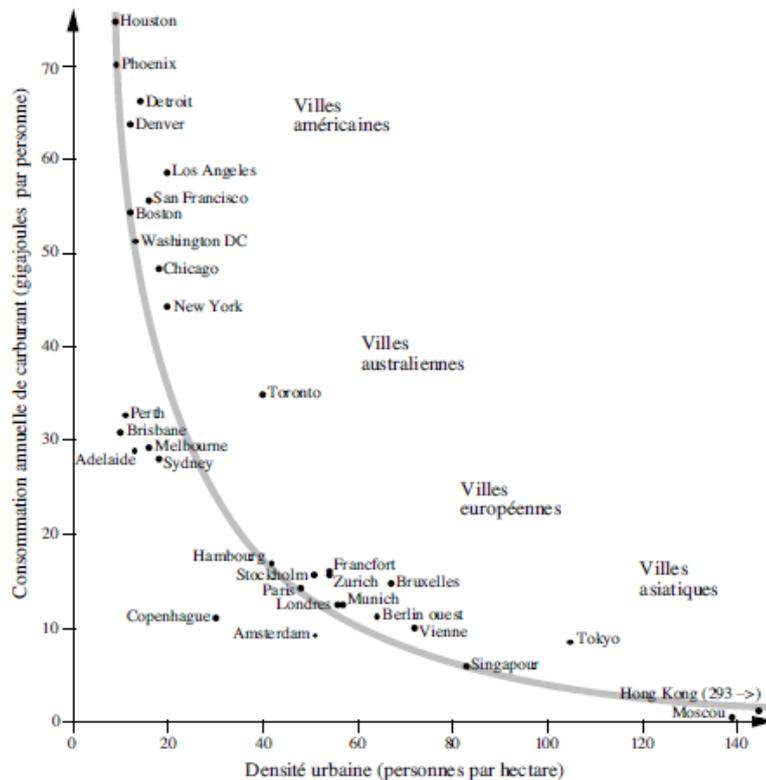
Le premier est celui du peak-oil, où l'extinction progressive des réserves pétrolières. Le deuxième est le réchauffement climatique qui serait dû aux activités humaines. En effet, le développement industriel exploite une partie toujours plus importante des énergies fossiles ce qui implique alors le rejet de gaz à effets de serre dont le CO₂. Deux conventions cadres ont, dès les années 90, fixées des objectifs de limitation des émissions. La 3^{ième} conférence des parties à Kyoto a débouché sur l'adoption du protocole dit « Protocole de Kyoto » ratifiée en 2002 par l'Union européenne. Cette dernière a un objectif collectif de réduction des GES. Plus récemment l'UE vise à limiter le réchauffement climatique en diminuant de 40% en 2030 les émissions par rapport à celles de 1990.

Le transport est l'activité qui émet le plus de GES (Gaz à Effet de Serre) et la Voiture (VP) est le plus fort émetteur (NOTRE-ENVIRONNEMENT.GOUV, 2019). La mobilité de l'espace urbain est liée à la consommation d'énergie et à la production de GES contribuant au réchauffement climatique (NEWMAN P. , 1995) (FOUCHIER, 1997) (GALLEZ & HIVERT, 1998) (LEVY & al, 2011). Les actions pour la sobriété énergétique tentent de limiter la consommation d'énergie des habitants (TROTEAU, 2013). Elles dépendent des besoins et de leur approche : les individus utilisent l'énergie directement ou indirectement dans la production de produits industrialisés ou agricoles. Dans l'utilisation directe plusieurs auteurs mettent avant le rôle de la forme urbaine, pour augmenter l'efficacité énergétique (POUYANNE, 2004) (LE NECHET, 2010).

Problématique.

La densité diminuerait la consommation d'énergie par habitant dans la mobilité quotidienne dans plusieurs études (NEWMAN & KENWORTHY, 1990), (APEREC, 2007). (cf graphique 1)

Graphique 1 : densité spatiale et consommation d'énergie



Source Newmann et Kenworthy

A rebours, les réseaux structureraient de nouvelle forme d'urbanisme faiblement dense (ORFEUIL & al, 2002), « l'étalement urbain ». La croissance du système automobile (DUPUY, 1999) l'expliquerait. Ensuite cette relation entre densité et efficacité énergétique dépendrait d'une forme urbaine spécifique la forme monocentrique (POUYANNE, 2004). Outre l'effet réticulaire, une interaction « forme globale » « forme locale » apparaîtrait (LE NECHET, 2010).

Les politiques de densification urbaine en IDF (TOUATI, 2013) favoriseraient la mixité sociale et l'usage des modes alternatifs à la voiture particulière (VP), conduisant à des formes urbaines plus « durables » (économie de développement des réseaux, d'imperméabilisation des sols, préservation d'espace nature...). Le TOD (transit Oriented development) privilégie l'aménagement des formes locales à partir des réseaux (CERVERO & KOCKELMAN, 1997). L'intérêt pour l'indicateur densité et la densification, qui devient « qualifiée », « douce », et au service de « l'intensification urbaine » (LINOSSIER, 2014) intégrant des dimensions « sensibles et sociales » (NESSI, 2012) est renouvelé. Néanmoins, en IDF, la notion de « potentiel de densification » selon l'offre de TC (DREIA, 2011), ou bien l'effet de la densité sur le trafic à grande échelle n'est pas explicité. Aussi, pour établir une politique densification « sobre » autour des lignes TC, il est nécessaire de comprendre la nature de la relation entre densité et efficacité énergétique.

Aussi, existe-t-il des limites de densité de population autour des stations de TC pour lesquelles ces derniers conservent leur avantage énergétique ?

Question de recherche

L'efficacité énergétique du TC varie avec les facteurs technologiques (APEREC, 2007), les vitesses (ENERDATA, 2004) les taux d'occupation, les voyages (trafic). Les modèles et les mesures (UITP) montrent que les consommations unitaires, l'énergie consommée pour transporter un voyageur, des différents modes peuvent s'égaliser, c'est à dire converger. Dans certains pays, l'avantage des TC s'amenuise dans le temps (APEREC, 2007). Les gains d'efficacité des VP plus importants que ceux des TC traduisent une diffusion plus rapide de technologies plus efficaces à taux de remplissage constant. Cette compétitivité accrue modifie-elle le fait que les TC soient plus efficaces énergétiquement ce qui justifie aussi la densification ?

Ensuite les consommations par habitant dépendraient du choix modal et de la distance parcourue dans la mobilité quotidienne (POUYANNE, 2004). Elles ne renvoient donc pas à l'efficacité énergétique d'un voyageur d'un réseau. Aussi comment ces variations modifient les consommations des habitants dans une région ? (cf figure 1)

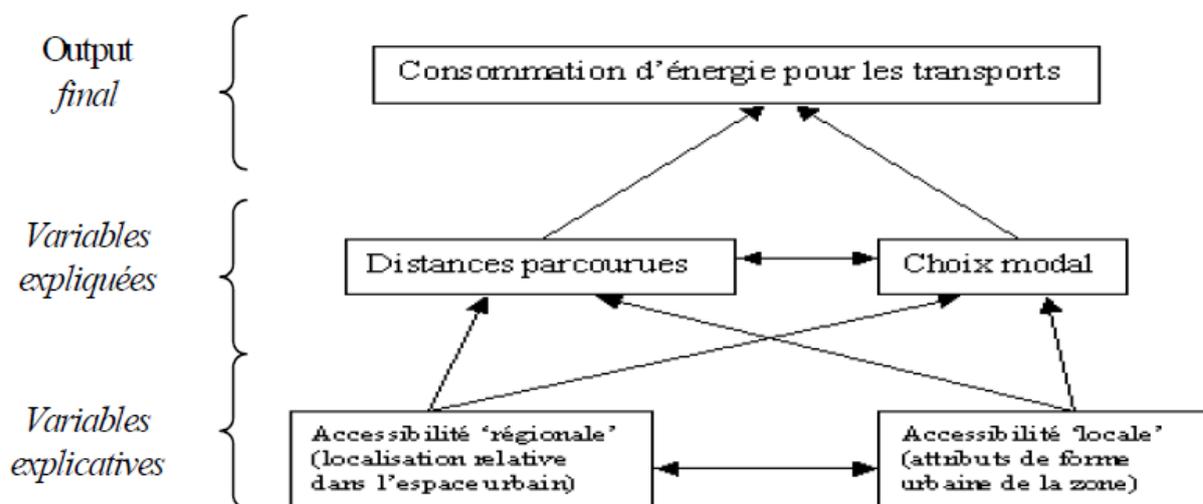


Figure 1: consommation d'énergie pour les transports.

Source : Pouyanne

La densité est un indicateur de « forme urbaine ». Plusieurs modèles historiques monocentrique, polycentrique de « forme urbaine » issue des densités existent.

La forme monocentrique expliquerait cette relation entre les formes urbaines et les densités (ENAULT, 2003) (POUYANNE, 2004) (LE NECHET, 2010). De nombreuses études existent en France qui semblent le confirmer (ENAULT, 2003) (POUYANNE, 2004). Les portées diminuent et les parts modales sont modifiées. Néanmoins, des variations selon les échelles existent, la causalité n'est pas acquise.

Actuellement la région IDF conjugue des formes monocentrique et polycentrique. L'augmentation des vitesses des réseaux couplés aux usages du sol peuvent l'expliquer. Or l'énergie se transforme en vitesse (ILLITCH, 1973), l'effet rebond est alors un indicateur indirect de cette transformation.

Néanmoins, si les réseaux modifient la forme urbaine cette dernière pourrait aussi modifier leur fonctionnement et donc l'efficacité énergétique. Aussi les densités modifient-elles les consommations des habitants en IDF ? Les portées et les parts modales des modes varient-elles selon les densités ? Ensuite, comment modifieraient-elles les parts modales en IDF ? Dans la théorie classique des transports (QUINET, 1995), les coûts généralisés expliquent les choix modaux. Dans le modèle agrégé GLOBAL leur différence l'explique. Mais l'approche statistique est qualitative pas quantitative comme le montre la relation entre densité et efficacité énergétique (NEWMAN & KENWORTHY, 1990). Ensuite, la fonction de coût est spécifique au modèle. Comment calculer les coûts généralisés selon une logique quantitative dans les EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale) de l'Ile de France ? La différence des coûts généralisés modifie-t-elle les parts modales dans cette approche ? La densité des secteurs modifie-t-elle cette différence ?

Historiquement, la densité a toujours justifié les politiques publiques en faveur du TC. Le TOD, propose une densification auprès des réseaux ferrés de TC (DREIA, 2010) en suivant cette logique. Plusieurs auteurs s'interrogent en France sur l'urbanisation avec les approches « node place » (LEYSENS, 2011). Néanmoins cette méthode est statique et les modèles LUTI (Land Use Transport Interaction) couplés aux modèles 4 étapes (ANTONIN & al 2011) ne peuvent prévoir l'effet spatial local de l'installation d'une nouvelle infrastructure. L'effet du trafic ou de l'offre de TC sur la valeur de la densité locale est un point aveugle. La notion d'accessibilité à grande échelle est alors mobilisée et interroge l'effet de la proximité spatiale à l'origine du déplacement pour une part modale donnée. Comment la densité modifie les trafics ? Comment déterminer selon une offre de transport du réseau ferré une densification urbaine à proximité des stations qui maintient la compétitivité énergétique du TC vis-à-vis de la VP ?

Partant du constat de la diminution des écarts de consommation énergétique unitaire entre transports en commun et véhicules individuels d'une part, et de l'omniprésence du modèle de la ville dense d'autre part, cette thèse s'interroge sur les conditions techniques et spatiales dans lesquelles un réseau ferré de transports en commun (TC) conserve un avantage net du point de vue des efficacités énergétiques dans le cadre d'une densification auprès des gares en IDF vis-à-vis de la voiture (VP).

Méthodologie

L'objectif est d'établir la densité brute d'habitant D qui permet une efficacité énergétique du TC (E_{tc}) au moins égale à celle de la VP (E_{vp}) selon le fonctionnement d'une ligne de TC ferré en jour ouvrable. Notre approche est empirique et quantitative. La structure des déplacements est donnée dans l'agglomération. L'activité à proximité de l'infrastructure est supposée constante dans la modélisation entre densités et trafic pour une efficacité donnée. Des données statistiques (recensement de la population, Enquête Globale Transport d'Ile-de-France où EGT), et réticulaires selon les modes (statistique transporteurs) sont mobilisés. Des modèles de simulation seront créés et utilisés. Chacun des chapitres sera structuré par un état des lieux suivi d'une recherche répondant à la question posée. Deux parties de deux sections structurent la thèse :

1. Comment la compétitivité énergétique des modes TC et VP évolue et quelles en sont les conséquences sur les consommations par habitants ? Nous précisons ce qu'est l'efficacité énergétique. L'égalisation (convergence) des efficacités des modes TC et VP dépend des consommations spécifiques et du taux de remplissage. Or ils varient selon les modes, les espaces et les temporalités. Le progrès technique modifie les consommations spécifiques sur longue période, le nombre d'habitant modifie les vitesses, le taux de remplissage reflète un usage qui change selon les jours. Or, en IDF, la diésélisation du parc, la variation de la quantité d'habitant et les usages se modifient. Nous étudions ce phénomène sur longue période 1975-2018 selon les réseaux, les couronnes et les jours. La croissance de la compétitivité énergétique de la VP (convergence) vis-à-vis du TC se confirme mais elle se distribue inégalement. Ensuite nous étudions l'effet de cette égalisation sur les consommations par habitant. Les variables de mobilité quotidienne sont exposées. Nous proposons alors un nouvel indicateur : l'efficacité énergétique par déplacement. Nous montrons son adéquation dans la base UITP et l'appliquons dans les secteurs EGT ainsi que l'interaction entre déplacement et voyage avec le « déplacement à voyage chaîné ». Malgré le progrès technique, la consommation par déplacement augmente selon les couronnes de l'IDF ce qui laisse supposer un effet rebond.

2. Les densités modifient-elle consommations des habitants à petite échelle en IDF ? Jusqu'à quelle valeur densifier à proximité des stations de réseau ferré ? La baisse des consommations des habitants serait due à une forme urbaine spécifique : la forme monocentrique. De nombreux travaux l'attestent, mais la causalité est débattue. De plus la forme urbaine de la région IDF évolue. De monocentrique elle se rapproche du modèle « mono-polycentrique ». L'effet rebond pourrait l'indiquer. Nous vérifions ces trois éléments en IDF. Tout d'abord la relation densité et consommation par déplacement sur la base UITP ne donne pas des résultats convaincants, ce qui peut être due aux formes urbaines. Ensuite, au travers d'une analyse par couronne, nous montrons que l'effet rebond en grande couronne (GC) explique l'augmentation des consommations par déplacement dans une forme monocentrique.

Sur les secteurs EGT, la relation entre densité et consommation par déplacement diffère selon les portées des modes. Pour la VP, les portées ne diminuent pas avec les densités, contrairement au TC, ce qui constitue un résultat original. Les densités modifient les parts modales des modes de manière inverse. Néanmoins, ces résultats n'invalident pas l'hypothèse de l'effet d'une forme urbaine monocentrique sur l'efficacité énergétique puisque la forme urbaine en IDF « mono-polycentrique » conserve des éléments renvoyant à cette forme. Néanmoins, si la densité modifie les choix modaux, alors elle modifie aussi les coûts généralisés. Une fonction d'utilité classique en IDF les coûts généralisés du modèle GLOBAL est mobilisée. Nous calculons leur différence dans les EPCI dans une logique quantitative.

Nous vérifions la relation entre cette différence et les parts modales. Nous montrons que les densités la modifient aussi ce qui interroge puisqu'elles ne constituent qu'une part très faible des motifs de déplacement. Nous proposons une hypothèse de recherche vérifiée : c'est la concentration d'activité variable cachée de la densité qui les modifie.

Enfin, comment les densités modifient les trafics réseaux ferrés à proximité des stations à grande échelle en jour ouvrable ? Si les densités ne modifient pas les parts modales, elles peuvent néanmoins modifier le trafic. Après le rappel des politiques publiques actuelles et leurs besoins. Nous montrons que les trafics peuvent être modifiés indépendamment de la part modale dans le réseau ferré parisien grâce aux concentrations d'habitants à grande échelle à proximité des stations. Les densités proches des stations des arrondissements définissent alors la densité de ligne. Nous montrons l'effet du maillage. Nous modélisons alors l'effet de l'offre sur l'efficacité énergétique dans le réseau ferré. Avec l'effet des densités sur le trafic, nous définirons la notion de potentiel de densité. Par le taux de remplissage nous couplons alors les deux modèles pour calculer, selon les consommations unitaires, des densités à proximité des stations. Ce modèle permettra de prévoir un usage des sols à partir d'une offre de TC pour une efficacité énergétique donnée.

Partie 1 : Efficacité énergétique comparée des TC et le la VP en Ile-de-France

Introduction ; de l'approche réticulaire à l'approche aréolaire.

Le mot réseau viendrait de trois termes en vieux français : *réssel* (12^e siècle), *réseuil* (15^e siècle) et *réseul* (16^e siècle.) (Voire le mot *résille*), désignant une sorte de rets, de filet, et d'autre part du latin "*retiolus*", diminutif de "*retis*", "*petit filet*", terme technique et populaire à la fois, mais mal fixé, peut-être emprunté au toscan. Des tisserands et vanniers emploient le mot « réseau » au 17^e siècle, qualifiant l'entrecroisement des fibres textiles ou végétales, et le périmètre d'une maille. Il est présent dans les dictionnaires de Furetière (1670), de Richelet (1680), de l'Académie (1694), où il décrit une sorte de tissu de fil ou de soie. Des ingénieurs militaires, hydrauliciens et des travaux publics transfèrent progressivement ce terme, entre la fin du 18^{ème} et la première moitié du 19^{ème} siècle, dans l'aménagement de l'espace (Mise en place des systèmes parisiens des conduites de distribution d'eau, des voies de communication, etc.). A partir de 1840, il s'applique au réseau routier. De nombreuses approches (sociologique, technique, géographique...) des réseaux recouvrent des représentations diverses. Notre approche qualifie les réseaux de TC comme l'ensemble des lignes des voies de communication, des conducteurs électriques, des canalisations, qui desservent une même unité géographique et dépendent de la même compagnie (DUPUY, 2002) Trois couches le constituent (CURIEN, 2000).

1. L'infrastructure ou couche basse du réseau où les mobiles fonctionnent.
2. L'infostructure ou contrôle commande du réseau. Ces services sont autoconsommés. L'objectif est l'optimisation de son utilisation afin qu'il remplisse son rôle « d'intermédiation » (transport d'énergie, de personnes, de fluide, d'information etc.).
3. La couche haute ou celles des services commerciaux qui vendent les prestations issues du réseau en fonction des segments de clientèle.

La synergie des réseaux crée des économies d'envergure. Géographiquement, certains réseaux s'étendent et couvrent le territoire (réseaux routiers par exemple). Leurs accroissements impliquent des rendements croissants. Plus ils s'étendent, plus les coûts de production unitaire baissent (CURIEN, 2000). De plus il existe des gains supplémentaires (externalités) associés à la connexion au réseau. L'effet de club qualifie le mécanisme « d'auto-renforcement » des avantages issus de l'adhésion à un réseau technique ou social. Dans un réseau de télécommunication une personne supplémentaire renforce les capacités de communication de toutes les autres qui bénéficient de la possibilité de la joindre. Augmenter le nombre d'automobiles pousse les pouvoirs publics à augmenter la surface de la voirie, à améliorer l'accessibilité du réseau et sa vitesse de circulation.

Il y a donc la formation d'une collusion d'intérêt favorisant un mode (DUPUY, 1999). Trois dimensions principales la caractérisent :

1. Une dimension topologique ;
2. Une dimension cinétique (vitesse de déplacement d'un point à un autre)
3. Une dimension adaptative (le réseau devrait, s'adapter à tout moment aux besoins de nouvelles liaisons). Pour transporter les flux, les structures sont hiérarchisées (routes), les structures de petites capacités sont connectées à celles de plus hautes capacités.

Ce système technique s'insère dans un territoire. Il permet aux habitants de voyager. Ce passage de la résidence au voyage, banal, traduit un passage entre deux dimensions différentes du territoire. Du territoire nous entrons dans le réseau l'espace des flux succède à l'habitat. Ce passage implique un mode de déplacement. Nous usons d'un mobile ou non, ce mobile est motorisé ou non. Il implique l'usage de l'énergie humaine, la « force de travail », ou sa substitution.

L'efficacité énergétique du voyage traduit alors la quantité de carburant utilisé dans le franchissement de la distance. Cette efficacité énergétique du voyageur implique le fonctionnement du réseau dont les structures traversent les lieux d'habitats, elle n'est pas celle de leurs habitants. Les mesures fonctionnelles des espaces réticulaires (le voyage) ou aréolaires (le déplacement) montrent cette différence. Aussi l'efficacité énergétique des voyageurs et des habitants, si elles sont liées, ne sont pas identiques. Aussi si les progrès techniques ou les espaces, modifient l'efficacité énergétique des voyageurs, comment modifie-t-elle celle des habitants ?

Cette partie est articulée en deux sections :

La première renvoie à l'efficacité énergétique du voyage et à son évolution selon les modes dans le réseau selon les espaces de l'Ile de France au travers d'un découpage en couronne.

La seconde renvoie à l'efficacité énergétique des habitants (la spatialisation de l'efficacité) et son évolution selon l'efficacité énergétique du voyage selon le même découpage spatial.

Partie 1 : Efficacité énergétique comparée des TC et le la VP en Ile-de-France	19
Introduction ; de l'approche réticulaire à l'approche aréolaire.....	19
Section 1 : vers une égalité des efficacités énergétiques des voyageurs des modes urbains ?	23
Introduction.....	23
Chapitre 1 : consommations unitaires (voyageur.km) TC et VP : définition des concepts et facteurs explicatifs.	24
Introduction : consommation unitaire et convergence : du réseau à l'espace.....	24
1) Cadre spatial et énergétique des réseaux de transport en IDF.....	25
1-1) Cadre spatial.....	25
1-2) Les sources d'énergies des systèmes de transport en IDF.....	33
1-3) La mesure de l'énergie.....	41
2) L'efficacité énergétique du transport de voyageur : la consommation unitaire réticulaire.....	48
2-1) Définition.....	48
2-2) Taux de remplissage et d'occupation.....	50
2-3) La consommation spécifique.....	62
3) La vitesse comme facteur de variation réticulaire des consommations spécifiques	82
3-1) La vitesse réticulaire.....	82
3-2) Vitesse de circulation et fluidité ;	84
3-3) Calcul des vitesses réticulaires des réseaux routiers en IDF.....	86
3-4) La vitesse des lignes TC RATP.....	87
3-5) Vitesse et variation des consommations spécifiques.....	89
3-6) Consommation spécifique : l'effet spatial	90
4) Conclusion.....	91
Chapitre 2 : Mise-en-évidence de la convergence des consommations unitaires TC et VP (voyageur.km) en Ile-de-France.....	92
Introduction.....	92
1) Elément de méthodes modèles versus empirisme.....	93
1-1) Les modèles énergétiques.....	93
1-2) La méthode empirique.....	94
1-3) L'approche quantitative : l'exemple du taux d'occupation.....	94
2) Consommations unitaires moyennes VP en IDF selon les secteurs.....	96
2-1) Calcul de la consommation réticulaire.....	96
2-2) Calcul des consommations VP par secteur.....	100
3) Consommation unitaire TC.....	106
3-1) Calcul de la consommation réticulaire.....	106
3-2) Calcul des efficacités énergétiques par secteur.....	110
4) Convergence des consommations unitaires en IDF.....	113
4-1) L'indice de convergence	113
4-2) Convergence moyenne par modes en IDF.....	114
4-3) Variation de l'indice de convergence selon les jours.....	114
4-4) Variation selon les couronnes et les jours.....	115
4-5) Discussion des résultats.....	116
5) Conclusion : des facteurs croisés.....	117
Conclusion section 1 :	118
Section 2 Quels effets des variations de l'efficacité énergétique des voyageurs sur l'efficacité énergétique des habitants ?	120
Introduction	120
Chapitre 3 : Comment passer des consommations unitaires (voyageur.km) aux consommations spatiales par habitant ? Application à l'Ile-de-France selon l'enquête ménages déplacements	122
Introduction :	122
1) La mobilité quotidienne en IDF.....	124
1-1) Mesure de la mobilité des enquêtes EGT en IDF.....	124
1-2) Les parts modales.....	128
1-3) Le TC un mode spécialisé.....	129
1-4) La VP un mode non spécialisé	132
	21

1-5) La distance du déplacement.....	135
1-6) Les temps du déplacement.....	138
1-7) Les « pseudo-vitesses » spatiales.....	140
1-8) Pseudo vitesse et vitesse de circulation où l'existence de deux espaces disjoints.	143
2) La consommation par habitant comme problème.	145
2-1) La reconstitution des consommations par les trafics.....	145
2-2) Pertinence et limite de l'approche combinée à grande échelle.....	149
2-3) Vers une extension de la méthode.	155
3) Conclusion.....	157
Chapitre 4 Efficacité énergétique spatiale des habitants et des territoires et convergence dans les secteurs.....	158
Introduction ;	158
1) Consommation du déplacement d'un habitant ou du territoire : une proposition	159
1-1) Consommation d'un habitant	159
1-2) Evaluation de l'indicateur sur la base UITP	159
1-3) Consommation par déplacement sans chaînage dans les secteurs EGT.	161
2) La question du chaînage des voyages.	162
2-1) Du déplacement chaîné au déplacement à voyage chaîné sur la base UITP.....	162
2-2) Estimation de la consommation du chaînage d'un TC en IDF.....	164
3) Variation de la consommation par déplacement	166
3-1) Consommation domicile travail.....	166
3-2) En fonction des jours 2008.....	167
3-3) Consommation par déplacement des secteurs.....	168
3-4) Convergence et consommation par déplacement selon les couronnes en jour ouvrable.....	169
3-5) discussion des résultats.....	170
4) Conclusion :.....	171
Conclusion section 2.....	172
Conclusion partie 1: Vers une relation efficacité énergétique spatialisée et densités des habitants des secteurs EGT.....	174

Section 1 : vers une égalité des efficacités énergétiques des voyageurs des modes urbains ?

Introduction.

L'efficacité énergétique du voyageur ou réticulaire est une mesure connue. Pour le système de transport, il s'agit de l'inverse de la consommation d'énergie sur la charge moyenne. Elle se compose de deux variables la consommation spécifique et le taux d'occupation ou de remplissage. Les mesures des taux des modes VP et TC renvoient à des éléments d'offre distincts même si elles renvoient au même élément de trafic : le voyage.

Cette efficacité énergétique sous-entend l'emploi d'un vecteur énergétique en dehors de la « force de travail ». Les carburants les plus utilisés en milieu urbain sont l'électricité et le pétrole. Ils n'ont ni la même origine (fossile pour l'un minéral pour l'autre), ni les mêmes unités de mesure physique, ni les mêmes modes de production, ni les mêmes conséquences sur l'environnement. Ces deux vecteurs sont fondamentalement différenciés tant dans leur évolution technique que leur mode de production.

Les consommations spécifiques mesurent l'usage de ces carburants dans un cadre technique. Les évolutions techniques et d'exploitation (vitesses offre) des modes modifient les mesures qui n'évoluent pas de la même manière selon les réseaux. Le progrès technique régulier de la VP amplifie son efficacité, ce n'est pas le cas du TC où des réinvestissements existent en particulier sur des équipements annexes aux véhicules (escalier mécanique, éclairage...). Si le taux de remplissage est une variable elle n'est pas la seule. La comparaison des consommations unitaires de l'UITP montre que le TC n'est pas forcément plus efficace que la VP.

Comment les facteurs technologiques et le taux de remplissage modifient-ils la compétitivité énergétique des modes TC et VP dans les espaces de l'IDF ?

Chapitre 1 : Convergence des consommations unitaires (voyageur.km) TC et VP : définition des concepts et facteurs explicatifs

Chapitre 2 : Mise-en-évidence de la convergence des consommations unitaires TC et VP (voyageur.km) en Ile-de-France dans les secteurs EGT

Dans ces chapitres, nous avons calqué les données de trafics sur les enquêtes de l'EGT sachant qu'à ce jour les données EGT par secteur de l'Enquête Ménage Déplacement ne sont pas connues pour 2018.

Chapitre 1 : consommations unitaires (voyageur.km) TC et VP : définition des concepts et facteurs explicatifs.

Introduction : consommation unitaire et convergence : du réseau à l'espace.

La consommation unitaire est l'inverse de l'efficacité énergétique. Elle mesure la productivité énergétique d'un service rendu. Elle renvoie à un réseau, à une machine, à ses processus de production et de consommation. Deux variables la composent, le taux de remplissage et la consommation spécifique.

Pour le premier, deux indicateurs apparaissent selon les modes, le taux de remplissage (VP) et d'occupation (TC). Ils ne renvoient pas aux mêmes mesures. Le premier est une occupation d'un véhicule le second une occupation de surface selon une offre de transport. Cette dernière dépend des lignes et d'une norme de confort (4 voyageurs au mètre carré aujourd'hui) qui évolue dans le temps (6 dans les années 80). Comparer un taux de remplissage et d'occupation n'est pas une évidence.

La consommation spécifique renvoie d'abord aux énergies (électricité ou pétrole) en intégrant ou non les processus de transformation qui produit l'énergie finale. Pour un même service, la variation de la mesure modifie la comparaison. De même, elle renvoie aux facteurs techniques de fonctionnement de la VP et du TC.

Le TC n'est plus efficace que dans des conditions d'exploitation données. Les facteurs technologiques (technologie, exploitation) sont autant explicatifs que les usages (trafic) dans cet avantage. Or, les consommations unitaires semblent s'égaliser (APEREC, 2007) dans certains pays. La diésélisation du parc des cinquante dernières années fait baisser les consommations unitaires de la VP au travers des consommations spécifiques en France et en IDF entre 1975 et 2018. L'évolution des consommations spécifiques des modes n'est pas similaire. En effet, la technologie utilisée dans les TC améliore aussi son efficacité énergétique et les usages peuvent améliorer son rendement. Des effets différenciés que cachent des mesures régionales apparaissent selon les modes. De même, la quantité d'habitant modifie les vitesses des VP ce qui n'est pas le cas pour les TC ferrés.

Trois parties structurent le chapitre qui porte sur un état des lieux :

La première renvoie au cadre spatial de l'étude de ce mémoire.

La seconde à une déclinaison des variables de l'efficacité énergétique : taux de remplissage et consommation spécifique

La troisième à la déclinaison de la vitesse variable de la consommation spécifique qui renvoie aux réseaux et à leur milieu d'insertion territoriale.

1) Cadre spatial et énergétique des réseaux de transport en IDF.

Nous sommes dans une démarche empirique, statistique et agrégée. Nous déclinons donc les sources et les données avec lesquelles nous travaillerons dans le périmètre de l'IDF. Les territoires qui constitueront nos données d'entrée sont zonées, ils ont donc une échelle particulière. Nous indiquerons les zones des réseaux de TC à l'intérieur du périmètre de l'IDF et les sources des données qui renvoient à leur fonctionnement afin de les exploiter. Nous déclinons ensuite alors le cadre énergétique de la thèse sachant que plusieurs approches existent dans la notion d'efficacité énergétique que nous qualifierons de réticulaire pour le voyageur. Nous étudions d'abord le réseau, les données de mobilité urbaine seront ensuite déclinées dans le chapitre 3.

1-1) Cadre spatial

1-1-1) Le zonage

Les méthodes mobilisées distinguent les courants des approches de l'espace urbain (MORENA SIERRA, 2009). L'espace en géographie ou en économie spatiale, est le contenant des facteurs physiques, humains et économiques qui conditionnent l'évolution d'une société. Dans l'économie régionale, il est pris en compte avec des logiques économiques. En droit, un territoire est un espace que des frontières de souveraineté (BURGIERE & REVEL, 2000) bornent. L'appréhension statistique de l'espace et la cartographie unifiée en 1880, se substituent aux voyages du souverain. Cette logique débouche, à un plan plus agrégé, sur l'étude de ses grandes divisions fonctionnelles (navettes domicile-travail, réseaux de transport.). La France est un tout que les zonages divisent. La notion de territoire est construite. Deux types des zonages existent (LE GLEAU, 1999) (Cf Tableau 1).

Catégories de zonage		Exemples	
Zonages de pouvoir	Institutionnels	Circonscriptions de l'État	État régions départements arrondissements (communes)
		Collectivités territoriales	Régions départements communes
		Groupements de collectivités territoriales	Syndicats communautés urbaines communautés d'agglomération communautés de communes
		Circonscriptions électorales	Cantons circonscriptions législatives
	Administratifs spécialisés	Districts scolaires secteurs sanitaires régions militaires zones ANPE	
Intervention	Zones fonds structurels de l'Union Européenne parcs naturels zones urbaines sensibles		
Zonage de savoir	En tâches	Taches homogènes	Unités urbaines typologies espaces à dominante urbaine
		Taches polarisées	Aires urbaines
	En mailles	Mailles homogènes	Régions agricoles
		Mailles polarisées	Zones d'emploi bassins d'emploi Zones de petite chalandise bassins hydrologiques

Source : Jean Pierre Le Gleau

Les zonages du pouvoir, institutionnels administratifs ou d'intervention concernent la vie des collectivités.

Leur création, suppression ou modification, est un acte législatif ou réglementaire d'un certain niveau (loi, décret en conseil d'Etat, décret simple, plus rarement arrêté préfectoral). Certaines subdivisions françaises viennent de la révolution. L'articulation des pouvoirs locaux et nationaux stabiliserait le découpage (BURGIERE & REVEL, 2000) administratif. Des zonages sont reconstruits par addition des zonages existants (regroupement de communes) ou par l'intervention d'une administration spécifique (région militaire). Aussi, les statistiques établies sur ces bases sont comparables avec des territoires qui le sont. La prudence convient donc pour comparer des statistiques entre les territoires européens (TERRIER, 2000). Les zonages de savoir spécifient une connaissance particulière selon deux modes :

1. La mise en évidence de portions du territoire où des observations sélectionnées (ou une combinaison de ces observations) dépassent un seuil. Des taches apparaissent sur la carte.
2. Le "maillage" du territoire qui est partitionné sans omission ni recouvrement. Ils ressemblent alors aux zonages institutionnels. L'homogénéité du lieu où le regroupement de flux de transport (polarisation) vers un lieu spécifique à l'exemple des aires urbaines peuvent constituer cette unité.

1-1-2) Les secteurs EGT comme périmètre spatial des données de mobilité des EPCI.

La région IDF ou région parisienne date de 1790. Auparavant constituée de trois départements, les réformes institutionnelles de 1965 l'ont reconfiguré dans sa forme actuelle. Avec la création du « district » un important programme de rénovation urbaine est mis en œuvre dans les mêmes années (villes nouvelles, infrastructures de transport). Les enquêtes EGT sont créées en 1969. Elles visent à connaître la mobilité quotidienne des résidents de l'IDF à partir de sondages. Elles imitent les enquêtes américaines commencées dans les années 30 (CHATZIS, 2013). Les enquêtes EGT sont des déclinaisons régionales des ENTD (Enquête Nationale des Transports et Déplacements). En IDF l'enquête concerne 18 000 (10500 en 2001) ménages sur les pratiques de mobilité en 2010. Le fichier des propriétés bâties sert à échantillonner la population. L'enquêteur s'entretient en face à face. Les personnes de 5 ans et plus renseignent leurs déplacements effectués la veille. Les 4 questionnaires de l'enquête (ménage, personnes, déplacements et trajets) sont complétés sur format papier. La DREIA corrige les erreurs du processus. Le redressement est effectué à l'échelle départementale selon la taille des ménages, le type de logement (appartement maison) les profils des personnes catégorisées en 30 classes (fondées sur le sexe, l'âge, la catégorie socioprofessionnelle et l'occupation principale). Les membres du ménage, 43 000 personnes sont interviewées ; Tous les déplacements effectués la veille des personnes du ménage âgées de cinq ans et plus sont recensés et décrits précisément : localisation, durée, motifs, modes..., soit 143 000 déplacements répertoriés ; Tous les modes de transport sont pris en compte : marche à pied, deux-roues, transports en commun, voiture particulière... ; Un certain nombre d'informations, exposé au chapitre trois, représentatives statistiquement sur la mobilité des individus est recensé.

Cette enquête évalue aussi les taux de remplissage des voitures en IDF. Les données globales sont accessibles depuis 1975. Les EGT utilisent plusieurs maillages (Cf figure 2).

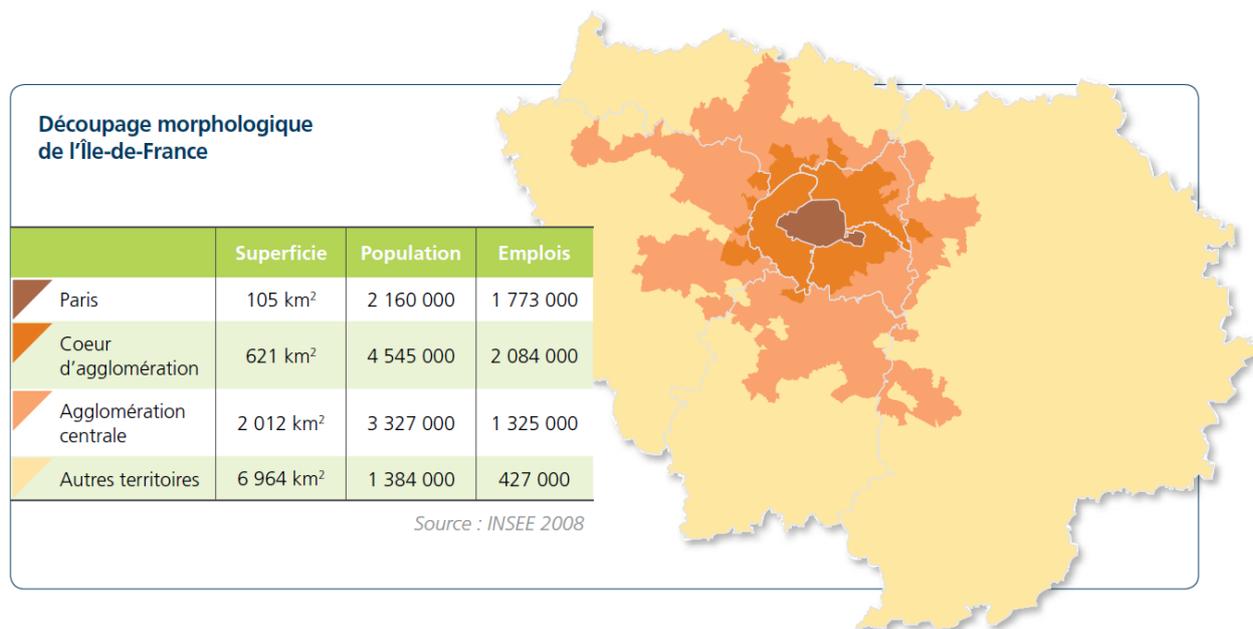


Figure 2: découpage morphologique IDF

Source : OMNIL

A petite échelle, elles utilisent 3 ou 4 mailles circulaires

1. Paris représente la seule ville de Paris.
2. Le Cœur d'agglomération correspond aux territoires du cœur d'agglomération hors Paris.
3. L'Agglomération centrale correspond aux territoires de l'agglomération parisienne selon la définition de l'INSEE hors Paris et cœur d'agglomération.
4. Les « Autres territoires » renvoient aux agglomérations secondaires et territoires ruraux.

A plus grande échelle, l'unité élémentaire, la maille, forme une boucle comprise entre les liens du réseau représenté comme un graphe planaire. Elle implique une surface interne bâtie ou non bornée et une surface externe régulière ou non. Avec le carroyage, la forme des mailles est carrée et régulière. Il rasterise le territoire et transforme une surface en un ensemble de surfaces élémentaires (GLEYZE, 2001). Il est utilisé dans les modèles géographiques pour prévoir une urbanisation future d'un territoire à partir du passé ou de mesurer des distances (CERTU, 2002). Pour l'EGT 2010, des modifications méthodologiques tentent de mieux prendre en compte les déplacements à pied. Le territoire régional a été découpé en carreaux de 100 m de côté au lieu de 300 m dans le cœur d'agglomération et 900 m ailleurs. La variation de la taille de la maille modifie le nombre de déplacements relevés (BONIN & LEMSSOUGUER, 2012). La dernière enquête a fait l'objet d'un traitement particulier : les secteurs EGT ; Ce sont des zones spécifiques statistiquement représentatives de l'enquête. Ils couvrent en grande partie l'IDF. Ils sont un découpage régional original. Ils renvoient aux EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale) qui sont un zonage administratif intégrant un département et dont les éléments sont des communes.

Le découpage de l'IDF, en plus d'une centaine de secteurs EGT de tirage de l'échantillon (109), soit de 11 à 16 par département, affine les résultats. Cette publication ne concerne que les jours ouvrés, hors vacances scolaires et jours fériés, du lundi au vendredi. Pour qu'ils soient représentatifs, les territoires exploités regroupent au moins de 75 000 habitants. L'échantillon représente entre 400 et 500 personnes interrogées par secteur. Les communes varient de 3 à 53. (Cf figure 3).



Figure 3: secteurs EGT

Source : OMNIL

L'approche de l'efficacité énergétique à partir d'un zonage de pouvoir nous affranchit d'hypothèses sous-jacentes, dans la construction des zonages de savoir (SCHNEE, 2014). Elle appréhende un territoire indépendant des représentations des éléments morphologiques ou relationnels dans l'interaction des territoires urbains (BERROIR, 2004). Le zonage administratif est indépendant d'une construction morphologique de l'auteur. Le zonage spatial ou les données lui sont extérieurs.

Sinon, l'analyse serait entachée d'un potentiel raisonnement circulaire : les données induisant les résultats cherchés. Une certaine « objectivité » des résultats pour l'évaluation de l'efficacité énergétique ou des relations qu'elle aurait avec les densités se dégage donc. Ces territoires ont un autre avantage : des données issues des recensements et de l'administration fiscale par communes peuvent compléter les données de mobilité. L'étude préalable des territoires qui reflète la mobilité n'a pas lieu en 2010 mais en 2009 ou en 2008. Nous considérons 2008 pour ces autres données.

1-1-3) Les zones d'actions des transporteurs

Trois transporteurs TC existent dans la région IDF.

- La RATP est issue de la fusion des compagnies de chemin de fer CMP (Compagnie du Métropolitain Parisien et d'autobus STCRP (Société de transport en Commun de la Région Parisienne) en 1946. La RATP concentre 80% du trafic sur 16% de la longueur totale du réseau Francilien et 19% des stations.
- Le métro concentre 36% du trafic des TC total et 90% du trafic TC Parisien. Contrairement aux autres transporteurs, son trafic est concentré en « zone urbaine dense » Paris et proche banlieue.
- La SNCF (Société Nationale des Chemin de Fer), créée en 1936. Elle a le même statut que la RATP (Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial). Elle regroupe deux types de circulation régionale et nationale sur son réseau en IDF.
- OPTILE (Organisation Professionnelle des Transporteurs d'Ile de France) regroupant à la fois des exploitants d'autobus (transport urbain) et d'autocar (transport interurbain). Ces (93) entreprises de transport (5000 emplois) gèrent 1000 lignes de bus.
- Elles sont, souvent affiliées aux grands groupes nationaux (CONNEX, KEOLIS, TRANSDEV, RATP DEV) qui contrôlent aujourd'hui plus de 80 % de ce marché.

La zone RATP concerne le monopole territorial de l'entreprise nationalisée après la seconde guerre mondiale (CF figure 4).

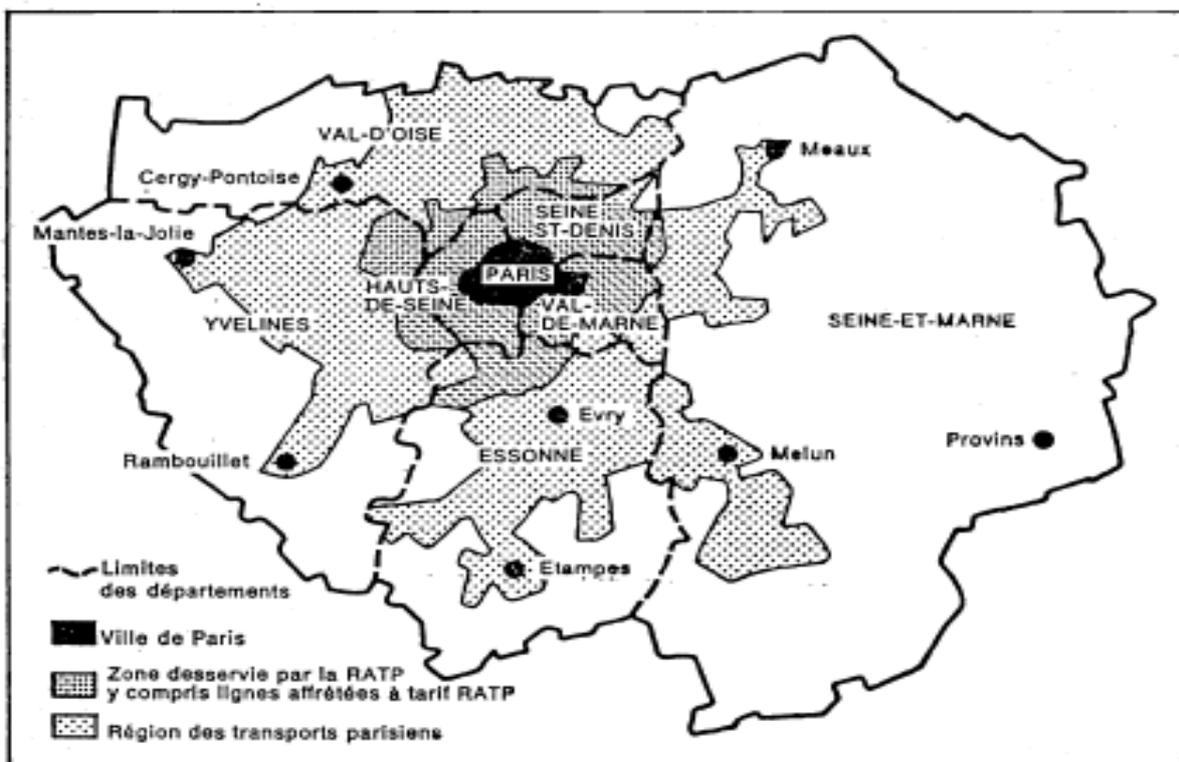


Figure 4: zone RATP

Source : RATP

C'est l'agglomération parisienne au sens du recensement de l'INSEE en 1990. C'est le territoire urbain de l'IDF même si des zones urbanisées s'étendent au-delà après la création des villes nouvelles. Elle comporte Paris et 200 communes aux alentours soit Paris et sa première couronne (PC). Les zones d'action des réseaux SNCF et RATP s'interpénètrent avec les trains de banlieue et les RER, OPTILE est en deuxième couronne. Ces zones d'action se modifient. La RATP est autorisée en 2000 à sortir de son périmètre historique pour concurrencer les entreprises privées sur les marchés émergents. En 1991, le périmètre de la région des transports parisiens est élargi à l'ensemble de l'IDF. Avec le règlement européen (Obligation de Service Public) appliqué en décembre 2009, l'union européenne ouvre à la concurrence les marchés publics, comme l'expérience Anglaise, même si elle est « régulée », ou encadrée. Le monopole naturel de certaines entreprises en réseau (EDF SNCF RATP ...) comprenait l'exploitation. « La dé-intégration » le réduit à la gestion des infrastructures et met en concurrence l'exploitation ; Actuellement, l'ouverture est programmée en 2024 pour les autobus, 2029 pour le tramway et 2039 pour les réseaux ferrés. Avec la libéralisation du secteur, la RATP étend sa zone d'intervention en rachetant des entreprises en IDF. Cette extension était marginale en 2008. L'établissement public est encore en monopole sur la zone historique en 2022.

1-1-4) Les sources de données utilisées TC

Les statistiques générales de la RATP regroupent tous les indicateurs de fonctionnement (offre de transport, demande (charge moyenne etc...), les infrastructures (nombre de stations, longueur des lignes), les parcs matériels (type de matériel, nombre) et les consommations. Nous disposons de données détaillées (taux d'occupation consommation...) de 138 lignes de bus Paris et banlieue. L'enquête TJRF (Trafic Jour Ouvrable Réseau ferré) de 2008 détaille le trafic entrant des stations du réseau ferré (métro et RER). Pour avoir un échantillon représentatif de la population, elle se déroule par point d'entrée, au moins une heure dans chaque tranche horaire (6h-9h30, 9h30-12h, 12h-14h, 14h-16h30, 16h30-19h30, 19h30-21h). Le taux de sondage moyen est de 5%, soit une personne sur vingt. Il varie selon la station, il est à 3% à Saint Lazare avec 100 000 entrants/jour, 7% pour une station de 10 000. La précision des résultats est de moins de 1% par réseau et entre 5% et 10% par station. Les interviews sont effectuées sur terminaux portables et l'enquêteur vérifie la validité du déplacement annoncé. En cas d'incohérence il repose sa question au voyageur. Les questionnaires erronés sont corrigés si la logique du déplacement est reconstituée. Sinon, ils sont rejetés. Pour obtenir des résultats sur l'ensemble de la population des voyageurs du réseau, un poids à chaque questionnaire est attribué, selon les personnes entrantes dans la station lors de l'interview. Il est égal au nombre d'entrants dans la station divisé par le nombre de personnes interrogées. La pondération est calculée par ligne de contrôle et par demi-heure. Dans certains cas, (trafic élevé, arrivée SNCF...) les poids par tranche de dix minutes sont affinés. Seul le trajet domicile travail apparaît dans les motifs de voyage. La répartition spatiale des flux d'entrants pour le réseau ferré est connue par stations et gares.

Ces résultats sont recoupés avec le compteur des appareils de contrôle qui recense des données de trafic toutes les 10 minutes à l'entrée des stations. Néanmoins, les fraudeurs sont absents. Des pannes surviennent. Les fichiers sont corrigés et rassemblés sous formes d'historiques mensuels et annuels selon les jours. Trois types de données existent : les entrants, les correspondants, les sortants. Pour les stations de RER les trois types de données existent le métro ne dispose que du premier. Les relevés des appareils de contrôle distinguent l'heure de passage et les jours (jour ouvrable, samedi, dimanche). Nous disposons des données pour l'année 2004. Nous disposons de la courbe de charge du réseau ferré (métro + RER) qui est la consommation horaire quotidienne de la même année de la RATP. Pour la SNCF plusieurs types de circulation existent sur les réseaux ferrés de l'IDF (circulation nationale et régionale).

Les données OPTILE sont indisponibles. Les consommations unitaires doivent être reconstituées pour ces réseaux. Deux consommations unitaires de la SNCF et d'OPTILE issues d'une étude de 2004 (ENERDATA, 2004) nous le permettent. D'autres données (trafic offre) viennent de l'OMNIL (Observatoire de la Mobilité en Ile de France) qui regroupe les données des transporteurs de l'IDF. L'étude UITP (Union Internationale des Transporteur Public) (UITP, 2001) a recensé une centaine d'indicateurs, concernant les aspects de la mobilité urbaine dans 52 métropoles qui ne sont pas toutes exploitables. Certains seront détaillés ensuite. Ils sont basés sur les définitions des « urban métropolitan aera » qui est un compromis de recherche définissant des aires urbaines selon le déplacement domicile travail. Elle recoupe ou non des aires administratives. Pour les transports publics trois règles définissent les périmètres dans l'intégration des indicateurs :

1. Les services entre les CBD (Central Business District), ou les villes centres de « l'urban métropolitan aera », et l'extérieur de l'aire urbaine, sans arrêt intermédiaire entre la station extérieure à l'aire urbaine concernée et le départ de la ville centre, ne sont pas comptés
2. Les services qui opèrent dans l'aire urbaine sont comptés dans leur totalité.
3. Les indicateurs de demande excluent les passagers qui entrent dans le réseau par l'intermédiaire de station située à l'extérieur de « l'aire urbaine ».

Les données de l'énergie fossile ne concernent que les consommations des véhicules. Pour l'électricité nous reprendrons plus loin la méthode de la base UITP en explicitant le calcul dit à la source.

1-1-5) Les sources de données utilisées VP.

Le CTN (Commission des comptes transport de la Nation) calcule les consommations unitaires spécifiques. Il effectue le ratio entre les consommations du CPDP (Comité des Professionnels du Pétrole) et les calculs de trafics par type de véhicules (VL PL). Pour les consommations unitaires, nous disposons de deux séries nationales CTN (Compte Transport Nationaux) de 1975 à 1990 et 1990 à 2014 pour l'essence et le diesel. Elle donne aussi un taux de remplissage.

Les données de consommation issues de CPDP (Comite des Professionnels du Pétrole) se déclinent selon 4 catégories de carburant mesurés en tonnes et en mètre cube :

- GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié)
- Les biocarburants
- Essence et super avec une distinction possible entre ces deux produits.
- Gasoil, avant 1982, ses données sont mélangées avec le fioul léger et domestique.

Les consommations sont réparties par véhicules : Voiture particulière française (VP), Véhicule utilitaire léger français (VUL), Poids lourds Français (PL), Voiture et petits véhicules utilitaires étrangers, poids lourds étrangers, Autocars (TC). Pour les véhicules diesel, aucune distinction n'existe entre les voitures et les autres véhicules (PL). L'essence et le gasoil sont les principaux carburants. Pour l'essence le supercarburant est plus ou moins "plombé".

L'addition de plomb limitait la détonation du carburant mais posait des problèmes de santé avec l'émission de particules dans l'atmosphère. Les ventes des produits pétroliers sont déclinées mensuellement par région. Depuis 1962 la progression du gasoil dans la consommation est patente en tonne équivalent pétrole (TEP). (Cf Tableau 2).

Tableau 2: données de vente en IDF		
Années	ESSENCE TEP	GASOIL TEP
1962	824	6.45
1968	1466	22.77
1975	2196	78.60
1982	2445	292.575
1990	2767	532.48
1999	2192	1051.17
2008	1388	2101.68

Source calcul de l'auteur.

L'acquittement de la TICPE (Taxe Intérieur de Consommation des Produits Energétiques) permet de suivre la quantité vendue des produits pétroliers mensuellement par région.

Mais elle ne reflète pas leur consommation sur les territoires. Des véhicules, hors région parisienne, font le plein en IDF. Plus les surfaces se réduisent, plus l'incertitude augmente interdisant leur utilisation sur une grande échelle. Avec ces données, l'analyse des consommations des secteurs de l'IDF est impossible. Nous nous orientons alors vers des reconstitutions de mesure pour ce mode à partir du panel SECODIP. Ce panel, représentatif du parc national des VP, se compose de 3 300 personnes disposant d'une automobile. Un carnet, relevant le kilométrage au compteur, est renseigné à chaque achat de carburant. Jusqu'en 1995, les informations étaient renvoyées chaque semaine, depuis 1996, les carnets portent sur une quinzaine de jours pour l'exploitation. Les usagers chiffrent l'utilisation habituelle du véhicule. Même si elles présentent des inconvénients (GALLEZ, 1995), les biais de sélection, l'étude suit les mêmes individus et ménages sur plusieurs vagues annuelles consécutives avec 12 critères pour les ménages et voitures.

Certains critères de redressement sont modifiés en 2000 (avec rétopolation à partir de 1998) pour mieux représenter les kilomètres parcourus. Les données nationales sont comparables aux données du CTN. Les écarts entre les valeurs varient entre 5% et 0%. En IDF, la DIRIF mesure des circulations des principaux réseaux routiers dits « instrumentés ». Le comptage est divisé en 4 zones. La notion de R1 correspond aux Radiales entre le Boulevard Périphérique (BP) et l'A86 et la notion de R2 sont les Radiales entre l'A86 et la Francilienne. La Francilienne est un anneau routier située entre la première et la deuxième couronne, l'A86 entre la première couronne et le BP. En volume, le trafic annuel moyen journalier (TMJA) est estimé en véhicule/jour. Le volume de trafic (QL) s'exprime en véhicules x kilomètres et renvoie à la distance parcourue par l'ensemble des véhicules circulant sur le réseau pris en compte durant une période donnée. Il ne renvoie pas à des individus. Ces véhicules sont de différents types (voiture, poids lourd etc..). Leur distance parcourue sur les radiales est absente des enquêtes régionales ou départementales. La ville de Paris enregistre les circulations du boulevard périphérique (BP) et à l'intérieur de Paris ; Pour les données de parc EGT nous mobiliserons une étude de 2015 (ANDRE & al, 2015).

1-2) Les sources d'énergies des systèmes de transport en IDF.

1-2-1) Le pétrole (carburant usuel)

Le pétrole est un liquide extrait et raffiné. Les réserves se situent principalement au Canada, en Russie et au proche et moyen orient. (Cf Figure 5)

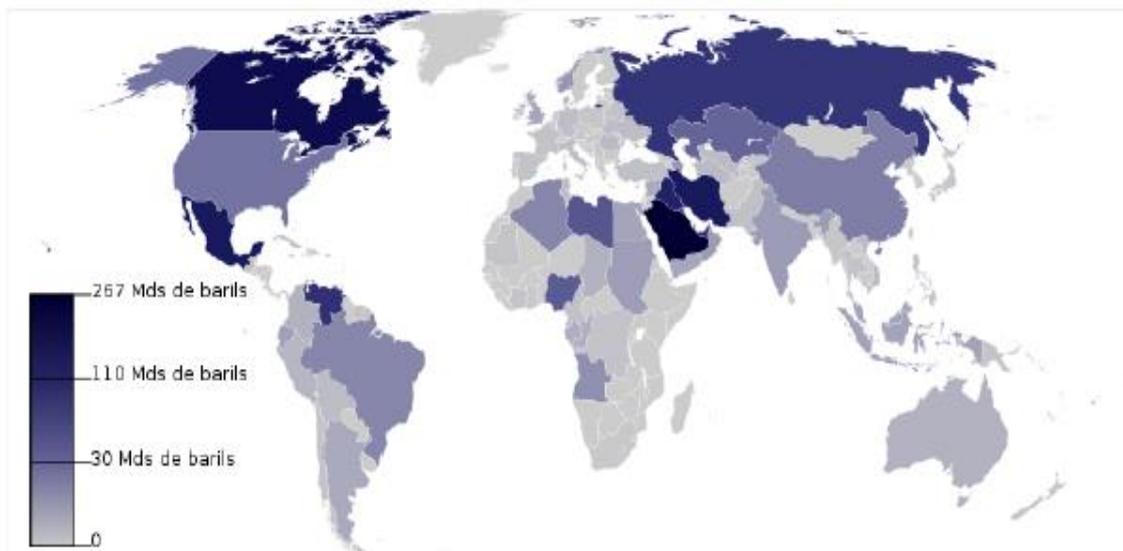


Figure 5: carte réserves prouvées.

Source CIA world factbook.

Elle se classent en trois catégories :

1. Les possibles exploitables à un coût similaire aux réserves prouvées avec une probabilité de 10%.
2. Les probables sont exploitables à des coûts similaires aux réserves prouvées à 50%.

3. Les prouvées sont exploitables avec une probabilité de 90% avec des coûts de production qui restent inférieurs à 20\$ le baril (un baril = 150 litres). Leur exploitation dépend des progrès dans les techniques utilisées.

Le pétrole extrait va vers les lieux de raffinage dont les capacités se situent en Europe aux USA et en extrême orient. Les raffineries produisent des carburants. Ce sont « l'ensemble des produits (liquide ou gazeux) dont la combustion en présence d'air permet le fonctionnement des moteurs thermiques que ceux-ci soient à piston (essence ou diesel) ou à flux continu (réacteur d'avion). » (GUIBET JC FAURE, 1997). (Cf Tableau 3).

Tableau 3 : capacité de raffinage

Évolution de la capacité de raffinage⁽¹⁾ dans le monde (millions de tonnes, %)

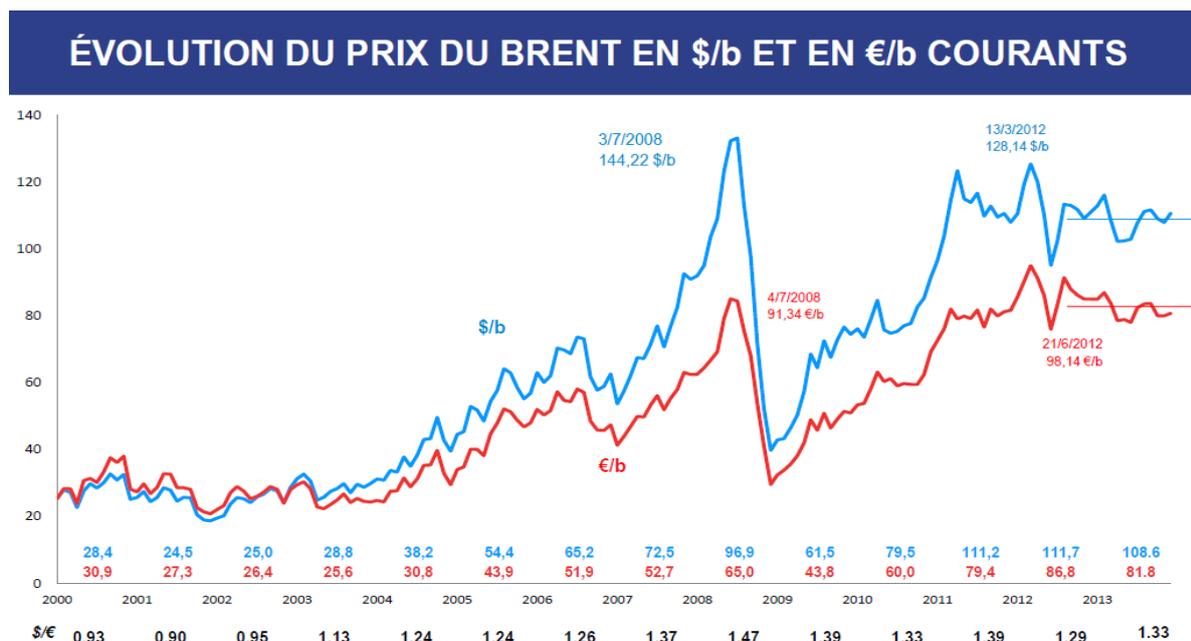
	1978	2009	2010
CAPACITÉ MONDIALE (Mt)	3.921	4.360	4.412
<i>dont (%)</i>			
<i>Europe dont</i>	43,1	28,9	28,3
<i>Russie</i>	16,6	6,2	6,2
<i>Proche-Orient</i>	4,5	8,3	8,3
<i>Extrême-Orient / Océanie</i>	14,6	27,0	28,2
<i>Amérique du Nord</i>	25,1	22,7	22,4
<i>Amérique Latine</i>	10,6	9,3	9,2
<i>Afrique</i>	2,1	3,8	3,6
TOTAL	100,0	100,0	100,0

⁽¹⁾ capacité de raffinage en fin d'année
Source: Comité Professionnel Du Pétrole (France)

Source : Comité professionnel du pétrole.

Les produits, brut et raffiné, dépendent de marchés financiers différents (NYMEX (New York Market Exchange) pour le premier et Rotterdam en Europe pour le second). De 28\$ en 2000 le baril, la moyenne des prix est à 111\$ en 2011. Cette hausse est significative après une longue période de stagnation des prix dans les années 80-90. Néanmoins, de fortes variations existent (Cf Graphique 2).

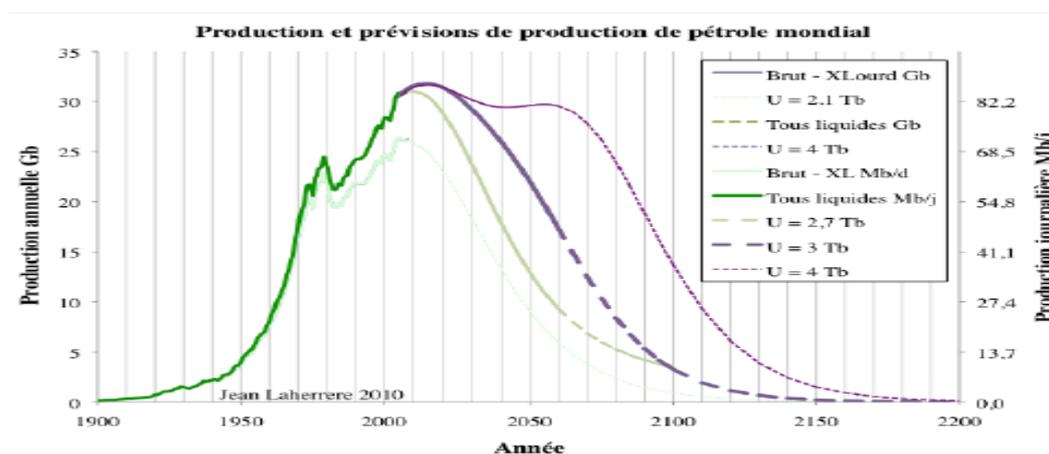
Graphique 2: prix du baril



Source UFIP

L'étude statistique de Mario K Hubbert prévoyait l'épuisement des ressources aux USA. Une courbe montrant la fin de la production suit celle des découvertes avec un décalage (PREDIT, 2010) de 33ans. Etendue aux gisements actuels, elle conduit à la notion de Peak-oil ou pic de Hubbert. Le scénario commun est le début de la phase de déclin en 2020 avec une période plateau (Bumpy plateau) avant une extinction des ressources impliquant une hausse tendancielle des prix. (Cf Graphique 3)

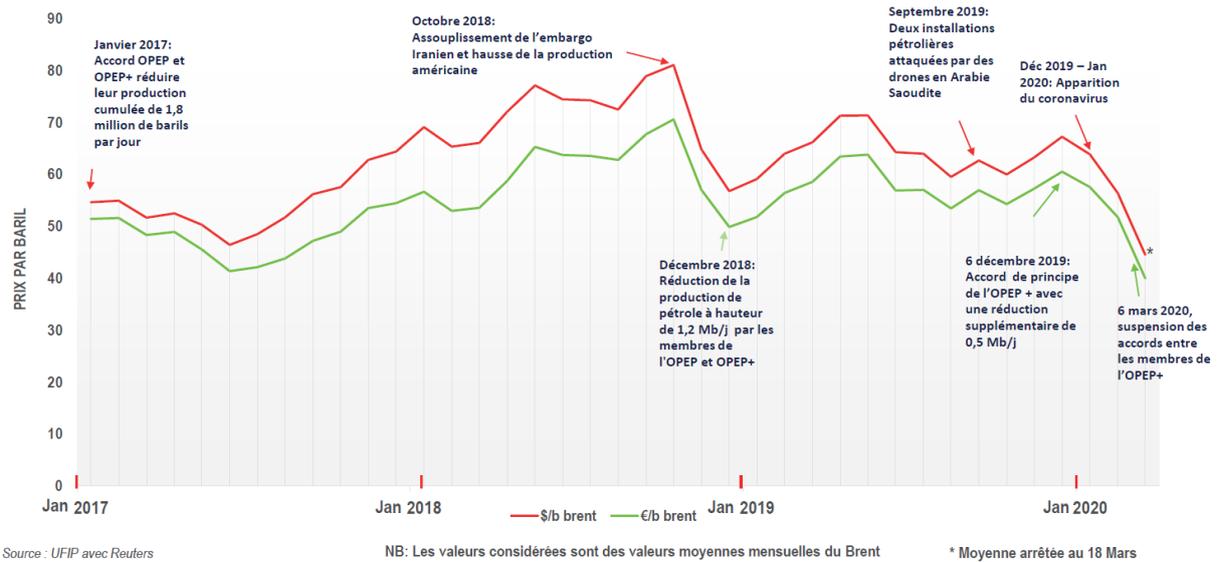
Graphique 3 : pic de Hubbert



Source: prédit 2010.

Néanmoins, dans les 4 dernières années, nous constatons une baisse due à des événements conjoncturels (Augmentation ou baisse des volumes de la part des pays producteurs, accords internationaux, terrorisme, pandémie). (Cf Graphique 4)

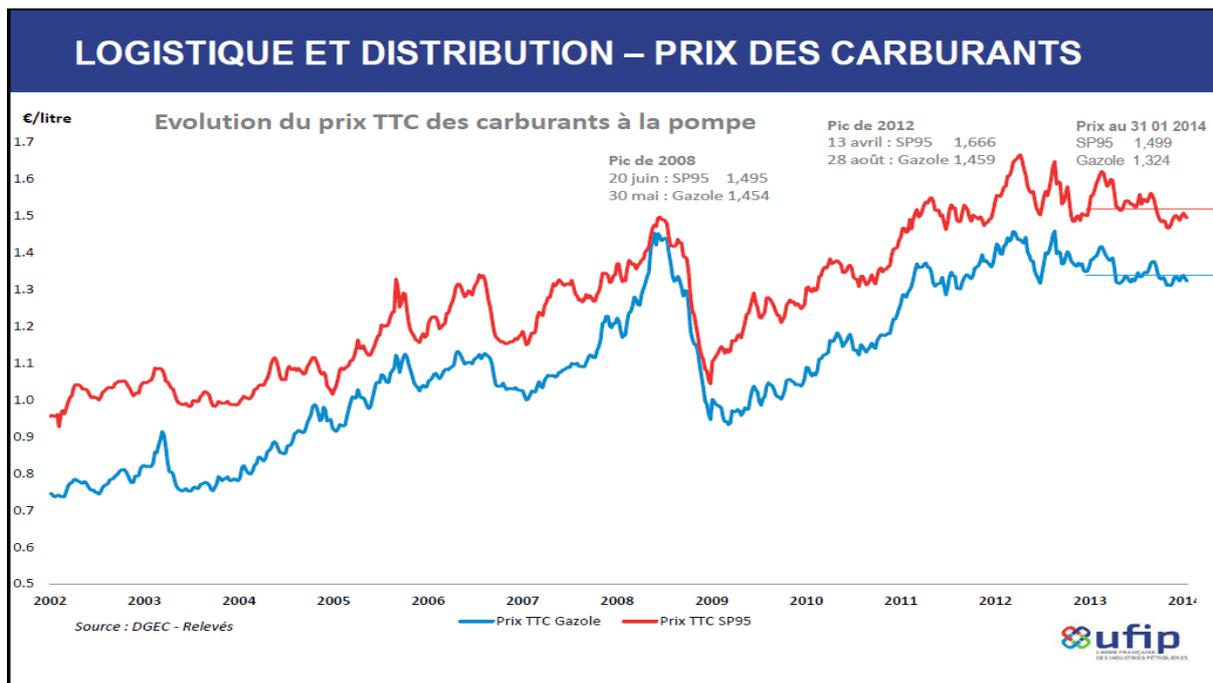
Graphique 4: cours du Brent



Source : UFIP

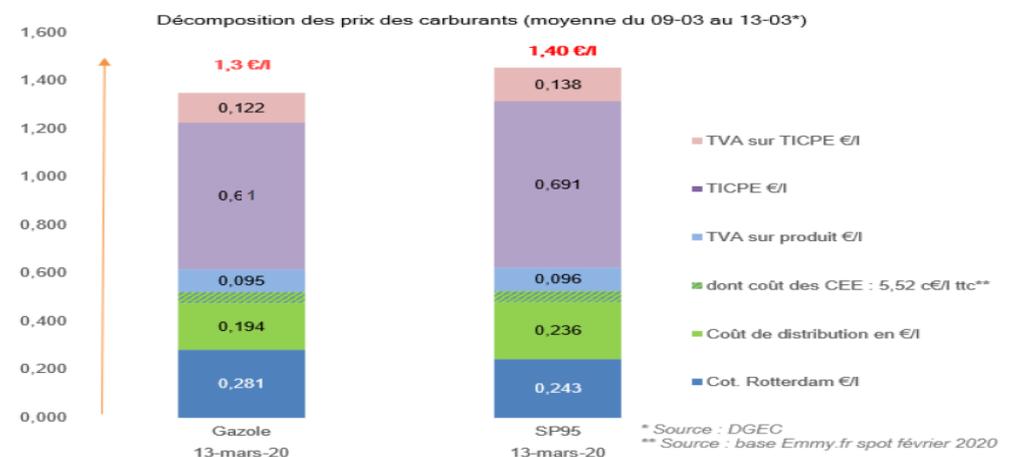
De même, l’augmentation de la production de pétrole de schiste, modifie le marché. Même s’il reste plus cher en termes de coûts de production que les gisements exploités à l’heure actuelle (50\$/baril contre 10 à 30 pour les gisements au moyen orient), les USA exportent du pétrole grâce à cette nouvelle technologie. Cette hausse lors de la dernière décennie implique une croissance des coûts du carburant à la pompe. La raréfaction du pétrole et son coût dépendent aussi de la demande, baisse de la croissance économique, ou de l’intensité énergétique pour une croissance donnée, grâce à des politiques de « découplage » (ALLAIRE 2007). Avec les progrès technologiques et les nombreuses variables, le scénario de hausse continue des prix avec la raréfaction de la ressource n’est pas nécessairement pertinent. Des chocs et des incertitudes s’y ajoutent (Cf Graphique 5)

Graphique 5: prix des carburants a la pompe.



En France, les coûts après raffinage et distribution (intégrant les certificats d'Economie d'Energie CEE) sont majoritairement issus de la fiscalité (TVA TICPE). Même si des variables d'ajustement (fiscalité, technologie) existent, l'augmentation structurelle des prix du carburant pose un problème social : la crise des « gilets jaunes » provient d'une hausse des prix due à la fiscalité. (Cf tableau 4)

Tableau 4: prix du litre à la pompe en France.



Source : UFIP

De plus, cette énergie émet des GES (Gaz à effet de serre) dans la production et son usage. L'effet de serre est un processus naturel qui réfléchit les rayonnements électromagnétiques du soleil ce qui tempère la surface de la planète. Il existe 6 sortes de GES : CO₂ (Dioxyde de carbone), le CH₄ (Méthane), N₂O (Oxyde d'azote), HFC (hydrofluorocarbure), PFC (Perfluorocarbure), SF₆ (Hexafluorure de soufre). Dans l'atmosphère, leurs effets sont différenciés. L'indicateur Pouvoir de Réchauffement Global d'un gaz (PRG) regroupe, sous une seule valeur, l'effet additionné des substances qui augmentent l'effet de serre. Pour un gaz donné, le PRG est le facteur par lequel il faut multiplier ses émissions pour obtenir la masse de CO₂ qui produirait un impact équivalent. Même si des « climato-sceptiques » le contestent, l'émission de GES contribue au réchauffement climatique, ce qui modifierait l'environnement avec des conséquences pour l'humanité impossibles à appréhender. Plusieurs secteurs sont responsables des émissions (CITEPA, 2015). Le transport est divisé en deux sous-secteurs. (Cf Tableau 5).

Tableau 5: émission de CO₂. (Million de tonnes)

Années	1990	2000	2010	2019
Transport routier	115,9	133,6	130,2	127,2
Dont VP et VUL	86,2	97,2	95,4	92,4
Autres transports	7,8	9,8	7,9	8,2

CITEPA 2019

Le secteur routier regroupe 15 sous-secteurs allant des voitures particulières (VP-VUL) aux poids lourds (PL) et les autres transports regroupent le ferroviaire le fluvial, le transport maritime domestique et l'aérien. Les émissions des autres transports par rapport à celles du transport routier sont faibles.

Même si nous constatons une baisse depuis 2000, la croissance des émissions de CO₂ dues aux voitures particulières est de l'ordre de 7 % depuis 1990. Ce fort impact montre l'influence de l'usage de l'énergie fossile dans la motorisation des voitures (CETU, BERGNAUD, 2011).

1-2-2) L'origine de la production d'électricité en France

L'électricité d'origine nucléaire produit 80% de la consommation et l'hydraulique (12%). La production d'électricité en France émet peu de CO₂. (Cf Figure 6)

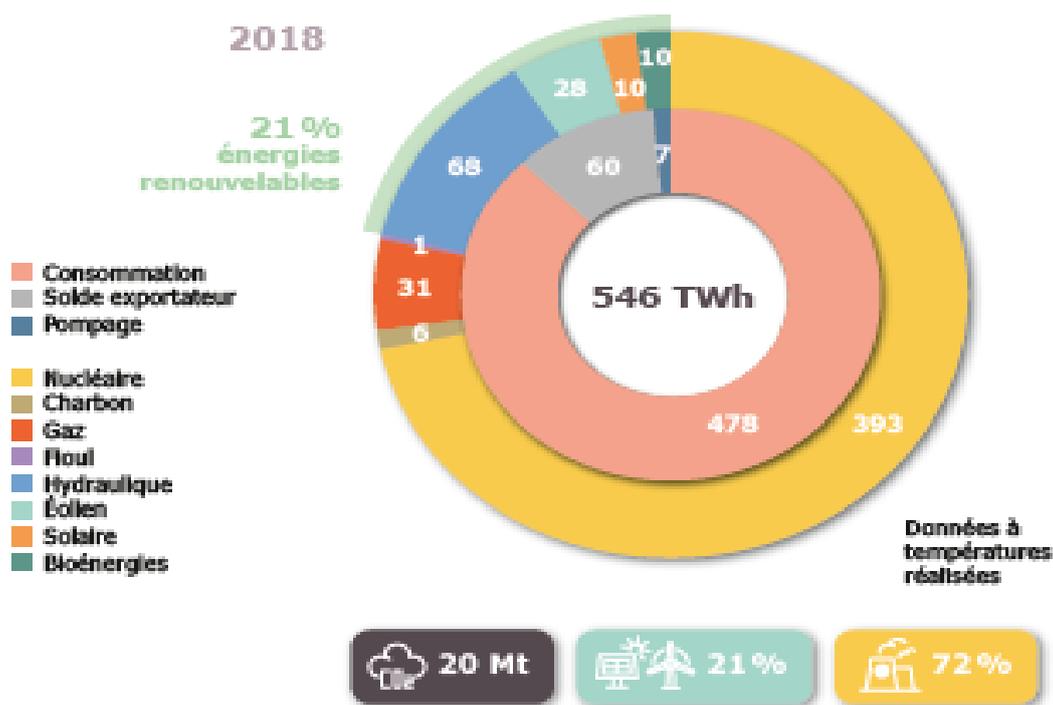


Figure 6: mix énergétique France.

Source : ADEME

L'électricité d'origine nucléaire produit des déchets classés selon l'activité haute (HA) faible (FA) très faible (TFA). Certains sont à « vie courte » d'autres à « vie longue ». En physique, la vie « courte » ou « longue » détermine la durée du retour au niveau naturel d'énergie d'un atome. Avant, il émet de l'énergie (radiation). Certains déchets mettent des milliers d'années « vie longue » d'autres vont plus vite « vie courte », (300 ans) certains émettent un fort rayonnement, « haute activité », d'autres un plus faible. Les TFA n'excèdent pas la radioactivité naturelle. Certains déchets ne peuvent donc être rejeté dans la nature. Si le confinement garantit un certain niveau de sécurité, les débats portent sur sa fiabilité (Cf Tableau 6).

Tableau 6 : volume de déchets nucléaires

Tableau 2 – Estimation de l'évolution des volumes (en m ³ équivalent conditionné) de déchets.			
	Volumes (m ³) fin 2004	Prévision des volumes (m ³)	
		pour 2010	pour 2020
HA (Haute Activité)	1 851	2 500	3 600
MA-VL (Moyenne Activité, Vie Longue)	45 518	49 500	54 900
FA-VL (Faible Activité, Vie Longue)	47 124	48 400	105 000
FMA-VC (Faible et Moyenne Activité, Vie Courte)	793 726	929 000	1 200 000
TFA (Très Faible Activité)	144 498	300 000	581 000

Source : CNRS

Ensuite, l'accident de Tchernobyl ou de Fukushima montre la dangerosité du système. S'il s'agissait d'une erreur humaine (AMPERE, 2000) pour le premier, dans le second les procédures de sécurité furent respectées, mais les événements naturels provoquèrent une catastrophe. La fiabilité du système et sa prolifération, interrogent même si les techniques des réacteurs diffèrent. La production d'électricité reste locale, les transports et les pertes en ligne limitent l'éloignement des lieux de production et de consommation. L'électricité se stocke mal, et doit être consommée sous peine d'être perdue. En France, le marché se substitue au monopole public. Deux tarifications existent, les prix du marché (contrat éligible) et les tarifs réglementés (soumis à la loi) qui devraient disparaître en 2021. (Cf Figure 7)

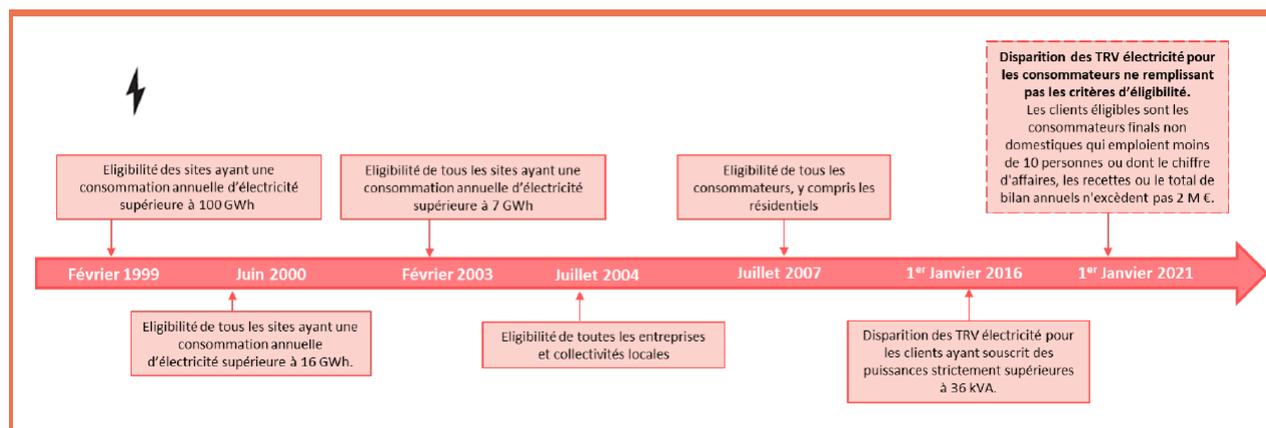


Figure 7: Evolution des modes de tarification

Source CRE

Les prix de l'électricité (en base 100) augmentent malgré des disparités selon les secteurs de consommation et le fait que l'uranium ne voit pas ses cours augmenter (Cf Tableau 7).

Tableau 7 : prix de l'électricité par secteur

En €/MWh

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Energie (hors électricité)	81	83	85	85	87	79	77	82
Consommation finale TTC*	99	103	110	114	118	115	116	119
Agriculture	87	88	89	102	106	109	111	118
Industrie	66	67	70	71	71	66	64	66
Transports	80	82	83	83	83	74	71	79
Tertiaire	94	97	103	107	112	104	107	107
Résidentiel HTVA	114	118	125	133	138	140	141	146
Résidentiel TTC	134	138	147	157	162	165	166	171
Tous secteurs hors TVA	92	96	101	105	109	106	107	110
Tous secteurs avec TVA*	99	103	109	114	118	115	116	119

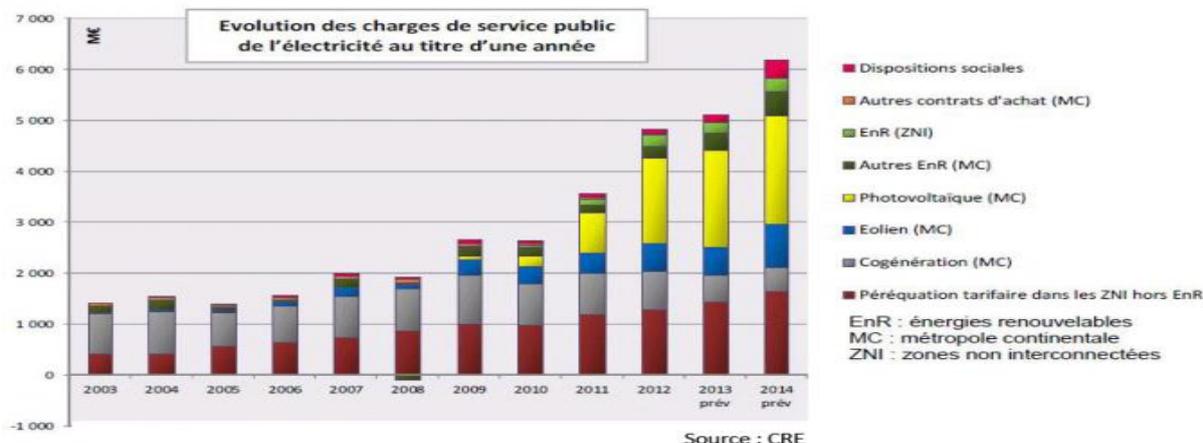
* TVA incluse uniquement pour le secteur résidentiel.
Source : calculs SDES

Source : SDES

Néanmoins, les prix dépendent de la fourniture et de l'acheminement (réseau) 32% du prix global (CRE, 2018). Plus la puissance et les consommations sont faibles plus les coûts d'acheminement dus à la transformation de l'électricité augmentent. Trois taxes augmentent (Cf graphique 6):

1. La CTA (contribution Technique à l'acheminement qui sert à l'entretien des réseaux.
2. La TCFE qui est la taxe communale sur la fourniture d'énergie.
3. La CSPE (Contribution service public de l'électricité) qui finance le développement des énergies renouvelables (ENR (photovoltaïques en particulier).

Graphique 6 : Evolution des charges service public



Source CRE

1-3) La mesure de l'énergie.

1-3-1) L'unité de référence.

Les différentes mesures des sources d'énergie nécessitent une conversion une unité unique Joule (J) ou Tonne équivalent pétrole (TEP). La France jusqu'en 2001 utilisait les coefficients d'équivalence énergétique de l'Observatoire de l'Énergie en 1983. Ce dernier adopte en 2002, une méthode commune aux organisations internationales concernées (Agence Internationale de l'Énergie, Eurostat...).

Le PCI (pouvoir calorifique inférieur) est la quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète d'un produit. C'est la chaleur « sensible » (hors vaporisation de l'eau) dégagée lors de sa combustion par oxygène (GUIBET JC, 1997). Elle dépend de contraintes mécaniques et thermodynamiques et s'exprime g/Kwh. Le niveau du PCI implique une plus ou moins grande quantité de produit dans la libération d'énergie (explosion) nécessaire au mouvement du mobile. (Cf Tableau 8).

Tableau 8 : unité physique des énergies en joules en PCI			
Énergie	Unité physique	En Giga-joules	En TEP
Charbon			
Houille	1 t	26	26/42 = 0,619
Coke de houille	1 t	28	28/42 = 0,667
Agglomérés et briquettes de lignite	1 t	32	32/42 = 0,762
Lignite et produits de récupération	1 t	17	17/42 = 0,405
Pétrole brut et produits pétroliers			
Pétrole brut, gazole/fioul domestique, produits à usages non énergétiques	1 t	42	1
GPL	1 t	46	46/42 = 1,095
Essence moteur et carburéacteur	1 t	44	44/42 = 1,048
Fioul lourd	1 t	40	40/42 = 0,952
Coke de pétrole	1 t	32	32/42 = 0,762
Électricité			
Production d'origine nucléaire	1 MWh	3,6	0,086/0,33 = 0,26.
Production d'origine géothermique	1 MWh	3,6	0,086/0,10 = 0,86
Autres types de production, échanges avec l'étranger, consommation	1 MWh	3,6	3,6/42 = 0,086
Bois	1 stère	6,17	6,17/42 = 0,147
Gaz naturel et industriel	1 MWh PCS	3,24	3,24/42 = 0,077

Source DGEMP (Direction Générale l'Energie et les Matières Premières)

La masse volumique, du carburant à 25 degrés est le rapport entre les deux PCI (Pouvoir Calorique Inférieur) massique et volumique. Elle donne la masse de matière contenue dans un Dm^3 . La méthodologie explique la différence entre les calculs effectués (0.768) et les données utilisées par le CPDP (0.744) (Comité Professionnel Du Pétrole). (Cf Tableau 9).

Tableau 9 : masse volumique et PCI			
Produit	PCI volumique (Kj/Dm ³ à 25°) PCI _v	PCI Massique (Kj/Kg à 25°) PCI _m	Masse volumique Mv (Kg/Dm ³ à 25983°)
Supercarburant	32 990	42 900	0,768
Gazole	35 785	42 600	0,84

Source : JC gibet E Faure

Les coefficients renvoient au joule qui est l'unité adéquate pour comparer des différents vecteurs énergétiques. Pour passer d'un litre de carburant (Dm^3) en joule la formule est donc (Cf Equation 1) :

$$\text{Litre gazole} \times \text{Masse volumique} \times 42 = \text{joule (1)}$$

Source : auteur

1-3-2) Les types de carburants.

Des carburants alternatifs existent. Certains sont reformulés à partir du pétrole.

Pour la RATP, les mélanges binaire (Mélange alcool et essence) et ternaire (mélange alcool essence et benzène) ont été utilisés depuis plus de 50 ans avant d'être abandonnés. Les « biocarburants » sont principalement l'éthanol et l'ester auquel on ajoute l'aquazole.

L'éthanol sert de base à l'ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether). Il est incorporé aux essences à une hauteur de 15%. Le bioéthanol ED 95 implique une motorisation (ADEME, 2018) et des infrastructures spécifiques de stockage pour les flottes captives.

L'aquazole se compose de 13% d'eau et de 87% de gazole. Il rejette moins de CO₂. L'EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale) vient de l'huile de Colza ou de Tournesol. Il est incorporé dans les gazoles ou le fioul domestique à une hauteur de 5%.

D'autres viennent du gaz, il s'agit des carburants de synthèse. Le GTL (Gaz to Liquid) est un gaz liquéfié se substituant au gazole sans modification de la motorisation. Environnementalement, il réduit les oxydes d'azote (NOx) et les oxydes de carbone (CO). En termes de CO₂ ou de consommation de carburant c'est équivalent au gazole.

Le GPL (Gaz de Pétrole liquéfié) mélange les hydrocarbures légers, butane et propane, stocké à l'état liquide 40 % vient du raffinage du pétrole et 60 % du traitement du gaz naturel.

Le GNV (Gaz naturel pour véhicule) regroupe le GNC (Gaz Naturel Comprimé) et le GNL (Gaz Naturel liquéfié) selon leur stockage puisque le premier est stocké à l'état liquide et le second à l'état gazeux. Il est principalement composé de méthane (CH₄).

Le GNC nécessite des installations de stockage spécifique sur le véhicule (électrovanne) et un moteur spécifique. Vis-à-vis du moteur diesel les gains sont faibles en termes environnementaux (ADEME, 2018). La filière « bioGNC » diminue la quantité de méthane pour le substituer d'autres composants et en particulier du CO₂ issu de déchets organiques indésirables. Ses gains environnementaux sont plus forts que le GNC classique en CO₂.

Le GNL (Gaz naturel liquéfié) provient du refroidissement du gaz naturel pour le mettre dans un état liquide. Il est composé en grande partie de méthane. Sa masse volumique est plus importante que celle du GNC ce qui le rend plus efficace. L'extraction du dioxyde de carbone (CO₂) et des oxydes d'azote (NOx) le rendent peu polluant. Il nécessite des réservoirs cryogéniques et des moteurs spécifiques. Il n'y a pas de gain environnemental. Il est utilisé pour le transport de marchandise.

A la RATP, outre le gazole trois carburants étaient utilisés en 2008 : l'aquazole, le GPL et le GNV. Le tableau montre les baisses de rendement des moteurs issus de l'utilisation de ces carburants ce qui augmente leur consommation pour une même distance parcourue. (Cf Tableau 10).

Tableau 10 : carburant et rendement du moteur RATP.	
Carburants	Rendement énergétique
Gazole en litre	23,56%
Aquazole en litres	21,00%
Filières GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié)	18,05%
Filière GNV (Gaz naturel véhicule)	15,63%

Source : RATP

Le HVO (Hydrotreated Vegetable Oil ou Huiles Végétales Hydrotraitées) est un produit similaire au gazole. Il permet une réduction de 50% des émissions de GES. Ce carburant n'est pas encore disponible en France. L'hydrogène est aussi un carburant potentiel du fait de ses faibles émissions de CO₂. Il existe néanmoins des difficultés de stockage non négligeables et une inflammabilité forte au contact de l'air libre. Aussi des expérimentations (flotte de bus de Dunkerque (YU, 2012) ont lieu pour limiter cet aspect avec un mélange de gaz et d'hydrogène.

1-3-3) Le périmètre d'évaluation de la consommation d'énergie.

La mesure des consommations pour un véhicule a plusieurs périmètres (PICHERIT, 2010):

1. well-to-wheels du « Puits à la roue ». Elle regroupe la production de l'énergie le Transport (pompe ou bornes de recharge) et l'usage.
2. well-to-tank du puit au réservoir, Production de l'énergie Transport jusqu'à la pompe ou bornes de recharge
3. Cradle-to-gate « Du berceau à la porte de l'usine » Production de l'énergie pour construire le véhicule.
4. Cradle -to-grave « Du berceau à la tombe » Transport Production, usage, élimination de la voiture, route et infrastructure de recharge.

Les calculs effectués viennent de l'ACV (analyse du cycle de vie du produit) qui quantifie, lors du cycle de vie, les flux de matières, d'énergies et les rejets pour le bilan environnemental.

Les normes ISO (International Standard Organisation) 14 040 et ISO 14 044 (ISO 14 040, 2006), (ISO 14 044, 2006) définissent cet outil. Les constructeurs l'appliquent aux véhicules et de nombreuses études publiées l'utilisent pour comparer les solutions alternatives aux véhicules classiques (PICHERIT, 2010, ADEME 2012). Il est aussi utilisé pour évaluer les biocarburants, les comparer aux carburants fossiles, et identifier les étapes les plus polluantes de leur production. Selon le périmètre de l'analyse les résultats varient donc considérablement tant sur l'énergie consommée que sur les impacts d'une motorisation ou une autre (ADEME, 2011). En effet, l'intégration de variables dédiées à la fabrication ou à la distribution d'énergie, modifient des résultats qui favoriseraient l'une ou l'autre motorisation à l'usage comme le véhicule électrique. Plus efficace et respectueux de l'environnement à l'usage, ce n'est plus le cas sur l'ensemble de la filière (« cradle to grave ») (ADEME 2011) avec un usage plus faible que la voiture diesel. Les ressources (métaux) leur extraction et l'énergie de transformation pour produire le véhicule modifient les résultats. Néanmoins la méthode « cradle to grave » ou « Cradle-to-gate » accroissent le nombre et l'incertitude des variables (PICHERIT, 2010). Nous nous concentrons donc sur l'usage du véhicule pour être cohérent avec notre interrogation sur la relation densification et efficacité énergétique. L'énergie sous différentes formes (pétrole électricité etc...) se transforme (CHABROL, 2016). L'énergie utile sert à l'exécution du service. L'énergie primaire est l'énergie nécessaire pour extraire la richesse.

L'énergie secondaire est l'énergie de production du carburant. L'énergie finale est un intermédiaire entre l'utile et la secondaire. Nos données mesurent deux périmètres de consommation d'électricité (UITP, 2001) :

1. Le périmètre du véhicule ou du réservoir au moteur. 1 Kwh = 3.6 MJ (Mégajoule)
2. La consommation « à la source ». Les pertes dues à la transformation thermodynamique de la chaleur pour produire l'énergie avec des générateurs sont intégrées. L'électricité renvoie à la centrale de production. 1 Kwh = 9 MJ soit la méthode « well-to-wheels ». Elle renvoie à l'énergie secondaire.

Dans la conversion de l'énergie, deux coefficients pour l'électricité apparaissent (Cf Tableau 11)

Tableau 11 : Coefficient de conversion en TEP électricité			
Origine de la production	Unité électrique	Energie finale	Energie primaire
Nucléaire	1 MWh	0.086	0,26.

Source DGEMP (Direction Générale l'Énergie et les Matières Premières)

1. $0.086 = 3.6/42$ puisque $1 \text{ Mwh} = 3.6 \text{ GJ}$ et $1 \text{ TEP} = 42 \text{ GJ}$ c'est l'énergie utile.
2. $0.086/0.33 = 0.26$. 0.33 vient du rendement de la première loi de la thermodynamique.

Les technologies le font évoluer. Pour les centrales thermiques, il est passé de 31.9% en 1972 à 38%. Le rendement de l'énergie est de 1 pour les éoliennes. En France, un rapide calcul effectué à partir des consommations d'énergie, donne un rendement global de 0.43, proche des données UITP ($0.086/0.4 = 9/42$). Les pertes en ligne du transport et la distribution d'énergie des câbles en amont du point d'alimentation issues de l'effet Joule sont absentes. Elles sont d'environ 2% à 3% sur le réseau du RTE (réseau de transport d'électricité) 6% sur le réseau de distribution d'ERDF (Electricité Réseau de Distribution France). En retirant 8% de 0.4 le rendement est de 0.32. Pour convertir 1 Kwh en énergie primaire nous obtenons donc : $1 \text{ KWh} \times 3.6/0.32 = 11280 \text{ MJ}$ supérieur à celui de la base. De même, l'énergie primaire pour l'électricité n'intègre pas la consommation des centrales nucléaires, dans une sorte de cycle fermé, due à l'enrichissement, ni celle de l'extraction de l'uranium. Néanmoins, nous utilisons l'énergie « à la source » appelée « primaire » dans nos données hors base UITP 2001. Elle renvoie à la méthodologie de cette base internationale afin d'assurer une certaine cohérence.

1-3-4) De l'émission à l'énergie primaire pétrole.

Le bilan carbone (ADEME 2014) inclue la combustion et l'amont du combustible selon une méthodologie règlementée. La méthode du puit à la roue évalue les émissions de CO₂ en France (ADEME , 2014). Elle recoupe de diverses sources.

L'extraction et la transformation (transport raffinage distribution) du pétrole émettent 14.2 et 15.9 (KgCO₂/Gj PCI). L'usage est alors le principal facteur d'émission 72 et 75 (KgCO₂/Gj PCI). Le calcul ne concerne que le CO₂ émis et pas les polluants, plus nombreux (émissions dues aux freinages, remise en suspension de particules, variation des parcs selon des données d'entrée etc.) (ANDRE & al, 2015). (Cf Tableau 12)

Tableau 12 : émission totale du carburant en Kg Co2 /GJPCI					
Combustible	Amont	Combustion			Total
		Co2	CH4	N2O	
Essence	14,2	73	0,02	0,023	74,2
Diesel	15,9	75	0,001	0,023	75,7

Source : ADEME 2014

Selon ces émissions les consommations croissent de 22% à l'énergie primaire (15.9/74.29 arrondi au centième supérieur) pour le gazole et 20% pour l'essence (Cf Tableau 13)

Tableau 13: pourcentage de consommation litre de carburant.			
Carburant	Emission de combustion	Emission annexe	Emission totale
Essence	0,80	0,20	1,00
Gasoil	0,78	0,22	1,00

Source : calcul de l'auteur

1-3-5) Les consommations des TC RATP

A l'énergie primaire la consommation des autobus à 99% due au gazole donne (Cf Equation 2) :

$$C_{Gj} = C_{hl} \times 0.84/1000 \times 42 \times 1.22 \quad (2)$$

Source : calcul de l'auteur

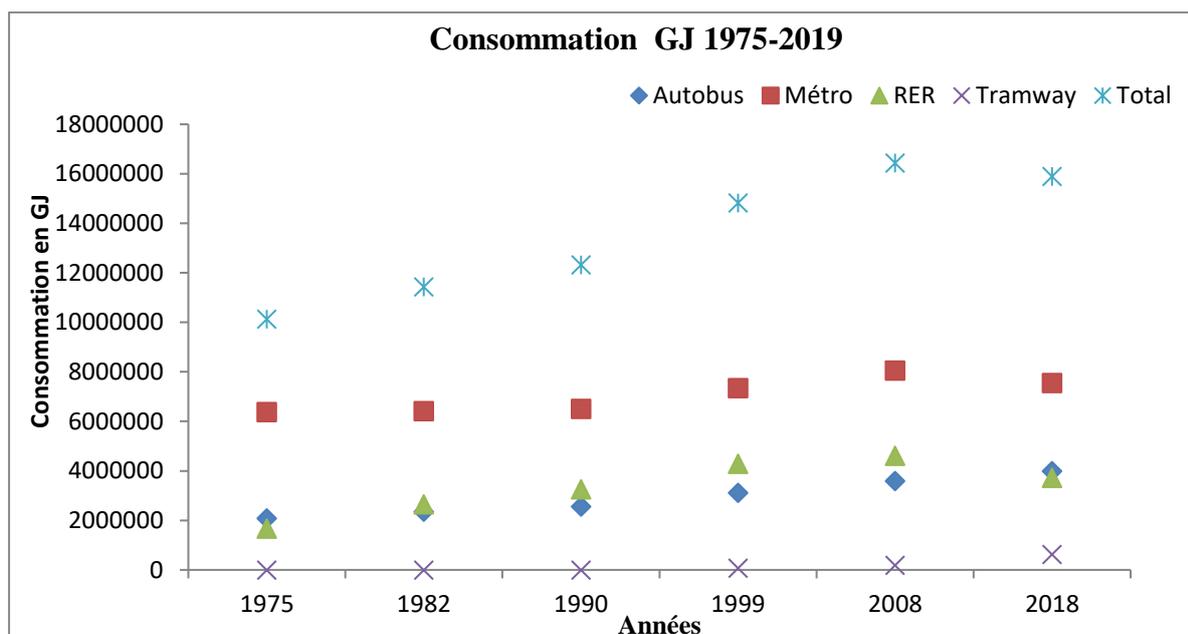
C_{Gj} = consommation en Giga Joule, C_{hl} = consommation en hectolitres et 1.22 renvoie au coefficient à l'énergie primaire du gasoil. Pour les réseaux ferrés nous avons (Cf Equation 3) :

$$C_{Gj} = C_{mwh} \times 0.086 \times 42 \times 9/3.6 \times 1.08 \quad (3)$$

Source : calcul de l'auteur

C_{Gj} = Consommation en Giga Joule C_{mwh} = consommation en MWh le coefficient de 9/3.6 nous recalcule sur la méthode de l'UITP. Le 1.08 renvoie aux pertes en ligne estimées en France (CDE 2020). Les consommations croissent de 91% pour l'autobus, de 20% pour le métro et 122% pour le RER, celles tramway sont très faibles (Cf Graphique 7).

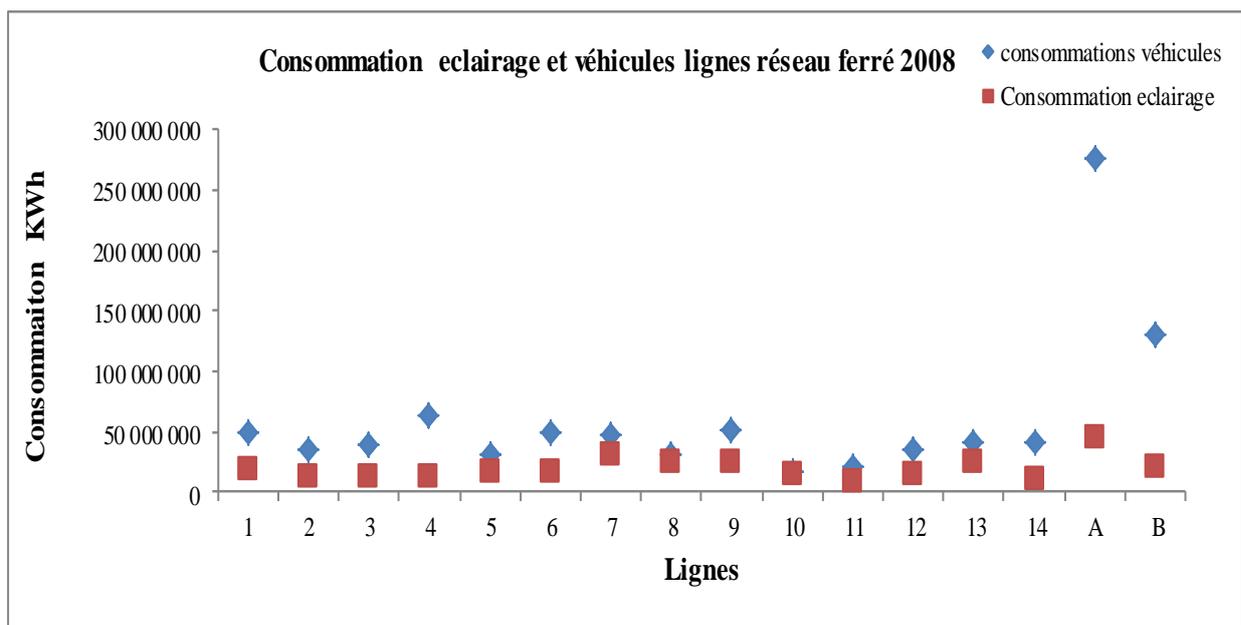
Graphique 7: évolution des consommations en GJ énergie primaire.



Source calcul de l'auteur.

Les facteurs techniques se sont modifiés dans la production de transports, les parcs de matériels, leurs technologies. Le renouvellement des matériels explique en partie la faible progression des consommations du métro. Pour le RER ou le réseau routier la croissance du trafic en banlieue explique la tendance. Pour le réseau ferré, la consommation par ligne intègre celle du mobile et des infrastructures associées (poste d'alimentation, résistance du rail etc...). Celle liée à l'éclairage dépend de la longueur de la ligne, des équipements, de sa situation enterrée ou en surface. Les gares RER en surface évitent les équipements d'accès aux quais de la gare et des éclairages expliquant sa faible consommation (Cf Graphique 8).

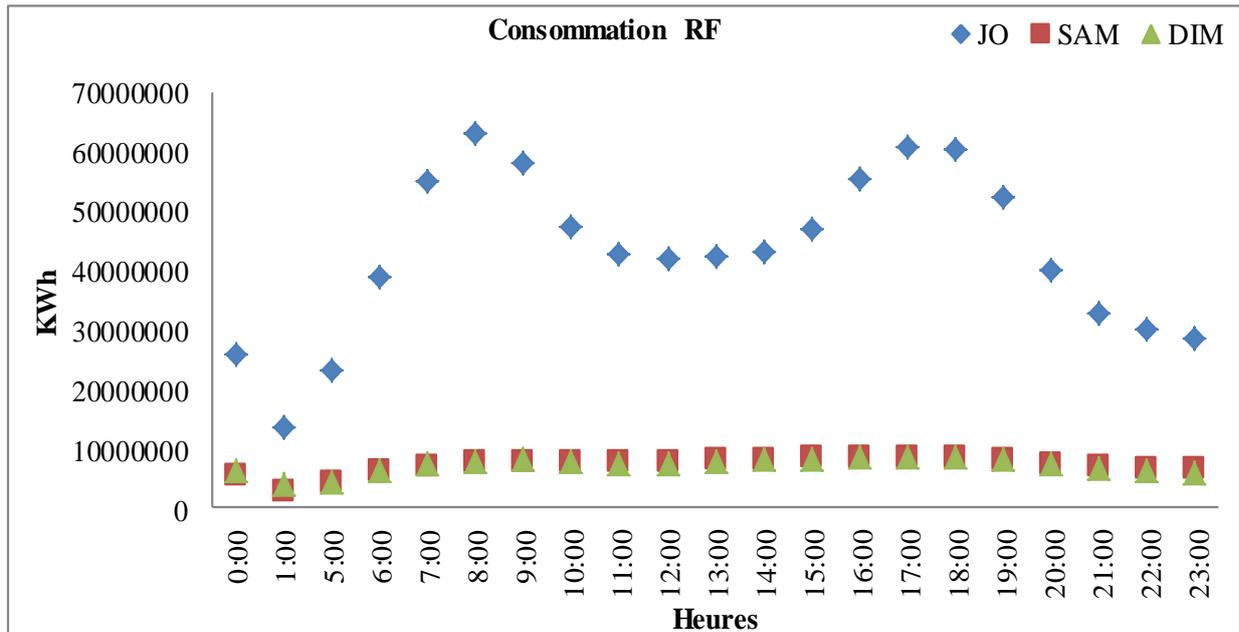
Graphique 8: consommation éclairage et véhicule



Source : calcul de l'auteur

En JO un pic de consommation est observable aux heures pleines pour la consommation alors qu'elle reste relativement stable quelque-soit les heures en NJO. Cette différence renvoie aux trafics. Le maximum est atteint en JO aux heures de pointes avec des variations significatives entre les heures. Il correspond à une offre maximale de véhicule de transport. (Cf graphique 9)

Graphique 9 : courbe de charge



Source : calcul de l'auteur

2) L'efficacité énergétique du transport de voyageur : la consommation unitaire réticulaire.

2-1) Définition

L'efficacité énergétique désigne en général ce qu'on nomme en physique une efficacité, soit un rapport entre le résultat obtenu (des voyageurs-kilomètres, tonne kilomètre...), et les ressources utilisées dans ce but (une énergie consommée). Le mot efficacité désigne la capacité à atteindre un objectif, quelques soient les moyens utilisés : Nos systèmes de transport occidentaux sont donc tous efficaces au sens des physiciens. Il faut donc aborder la notion d'efficacité énergétique dans un sens plus large que son sens premier, sans la confondre avec d'autres notions. L'efficacité énergétique n'est pas la transition énergétique qui est une substitution de l'intrant énergétique (électricité à la place du pétrole par exemple) dans la production du service. Elle n'est pas la récupération avec ou sans transition énergétique (exemple véhicule hybride ou récupération de l'énergie potentielle). Elle n'est pas la sobriété énergétique abordable selon deux modes. Le premier est attaché à l'utilisation individuelle directe de l'énergie. La sobriété énergétique implique les comportements de réduction de consommation, il s'agit plus alors d'un « art » (ILCHEV, 2017). La seconde est l'utilisation de cette énergie dans la production de produits industrialisés ou agricoles. Aucun indicateur de sobriété « consensuel » n'existe à l'heure actuelle. L'efficacité n'est pas la « performance énergétique » qui est une comparaison de deux systèmes de production ou du même système de production de service à des dates différentes. Elle n'est pas l'intensité énergétique (PERCEBOIS, 1989) qui mesure la quantité d'énergie par rapport au PIB.

L'intensité du transport rapporte le nombre d'unité de transports observés dans un pays (tonnes-kilomètres pour le transport de marchandises) et la valeur du PIB de ce pays (BRUNEL, 2005). Ainsi il faudrait « découpler » la production de richesse de la consommation d'énergie pour accroître la sobriété des transports. Le découplage absolu renvoie à de nouvelles manières de travailler (Nouvelles Technologie de l'information et de la Communication), aux transferts modaux pour réduire la demande de mobilité motorisée. Le découplage relatif vise la croissance de l'efficacité énergétique des réseaux. Ce « découplage » interroge l'organisation spatiale des activités (JOIGNAUX & VERNY, 2003). La technologie donne des possibilités nouvelles d'usage des véhicules. Néanmoins, l'efficacité énergétique n'est pas le rendement, issu de l'optimisation technique des matériels ou des processus industriels. Elle est une notion sociale (ILLITCH, 1973) avec la consommation d'énergie des différentes mobilités urbaines (transit transport) mais elle ne renvoie pas à la « précarité énergétique » qui s'intéresse d'abord l'accès individuel à la consommation d'énergie. L'efficacité énergétique, voire la transition énergétique, intègre le champ des politiques publiques (CHABROL, 2016). Elle investit le droit de l'urbanisme (ILCHEV, 2017) à de grandes échelles territoriales en France. Les EPCI sont les acteurs principaux de la mise en œuvre de document d'urbanisme (PLU-i) modifiant les mobilités urbaines. Divers instruments (légaux ou économique) renforcent l'efficacité pour réduire les émissions de GES (Gaz à effet de serre) des transports (ILCHEV, 2017).

L'efficacité énergétique est l'inverse de la consommation unitaire qui est la productivité énergétique du système de transport pour le service rendu (ROQUES, 2016). C'est par rapport à lui que se juge son efficacité. Le dénominateur de la consommation unitaire mesure le service, ainsi, pour le transport du fret ferré, les consommations par tonne.km correspondent au déplacement par le chemin de fer d'une tonne de marchandise sur une distance d'un kilomètre. L'unité n'inclue pas la valeur des produits transportés. La tonne kilomètre nette est leur poids, la tonne kilomètre brute intègre le poids du matériel des remorques. Le coefficient de remplissage des wagons est le ratio entre la tonne brute et nette. Dans le cadre du transport de personne, nous mesurons des voyageurs-kilomètres soit, pour une distance parcourue à l'intérieur d'un véhicule dans un réseau, un nombre de voyageurs transportés. Dans les transports, la consommation unitaire, outre le service rendu, peut renvoyer à deux plans distincts : le territoire ou le réseau. Dans le territoire on peut mesurer la consommation par habitant (NEWMAN & KENWORTHY, 1990) (UITP, 2001), dans les réseaux, on mesure la consommation des voyageurs. La mesure réticulaire dépend de l'utilisation d'une des deux lois de la thermodynamique (HAMMOND & WINNET, 2015) pour le numérateur. La première est la conservation de l'énergie d'un système fermé. Les échanges d'énergie entre le système et l'extérieur sont nuls (équation 4):

$$Q - W = 0 \quad (4)$$

Q = l'énergie due à la chaleur. W = le travail fourni. La deuxième loi renvoie à l'entropie des systèmes et à l'irréversibilité de certaines transformations.

Plus elle s'élève, moins ce système est inutilisable et ses éléments ordonnés. L'entropie globale (S) somme les entropies du système S_{sys} et de son environnement S_{ext} . Certaines énergies (exemple chaleur) sont perdues. C'est le cas de la majorité des transformations naturelles. Il y a deux cas :

La transformation irréversible où l'entropie est supérieure à zéro (équation 5).

$$S \text{ créée} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{ext} > 0 \quad (5)$$

La transformation réversible où l'entropie est nulle (équation 6)

$$S \text{ créée} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{ext} = 0 \quad (6)$$

L'approche courante utilisée intègre la première loi, l'efficacité est alors la suivante (équation 7):

$$N = \Sigma E_{j,out} / \Sigma H_{i,out} \leq 1 \quad (7)$$

Source: G.P Hammond, AB Winett,

L'énergie restituée ($E_{j, out}$) est inférieure ou égale à l'énergie injectée ($H_{i,out}$). Nous reprendrons l'approche classique utilisée dans les statistiques et la plupart des études, l'approche de la consommation unitaire selon la première loi de la thermodynamique. Elle a deux composantes le taux de remplissage et les consommations spécifiques (ENERDATA, 2004) (équation 8).

$$Cu = C_{su} / T_r \quad (8)$$

Source : Auteur

2-2) Taux de remplissage et d'occupation

2-2-1) Le taux de remplissage VP comme enjeu stratégique

Le taux de remplissage est le nombre de passagers d'un véhicule lors du déplacement. Son augmentation est un objectif des politiques publiques (DELAUNAY, 2019). Nationalement, il doit tendre vers 1,8 voire 2 occupants par véhicule en 2030 (CEREMA, 2018). L'article L. 1231-15 du code des transports, issu de la loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 dite loi MAPAM, définit le covoiturage par « l'utilisation en commun d'un véhicule terrestre à moteur par un conducteur non professionnel et un ou plusieurs passagers majeurs pour un trajet commun » (ADEME, 2015). Il est un moyen pour réduire les excès de la propagation de la motorisation (ADEME, 2015) (DELAUNAY, 2019). Un marché s'est alors développé constituant le « covoiturage dynamique » utilisant les technologies de l'Internet mobile et du GPS (ADEME, 2010). Pour la mobilité longue distance (> 80KM) le covoiturage entraîne une diminution des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 12% à l'échelle d'un équipage mais l'essentiel du report modal provient du train (ADEME, 2015) dont la traction électrique n'en émet pas. Pour la mobilité courte distance < 80Km les taux d'inscrit sont très faibles (8 % en entreprise 0,5 % sur les territoires) (Cf Tableau 14).

Tableau 14; covoiturage utilisateur

	Moyenne taux inscrits	Moyenne taux usagers
Tous les services	3,5%	7%
Services ETS	8%	10%
Services TP	0,5%	4%

Source ADEME

Néanmoins, ils sont surestimés et ceux qui passent à l'acte sont une part encore plus faible (ADEME, 2010) rejoignant des constats postérieurs du même ordre (4,5%) (ADEME, 2015) (DELAUNAY, 2019). De plus, si les 3/4 des usages viennent d'un report modal VP-VP, 1/4 provient des TC. L'approche marchande de la mobilité courte distance du covoiturage serait donc inefficace (ADEME, 2010) (DELAUNAY, 2019). Outre le problème environnemental et celui de la « masse critique » pour rentabiliser le service, le covoiturage représenterait la notion libérale d'intérêt général. Elle s'opposerait aux services publics et renforcerait le système automobile (DELAUNAY, 2019).

Plusieurs autres facteurs expliqueraient ses mesures : Le revenu, la forme urbaine, le permis de conduire, l'appariement, mais aussi des raisons socio-psychologiques. Ainsi en IDF, à partir d'un échantillon d'une quarantaine de personne, la possession d'une voiture s'explique par plusieurs facteurs sociaux « l'effet cycle de vie, l'effet de l'éducation et de l'entourage social, sur l'acquisition de la voiture et sur les habitudes de déplacement, démontrent bien la logique sociale qui pousse les individus à l'acquisition de la voiture. » (ROCCI, 2007). Elle est une distinction sociale (VEBLEN, 1899). Avec les habitudes le choix de l'automobile est une « évidence intériorisée » (VINCENT & al, 2010). La voiture permet de rester chez soi en franchissant des distances (DUBOIS, 2004). Les modes alternatifs s'envisagent sous forme de contrainte. Lors du voyage, les usagers des TC intègrent un contexte social (BRISBOIS & al, 2012), non un espace personnel.

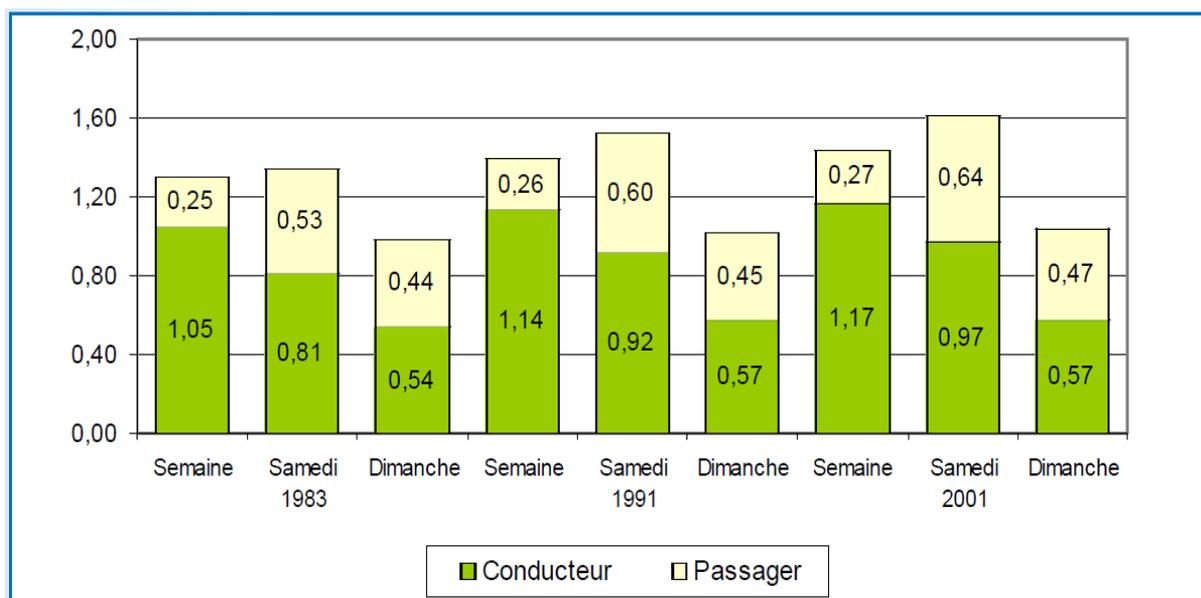
Outre le comptage direct (BOILLAT, 2005) les enquêtes statistiques périodiques des EGT estiment le taux de remplissage. Il est donné par (Equation 9) :

$$\text{Taux de remplissage} = (\text{Passagers} \times \text{Km} + \text{Conducteurs} \times \text{Km}) / \text{Conducteurs} \times \text{Km} \text{ (9)}$$

Source auteur

En IDF, il est stable dans le temps mais varie avec les motifs et les jours, de 1.1 (domicile travail) à 1.5 pour les autres (GUEGUEN-AGENAIS, 2008) (SETRA, 2008) ou entre JO (Jour Ouvrable) et non JO (Cf Graphique 10)

Graphique 10: variation des contributions voitures



Source EGT

Le nombre de personnes empruntant les réseaux routiers est estimé avec les trafics. Nationalement, les comptes divergent (GRIMAL, 2001) entre le CTN (Compte Transport National) et les ENT-D (Enquête Nationale des Transports et Déplacements) : 1/3 viendrait du taux de remplissage.

Les CTN les suppose constant alors qu'ils varient selon la distance (SETRA, 2008). Les plus faibles distances renvoient aux moins forts taux de remplissage (Cf Tableau 15).

Tableau 15: taux de remplissage et véhicule kilomètre.

Distance	Nombre de personne Véhicule		Véhicule kilomètre	
	1994	2008	1994	2002
Années	1994	2008	1994	2002
Toutes distances	1.56	1.47	1.73	1.63
Moins de 8	1.51	1.45	1.51	1.45
Entre 8 et 20	1.57	1.45	1.57	1.45
Entre 20 et 50	1.66	1.5	1.66	1.5
Entre 50 et 200	1.91	1.72	1.95	1.76
Entre 200 et 400	1.99	2.29	2.02	2.28
Entre 400 et 1000	2.43	2.18	2.45	2.22
Plus de 1000	2.5	2.92	2.49	2.77

Source SETRA 2008

2-2-2) Le taux d'occupation à la RATP comme enjeu

Les entreprises publiques (RATP et SNCF) jouissaient du monopole d'exploitation des TC sur la région parisienne. La contractualisation a fait passer ces entreprises de la logique de l'indemnité compensatrice vers celle de la rémunération aux résultats. La logique de « price cap » ou la puissance publique fixe un niveau de productivité et de financement a succédé à la notion de « cost plus » ou elle remboursait les coûts d'exploitation. Avec la régionalisation et la LOTI (Loi des Transports Intérieurs) de 1982, les lois Sapins ouvrent à des mécanismes concurrentiels pour renouveler les appels d'offre des marchés publics périodiquement.

Outre l'appel d'offre qui est une adjudication faisant l'objet d'un contrat pour une période spécifiée, l'autorité organisatrice peut recourir à des lots challengés (lignes ou réseau) comme à Bruxelles ou à Londres. Plusieurs lois et règlement européen (MILLION, 2015) ont approfondi les lois françaises préexistantes pour installer un marché à la place du monopole historique. Les entreprises de transport public, seront les acteurs du nouveau marché des TC. Si l'ouverture du réseau parisien s'effectuera en plusieurs étapes, le réseau SGP (Société du Grand Paris) sera directement ouvert à la concurrence. La coordination change de forme, elle est objectivée selon un contrat de service. Cette contractualisation repose sur plusieurs indicateurs, mais le principal est celui du prix de l'offre des réseaux (IDFM, 2017). Un opérateur gagne le marché si les coûts pour une qualité de service donnée sont plus faibles. Le prestataire les optimisera selon l'offre du concessionnaire. Ce contexte conduit le transporteur non à diminuer ses coûts, voire à aider la collectivité publique avec ses investissements, à l'exemple de la RATP, mais à les baisser plus fortement que son concurrent. C'est à partir de cet indicateur qu'est jugé leur performance. D'autres, telle que la régularité du service, l'information voyageur, viennent s'y adjoindre et faire l'objet de pénalités s'ils ne sont pas respectés. Le trafic est la variable d'équilibre économique « réelle » du fonctionnement du réseau indépendamment de l'équilibre des comptes qui peut être grevé par plusieurs éléments d'ordre institutionnel (gratuité, variation des prix).

Pour le transporteur, voire la région ce remplissage équilibre les comptes puisque ce sont autant de voyageurs payants, alors que le coût par voyageur transporté baisse.

Le taux d'occupation rapporte une quantité de place offerte mesurée en PKO (place kilomètre offerte) à un nombre de voyageurs (N) par kilomètre ou charge moyenne. Il exprime l'offre selon la demande. Il ne s'agit pas d'une occupation d'un véhicule mais d'une surface (équation 10).

$$\text{Taux d'occupation} = \text{voy} \times \text{Km} / \text{PKO} \quad (10)$$

Source RATP

Il est la productivité de l'offre (BASTARD, 1988). L'usage plus intensif des véhicules permet des économies d'échelle (MIRABEL & REYMOND, 2013). Aussi pour le transporteur, l'augmentation de l'offre avec la demande peut être injustifiée pour optimiser ses ressources voire son profit. Néanmoins, le taux d'occupation de 4 voy/m² définit l'offre (Kv) contractuelle entre les transporteurs et l'aménageur en IDF. L'offre est calibrée sur le trafic pour un confort donné.

Elle dépend de la vitesse moyenne de service et de l'intervalle qui intègre l'arrêt des trains et le temps de montée et de descente des voyageurs. Le service en station (COQUIO, 2008), (CUNIASSE, 2015) est un facteur de vulnérabilité du réseau. Les portes sont le point d'échange des « micro-flux » entre le véhicule et le quai de la station justifiant l'arrivée des portes palières sur les métros automatisés ou la présence de personnel sur les RER. Si les trafics sont mal estimés, alors la vitesse d'échange diminue. En effet, le passager n'est pas un acteur passif dans sa situation de transport justifiant le rôle de l'information pendant les situations perturbées (COQUIO, 2008) (MILLION, 2015).

Le surcroît de voyageurs provoque des mouvements de foule conduisant à des comportements nuisibles au service : certaines personnes retiennent les portes et empêchent les trains de partir. La fiabilité de l'offre de transport est remise en question (MILLION, 2015).

En effet, la perturbation du service en station se propage dans la ligne provoquant la diminution de l'offre de transport et des temps d'attentes prolongés pour l'ensemble des passagers (CUNIASSE, 2015). Cette nuisance est plus forte lorsque les taux d'occupation sont élevés (COQUIO, 2008). La « congestion », quand le réseau de transport ne répond plus à la demande peut survenir (KONING, 2012). La région serait obligée de réajuster son offre si les trafics réalisés excèdent la norme de confort amenant des coûts supplémentaires. Ces aspects justifient alors de comprendre la relation entre densité et trafic. En effet, les transporteurs subiraient les effets des politiques de densification qu'ils ne contrôlent pas, si elles faussent les estimations de trafic sur lesquels ils ont conclu leur marché et en particulier dans l'ajustement de l'offre de transport.

2-2-3) L'offre de transport TC

Pour le réseau ferré, les taux d'occupation ajustés à 4 voyageurs au m² pour les données antérieures à 1991 (6 auparavant) sont stables, pour l'autobus, ils diminuent (Cf Tableau 16)

Tableau 16 : taux d'occupation RATP						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Autobus Banlieue	0,27	0,30	0,27	0,19	0,19	0,16
Autobus Paris	0,30	0,32	0,30	0,35	0,29	0,27
Métro	0,28	0,27	0,28	0,23	0,26	0,26
RER	0,21	0,25	0,25	0,21	0,23	0,21

Source : calcul de l'auteur

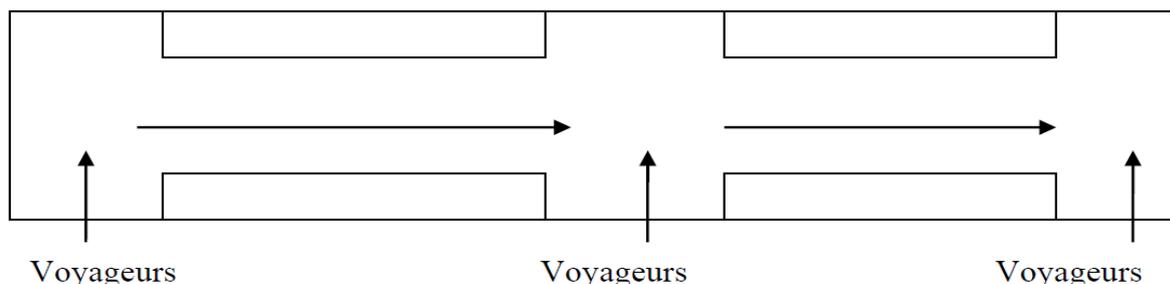
Or pour une ligne nous avons (Cf Equation 11) :

$$PKO = KV \times P \quad (11)$$

Source : auteur

KV = Kilomètre Voiture P = Places par Voiture ce qui renvoie à deux éléments distincts : les capacités du véhicule, l'offre en véhicules. La capacité est la quantité de personnes transportées du véhicule. Le véhicule doit pouvoir supporter une surcharge. Le PTAC (Poids Total Autorise en Charge) du métro, est estimé à 8 personnes au mètre carré. Pour l'autobus Agora S le PTAC est de 19t, la capacité est de 105 personnes (95 à 4m²), soit 10 personnes en plus. Le MF 2000 supporte 799 personnes pour une capacité de 575 sur 4m². L'interconnexion augmente l'espace réservé aux voyageurs debout dans les nouvelles rames de métro. L'aménagement longitudinal des caisses triple leur espace disponible (GERONDEAU, 2003). Les places assises le long des caisses augmentent l'espace circulatoire central (Cf figure 8)

Figure 8: conception longitudinale de la caisse



Source Gerondeau 2003

Par rapport au modèle parisien, la réduction du nombre de places assises serait de 10% pour une augmentation conséquente de la capacité du train. Dans le RER, la longueur des trains et la configuration des remorques (2 étages) augmentent les capacités (MI2N). Les capacités des véhicules routiers non articulés sont passées de 70 à 96 places. Elles dépendent aussi de la composition des véhicules. Les autobus articulés ont deux voitures. Pour le réseau ferré, les compositions des trains varient. (Cf Tableau 17).

Tableau 17: capacités des RER	
Type de matériel	Capacité train formé 4 voyageurs m ² (5 voitures)
MS 61	629
MI 79	843
MI 84	880
MI2N	1291
MF09	1300

Source : calcul de l'auteur d'après données RATP

Avec 6 voitures, la ligne 1 produira deux fois que la ligne 3 bis (entre parenthèse avec la 7bis) pour le même nombre de trains (Cf Tableau 18)

Tableau 18: nombre de voitures par train														
Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Voitures	6	5	5/(3)	6	5	5	5/(3)	5	5	5	4	5	5	6

Source : auteur

L'offre de transport en véhicules dépend de la ligne et de la planification, à l'horaire ou la fréquence (CUNIASSE, 2015). La première ne renvoie pas au cadencement. Contrairement aux autobus ou aux métros les services de ligne de RER ne desservent pas tous les points d'arrêts (missions) entre leur point de départ et d'arrivée. Pour les lignes en cadencement, les véhicules parcourent la ligne dans un temps donné (T) qui dépend de la vitesse commerciale (V). Quelque-soit le service, l'offre renvoie à un nombre de Kilomètre Voiture. Simplement, pour un véhicule d'une voie nous avons (Cf Equation 12).

$$\text{Km véhicules} = V \times T \quad (12)$$

Source : auteur

Pour n véhicule nous avons donc (Cf Equation 13).

$$n \text{ véhicules} = n \times V \times T \text{ soit } N \text{ véhicules} = N \times V \times T \text{ Avec } N = 2n. \quad (13)$$

Source : auteur.

Pour une ligne qui comporte deux voies. Le nombre de véhicules N implique une « capacité roulante » soit un nombre de PKO (Places Kilomètres offertes) disponible. Le nombre de véhicules en ligne dépend de l'intervalle (I) (Cf Equation 14).

$$I = T / N - 4 \quad (14)$$

Source : auteur

T = temps de parcours de la ligne. N-2= nombre de trains en lignes auquel on enlève les deux extrémités avec 1 train en terminus et 1 au départ compté dans N. Le temps de parcours de la ligne est déterminé en moyenne par (Cf Equation 15).

$$T = L / V \quad (15)$$

Source : auteur

L étant la longueur de la ligne composée de deux voies. V la vitesse commerciale (Cf Equation 16).

$$\text{Soit } I = L / V \times N - 4 \text{ soit } N = L / (V \times I) + 4 \quad (16)$$

Source : auteur

La baisse de l'intervalle augmente les capacités de la ligne. A intervalle constant pour une longueur donnée, une croissance des vitesses baisse le nombre de véhicules (N) en ligne. Pour le producteur c'est un facteur de productivité sur l'investissement (moins de mobiles à acheter) et l'exploitation (moins de mobiles à maintenir et à faire rouler). Cet exemple ne renvoie qu'à une réalité simplifiée à vocation didactique. Dans les plans de transports, l'intervalle théorique intègre un certain nombre de contraintes lié à la voie et au service (rampe, service en station, distribution des cantons, vitesses des cantons, résistance à l'avancement...). Ils sont un véritable problème théorique en soit qui ne sera pas traité ici (LESEL, 2016).

L'augmentation des PKO est visible et traduit les effets capacitifs et d'offre. L'augmentation des KV pour le métro (36%) renvoie aux PKO (42%). Le parc avait une capacité stable durant la période, l'offre en véhicule augmente. L'offre de service RER triple les PKO quadruple. L'offre de l'autobus croît de 75%, celle des places triple. L'augmentation des capacités et de l'offre explique l'évolution (Cf Tableau 19).

Tableau 19 : PKO Place Kilomètre Offerte						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Métro	20000	20000	21000	24500	28500	30207
RER	6000	11000	16000	18300	21800	29542
Autobus Paris	2380	3040	3240	2900	3500	3509
Autobus Banlieue	3070	3280	4170	6300	7600	8564
KV (Kilomètre voiture)						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Métro	184,6	191,3	195,5	212	246,7	261
RER	33,4	56,7	72	87	100,2	115
Autobus Paris	40,5	42,8	42	42,6	50,2	51
Autobus Banlieue	83,6	93,5	99	100,3	114,7	128

Source : calcul de l'auteur

Les KCC sont les kilomètres commerciaux qui sont les kilomètres consacrés au transport de voyageur. Ils sont plus forts le lundi ou les jours ouvrables que le Week-end. La faible variation montre une offre s'adaptant à la charge moyenne. (Cf Tableau 20)

Jour	Lundi	Samedi	Dimanche
Autobus Banlieue	17	15	14
Autobus Paris	16	15	13

Source auteur à partir de statistique RATP

2-2-4) La charge moyenne TC

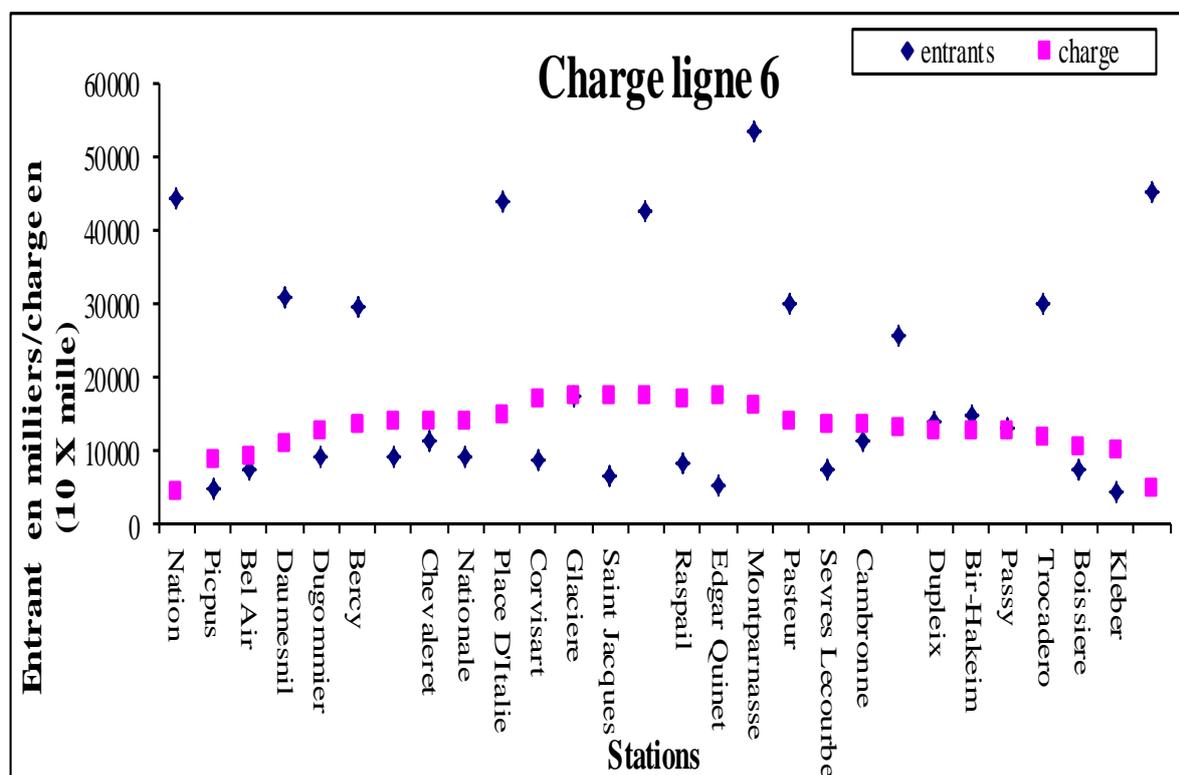
2-2-4-1) La mesure de l'indicateur.

La RATP mesure une « charge » voyageur des entrants et des sortants des trains sur les quais des stations par ligne. Elle regroupe un ensemble de véhicules. C'est un flux réticulaire (équation 17):

$$\text{Charge} = \text{stock (St)} + \text{entrants (E)} - \text{sortants (S)}. \quad (17)$$

La charge est égale à charge voie 1 + charge voie 2. La comparaison entre les entrants et la charge montre l'effet de l'agglomération. Celle de la ligne 6 évolue du terminus où le stock initial est zéro et l'autre où les voyageurs sortent. Elle croît jusqu'au milieu de la ligne puis baisse. (Cf Graphique 6)

Graphique 11: charge ligne 6



Source RATP

Contrairement aux entrants voyageurs, elle est régulière.

2-2-4-2) Le parcours moyen.

La charge moyenne est donnée par (Cf Equation 18)

$$\Sigma (C \times \text{KM}_i) = \text{charge moyenne} \quad (18)$$

Source : auteur

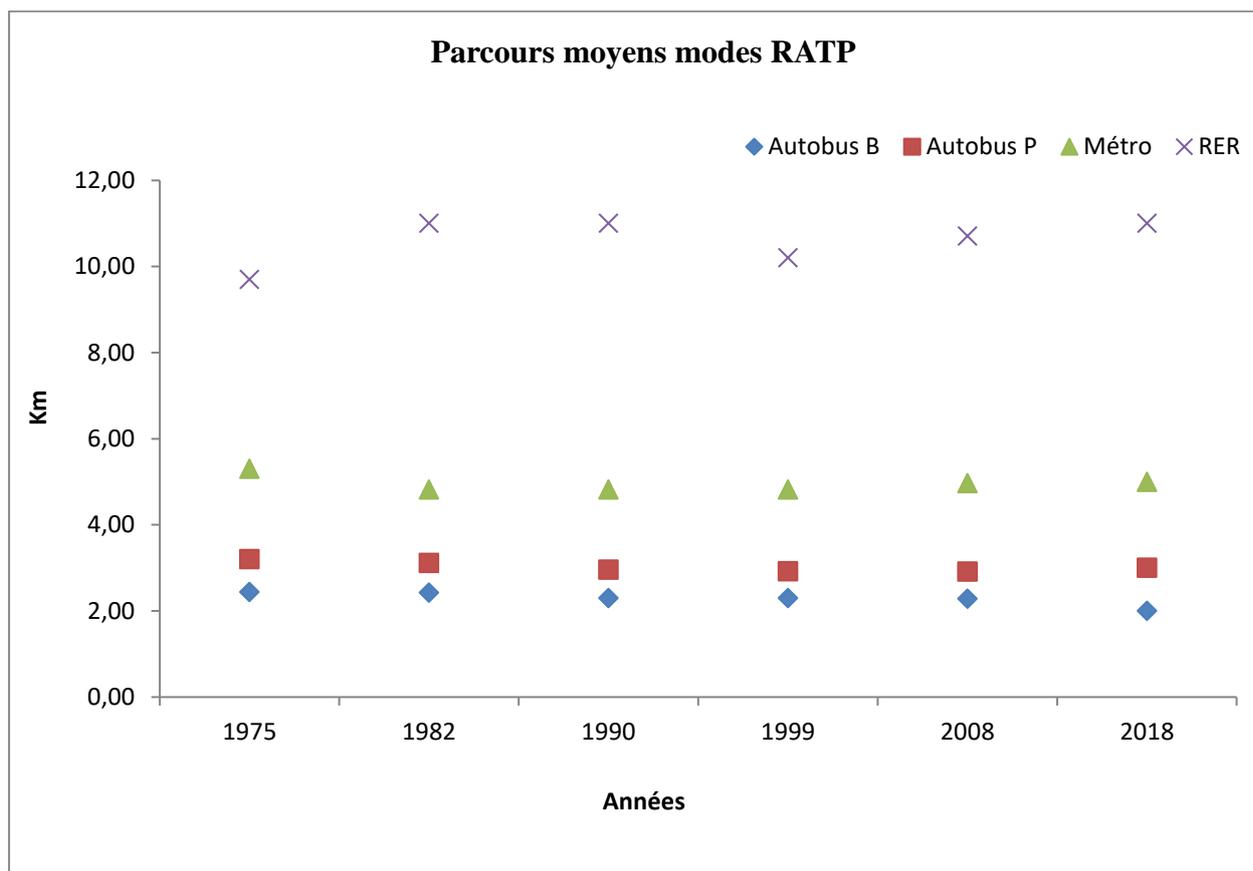
C = charge de la ligne KM_i = distance de l'inter-station. Cela équivaut à écrire (Cf Equation 19) :

$$\Sigma (C \times \text{KM}_i) = \text{Pmi} \times \Sigma (E) \text{ soit } \Sigma (C \times \text{KM}_i) / \Sigma (E) = \text{Pmi} \text{ (19)}$$

Source : auteur

E = somme des entrants du véhicule Pmi = parcours moyen dans les véhicules des lignes. Le parcours moyen d'un voyageur est la valeur moyenne de la distance de son voyage avec une entrée et une sortie dans une station de la ligne. Historiquement, les données sont moyennées par réseau ou sous réseau. Avant 1977, des branches du RER étaient dissociées, la moyenne du graphique est celle de la ligne de Sceaux (Gf Graphique 12).

Graphique 12 : parcours moyens RATP



Source RATP.

Les parcours (hors tramway ce mode est récent) sont stables entre 1975 et 2018. Il est faible pour l'autobus 2 ou 3Km et plus fort pour les réseaux ferré 5 et 11 Km. Pour le réseau routier, des lignes de banlieue ont une distance supérieure à 10 Km (32KM pour Roissy-bus). Dans le réseau ferré, la moyenne des parcours moyens (3.49 Km) par ligne est plus faible celle agrégée (5 Km) et se rapproche de celle de l'autobus Paris (3Km). (Cf Tableau 21)

Tableau 21 : parcours moyen réseau ferré

Ligne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Moyenne	A	B	Moyenne
Distance	3,56	2,79	2,79	2,68	3,51	3,37	3,83	4,34	3,98	3,48	2,65	3,37	4,47	3,99	3,5	11,2	7,1	9,16

Source RATP.

La faible variation des parcours moyens et la relative stabilité des taux d'occupation signifient que le trafic a augmenté à la RATP.

2-2-4-3) Le trafic IDF par réseau

Le trafic est une somme de voyages dans l'espace réticulaire. Le voyage est la distance parcourue d'un individu dans un réseau. Ils sont plus forts le lundi ou les jours ouvrables que le Week-end. Les trafics augmentent avec des croissances différenciées entre 2008 et 2019 (Cf Tableau 22).

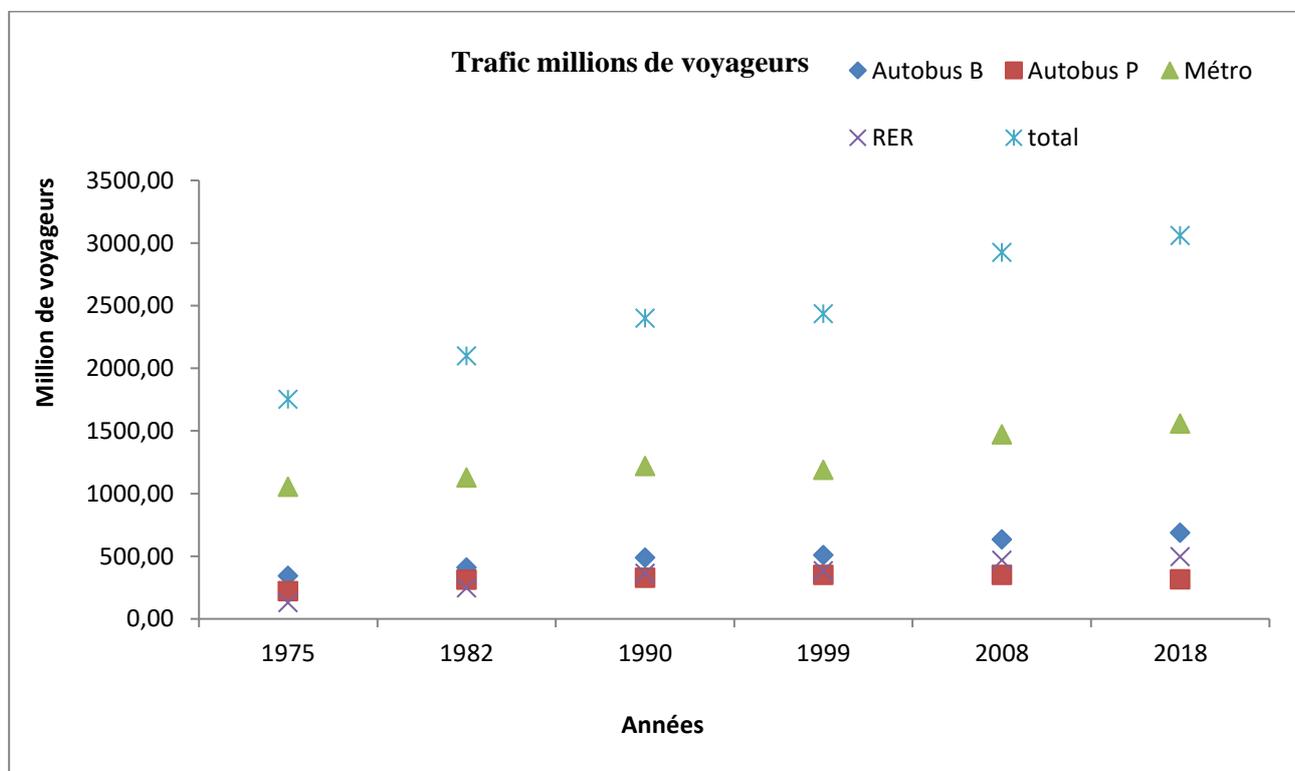
Tableau 22 : trafic IDF en millions de voyageur

Années		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Trains	SNCF (T4 et T11E exclus)	816	815	820	842	857	877	877	890	932	949	913
	RATP	469	448	456	469	477	469	474	469	478	493	497
	TOTAL	1 285	1 263	1 277	1 311	1 334	1 346	1 351	1 359	1 411	1 441	1 409
Méto	RATP	1 472	1 479	1 505	1 524	1 541	1 527	1 526	1 520	1 519	1 539	1 560
Tramway	RATP et T4+T11E inclus	97	97	109	115	117	193	233	267	287	294	315
Bus à Paris	RATP	346	345	340	352	335	315	331	326	330	321	316
Bus en petite couronne	RATP	653	643	634	637	627	624	653	662	684	692	689
Bus en grande couronne	Optile + TRA	284	294	299	315	326	335	348	368	397	406	417
Bus en petite et grande couronnes	Total RATP+Optile+TRA	937	937	933	952	953	959	1 001	1 030	1 081	1 098	1 106
Noctiliens	RATP	7	8	8	8	8	9	9	10	10	11	12
	SNCF	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
TOUS MODES		4 146	4 130	4 172	4 264	4 290	4 349	4 452	4 513	4 638	4 706	4 720

Source : OMNIL

Les trafics des réseaux ferrés de la RATP croissent entre 1975 et 2018. Pour le métro, le trafic augmente de 47% mais le trafic stagne entre 1990 et 1999. Jusqu'en 1997 il décroît avec un point bas en 1995 qu'un conflit social explique. Il remonte ensuite. Pour le RER il augmente de 279% (Cf Graphique 13)

Graphique 13 : évolution des trafics.



Source : RATP

Le faible nombre initial de voyageurs et le transfert de population en banlieue explique son triplement. Pour le bus il augmente en banlieue + 91% et à Paris + 41% avec des variations similaires à celles du réseau ferré. Le trafic entrant renvoie RATP et SNCF est principalement situé à Paris avec le métro et les bus parisien (1900 millions de voyages) et la première couronne (Cf Tableau 23).

Tableau 23 : entrants en IDF SNCF 2008.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
75 - Paris	823	847	873	902	933	954	964	974	984	983
77 - Seine-et-Marne	125	127	129	132	135	138	140	143	144	144
78 - Yvelines	246	249	253	258	264	270	279	285	290	297
91 - Essonne	142	163	150	154	157	161	166	170	172	172
92 - Hauts-de-Seine	198	201	203	209	215	226	238	241	243	245
93 - Seine-Saint-Denis	217	224	233	242	253	262	271	283	294	297
94 - Val-de-Marne	103	109	115	122	131	142	150	158	161	161
95 - Val d'Oise	242	244	248	253	251	254	259	282	283	285
Île-de-France	2 096	2 164	2 205	2 272	2 339	2 407	2 467	2 536	2 571	2 584

Source : OMNIL

2-2-4-4) Le trafic par jour.

Le trafic des bus RATP varie entre les JO et les non JO par rapport à la moyenne (Cf Tableau 24).

Tableau 24 : variation de trafic entre jours ouvrables et non ouvrables 2008 RATP										
Territoires	Lundi	Mardi à vendredi	Total semaine	Moyenne	JO		Samedi		Dimanche	
Paris	553792	577139	3426631	489519	572470	1,17	425741	0,87	138542	0,28
PDU paris	608235	626496	3868058	552580	622844	1,13	454490	0,82	299349	0,54
Banlieue	1203778	1248030	7346685	1049526	1239180	1,18	746990	0,71	403797	0,38
PDU banlieue	980974	1002647	6070345	867192	998312	1,15	667736	0,77	411047	0,47
Paris	1162027	1203635	7294689	1042098	1195313	1,15	880231	0,84	437891	0,42
Banlieue	2184752	2250677	13417030	1916719	2237492	1,17	1414726	0,74	814844	0,43
Total	3346779	3454312	20711719	2958817	3432805	1,16	2294957	0,78	1252735	0,42

Source : STIF

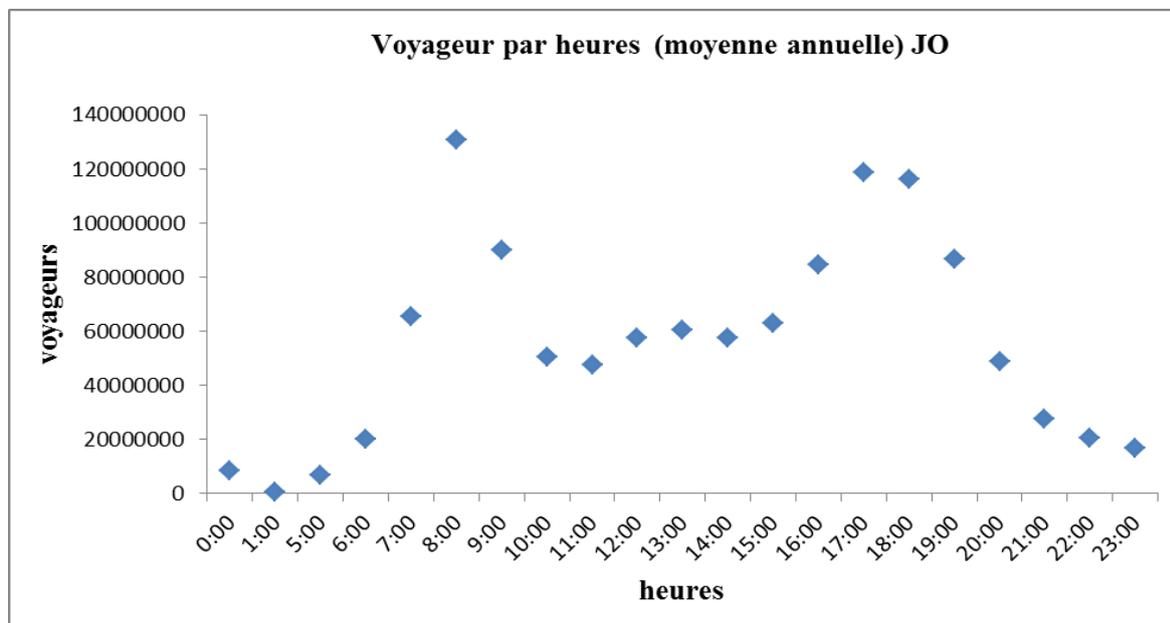
Pour les JO le coefficient (total) est de 1.16 alors qu'il est de 0.78 le samedi et de 0.42 le dimanche. Sur les lignes PDU (Plan de Déplacement Urbain) de Paris le dimanche est marquant (0.54). Ces lignes sont donc attractives. Les variations sont encore plus prononcées pour les trafics OPTILE. Elles restent stables au cours du temps 0.78 le samedi et 0.23 le dimanche. (Cf Tableau 25).

Tableau 25 : optile				
Années	2006	2007	2008	2009
Montants JO	1 317	1 330	1 363	1 401
Montants SA	487	488	523	538
Montants DI	151	149	157	161
<i>Moyenne</i>	652	656	681	700
Part de trafic SAM	0,75	0,74	0,77	0,77
Part de trafic DIM	0,23	0,23	0,23	0,23

Source : STIF

Deux pointes, matin et soir, caractérisent la courbe. A 8 heures, le nombre de voyageur par heure est de plus du double (2.32) de celui de la moyenne quotidienne. Il s'agit alors de l'hyper pointe. Elle renvoie à la plage de 06H30 à 09H30 le matin soit les aller des voyages renvoyant principalement à un motif étude ou travail ou obligé (72%). Elle est parfaitement similaire à celle du trafic routier (IAU, 2013) (Cf Graphique 14).

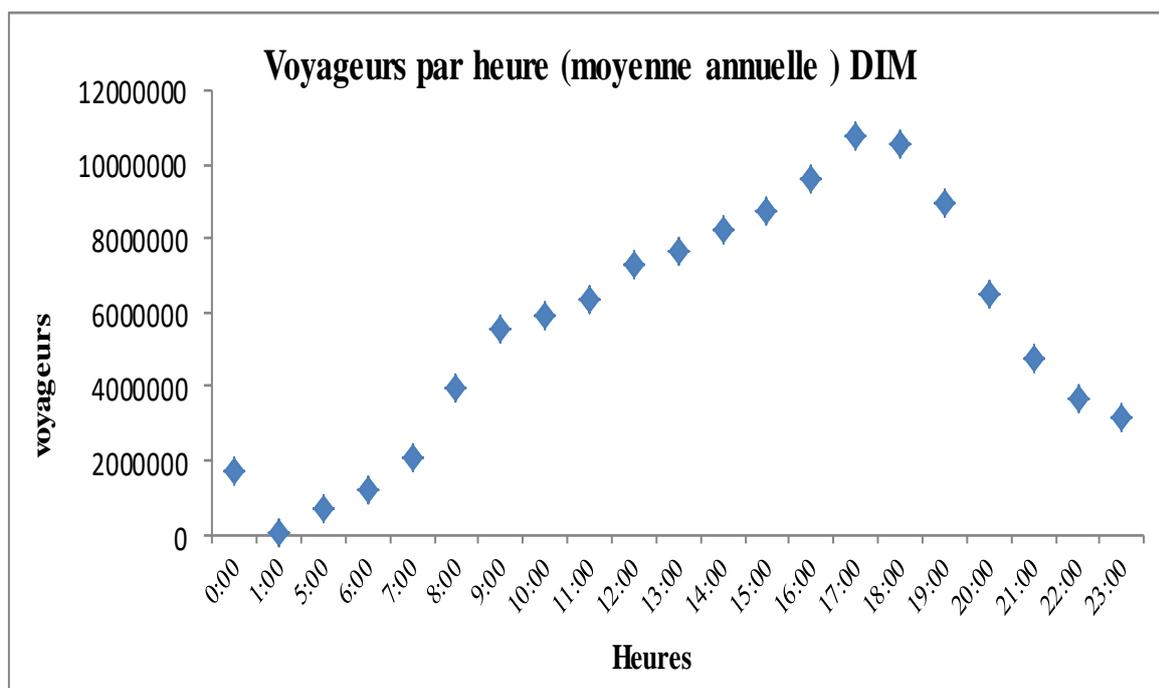
Graphique 14: morphologie entrants jour ouvrable



Source : RATP

La morphologie des courbes des samedis et dimanches est différente. La pointe du soir est similaire entre 17h00 et 19h00 pour les JO et les non JO. (Cf Graphique 15)

Graphique 15 : morphologie entrant dimanche



Source : RATP

Les volumes et les répartitions horaires varient. Nous calculons cette variation de trafic moyen en divisant la somme des JO par 259 et les deux autres par 52 jours (pour une année à 363 jours). Le trafic moyen varie entre les JO ou non de 64% le samedi et de 49% le dimanche c'est similaire au réseau autobus.

2-2-4-5) Modification de la charge moyenne par kilomètre commerciaux de l'autobus

Sur notre échantillon de 138 lignes nous constatons une variation des taux d'occupation selon les Kilomètres commerciaux. Ils se présentent de cette manière à l'exemple de la ligne 106 (Cf Tableau 26)

Tableau 26 : variation des taux d'occupation ligne 106 2008			
Lundi	Mardi-vendredi	Samedi	Dimanche
18,370	19,09	19,77	15,79

Source : RATP

Ce taux d'occupation varie selon les kilomètres commerciaux qui n'intègrent pas les kilomètres effectués à vide pour des raisons d'exploitation (retour au dépôt...). Il ne s'agit donc plus d'une surface occupée mais d'une quantité de kilomètres que les véhicules produisent. Il se rapproche alors du taux de remplissage des voitures. Nous observons une constance entre les jours ouvrables et le samedi pour cette ligne. Le trafic diminue avec l'offre ce qui n'est pas le cas du dimanche ou le trafic diminue plus que l'offre. Aussi la variation des consommations unitaires n'est pas proportionnelle au trafic puisque l'offre s'ajuste. Nous retrouvons ce phénomène pour l'ensemble des lignes sauf bien entendu pour celles qui ne circulent pas le dimanche ou le week-end.

2-2-5) Des taux différents entre VP et TC

Pour la VP taux de remplissage est un nombre de personne dans un véhicule donné. Pour le TC le taux d'occupation est un indicateur de confort qui renvoie à la surface disponible des véhicules. Dans le premier cas, le taux ne renvoie qu'au véhicule, dans le second à l'offre d'une ligne. Les taux de remplissage ou d'occupation ne signifient pas la même chose dans l'exploitation des réseaux. Pour le TC l'évolution dépend de l'offre de transport et des capacités de transport. Aussi la diminution du taux de remplissage des autobus s'explique par l'augmentation des capacités avec une stabilité relative des trafics. De même, nous constatons une relative stabilité des taux de remplissage pour l'autobus du fait de la variation de l'offre entre les jours. Cela rejoint la stabilité des taux des VP dans le temps.

2-3) La consommation spécifique

2-3-1) Définition.

La consommation spécifique vient des facteurs techniques de la consommation unitaire. Pour la VP L'économie d'énergie dans un véhicule renvoie à 5 postes (HONG, 2011). L'aérodynamisme (22%), la résistance au roulement (15%), l'ensemble des transmissions + différentiel (22%), la motorisation (friction et pompage) (25%), la masse (10%).

Deux postes (résistance au roulement et transmission) s'améliorent difficilement. La résistance au roulement vient du contact entre le pneu et la chaussée permet le freinage. La transmission permet le mouvement (Cf Figure 9)

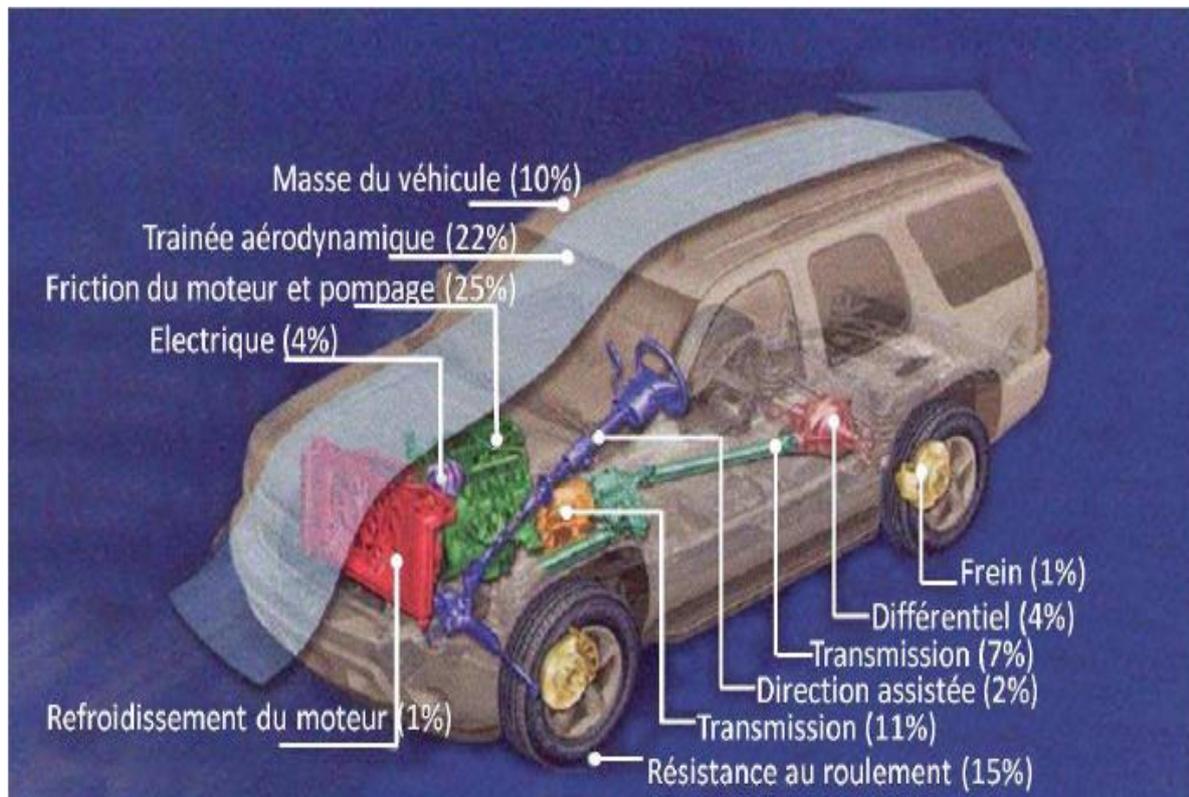


Figure 9: économie d'énergie véhicule

Source : Hong 2011.

Elle mesure une consommation pour une distance parcourue (des kilomètres), une offre donnée KV (Kilomètre Voiture) ou KCC (Kilomètre Commerciaux ou nombre de kilomètres parcourus consacrés au service voyageur). Elle est en litre/100Km pour le mode routier.

$$C_{su} = E/\text{Offre de transport} \quad (20)$$

Source : auteur

Elle se calcule selon l'équation suivante dans les modèles utilisés pour les modes motorisés :

$$CU = A - B \times V + C \times V^2 \quad (21)$$

Source : Marcadet

Les marches à blanc (TC réseau ferré) ou des bancs de test (VP) calibrent les paramètres A B C. Ils regroupent les conditions techniques (structure de la voie, aérodynamisme...) d'exercice de la vitesse. Les facteurs techniques concernent aussi les infrastructures de fonctionnement du véhicule avec la vitesse. Ils dépassent le périmètre du rendement du moteur qui reflète la capacité des industriels à économiser de l'énergie avec des moteurs innovants.

2-3-2) Les facteurs techniques des consommations spécifiques des voitures.

2-3-2-1) La puissance fiscale

Les puissances fiscales renvoient à la puissance du moteur. Elles s'évaluent en chevaux fiscaux (C qté CO_2 émise, P puissance motorisée). Elles sont classées en trois catégories. 5CV et moins 6 à 10Cv et 11Cv et plus (Cf Equation 22)

$$Pf = C/45 + (P/40)^{1.6} \quad (22)$$

Source : Wiki

Les consommations unitaires selon la puissance fiscale du véhicule augmentent. En 2006 l'augmentation est de 6.3 à 10.9 L/100Km entre une 5 CV et une de 11CV : un véhicule plus puissant est nécessairement plus consommateur qu'un moins puissant pour un même temps d'utilisation ($W = P \times T$ $W =$ énergie. $P =$ puissance $T =$ temps d'utilisation) (Cf Tableau 27)

Tableau 27 : puissance du parc et consommation spécifique.

Puissance fiscale

5 CV et moins	7,2	7,0	7,0	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,6	6,5	6,4	6,4
6 à 10 CV	8,6	8,0	7,9	7,9	7,9	7,9	7,8	7,8	7,7	7,6	7,5	7,4
11 CV et plus	11,0	10,6	10,7	10,7	11,2	10,9	10,9	11,3	11,3	11,2	11,1	10,7

Source : SECODIP

2-3-2-2) L'aérodynamisme.

L'aérodynamisme renvoie à la résistance des éléments à l'avancement du véhicule (Cf Equation 23)

$$Fa = \frac{1}{2} \rho S C_x v_r^2 \quad (23)$$

Source Hong tu luu

Cette force varie en fonction de l'allure du véhicule et de sa vitesse au vent (v_r) mais aussi de la densité de l'air (ρ) c'est à dire des conditions météo et de l'altitude. La surface frontale (S) augmente la force tout comme le coefficient de pénétration dans l'air (C_x). Ce coefficient de forme est connu des constructeurs grâce aux essais en soufflerie (LHEUREUX, 2008). La consommation par litre diminue ce qui représente une économie de 21%. (Cf Tableau 28)

Tableau 28: contribution du C_x à la consommation spécifique.					
Surface frontale = 1,74 m ²	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
$C_x = 0,38$	0,53	1,04	1,72	2,57	3,59
$C_x = 0,30$	0,42	0,82	1,36	2,03	2,84

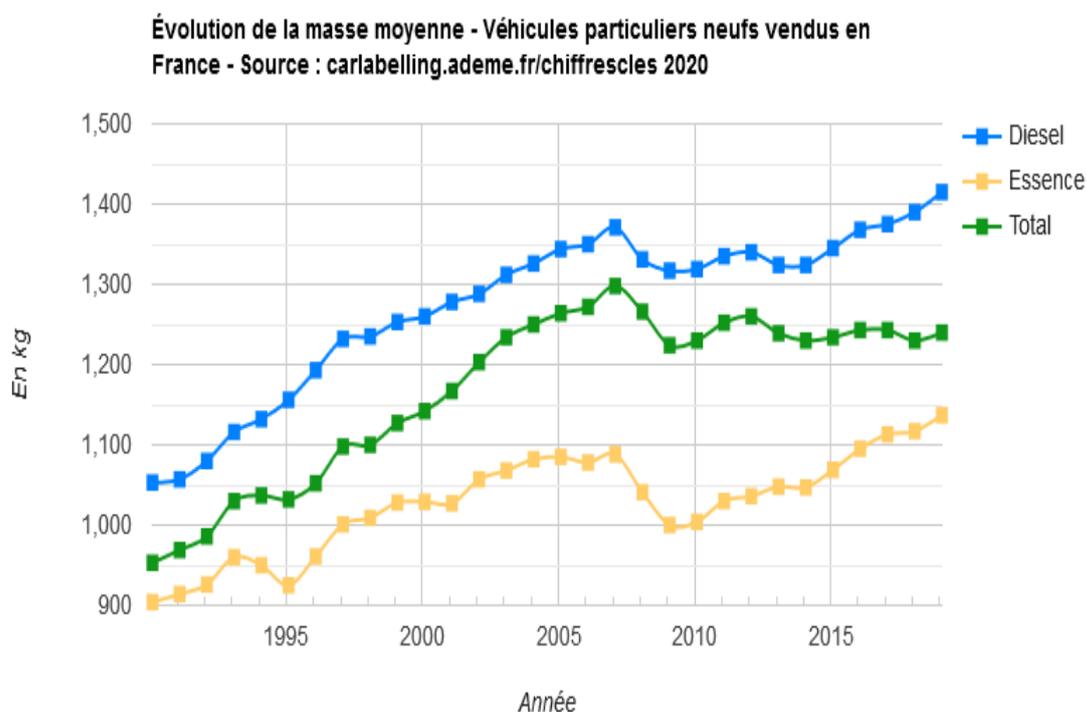
Source : Wiki

Le C_x varie selon les profils de la carrosserie ce qui explique les efforts des motoristes dans la forme des véhicules qui s'est progressivement arrondie. Si l'aérodynamisme automobile des premières années le diminue rapidement et atteint une valeur de 0,30 en 1982, les progrès sont plus faibles aujourd'hui puisque nous atteignons 0.26. Bien évidemment, la résistance au mouvement croît avec la vitesse ce qui produit alors une augmentation de la consommation unitaire. De 0.53 pour un C_x de 0.38 nous passons à 1.39. Si le C_x permet d'améliorer l'efficacité énergétique la vitesse est un facteur important de consommation unitaire.

2-3-2-3) La croissance des masses en France

La masse moyenne des voitures croît (CARBALLE, 2008) (Cf Graphique 16)

Graphique 16: Augmentation des masses des véhicules



Source (ADEME, (2010).

Les voitures diesels sont plus lourdes mais plus efficaces que celles à essences. La diffusion de modèles plus spacieux équipés de la climatisation limite la baisse des consommations spécifiques : 42 % des véhicules Diesel et 26 % des véhicules essence l'ont : ces véhicules consomment en moyenne sur l'année 0,6 à 0,7 l de plus aux 100 kilomètres (INSEE, 2004).

2-3-2-7) L'hybride.

La conception du moteur date de 1899, l'effort des motoristes cesse jusqu'en 1997, moment où Toyota développe la Prius, Honda, l'Insight et la Civic, commercialisées hors du Japon. L'énergie du moteur du véhicule hybride est transmise par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents (exemple du moteur à combustion interne, de la turbine à gaz, de la machine électrique...) tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockage différents (exemple du réservoir à carburant, de la batterie...). Au moins un des flux, le long duquel l'énergie circule d'un dispositif de stockage aux roues, est réversible, tandis qu'au moins un flux est irréversible. Dans l'hybride électrique le dispositif de stockage d'énergie réversible fournit l'énergie électrique (LHOMME,2007). Plusieurs architectures existent nous exposons les deux principales. L'hybride parallèle conserve une liaison mécanique entre le moteur et les roues du véhicule. Dans l'architecture, le couple moteurs (aux rapports de réduction près) fournit le couple aux roues (DELPRAT, 2005).

L'un des problèmes de cette technologie est la perte de confort de conduite liée à l'addition des couples lors des changements de vitesses (Cf Figure 10)

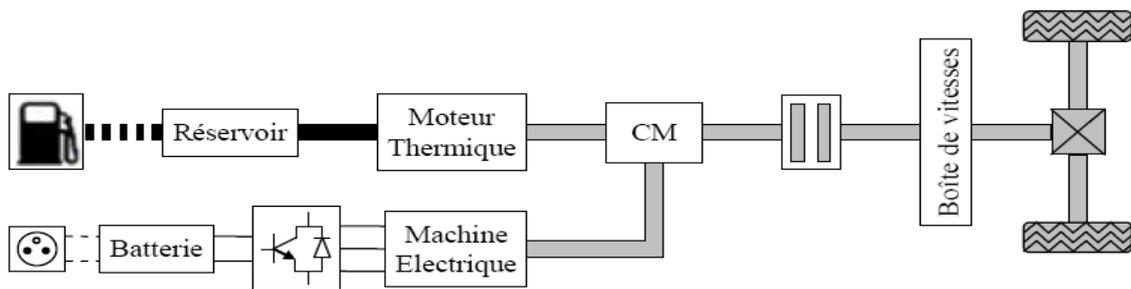


Figure 10 : hybride parallèle

Source Lhomme 2007

Les "hybrides séries" sont équipés d'un moteur diesel, sur lequel est monté un alternateur qui alimente le moteur électrique de traction (Cf Figure 11)

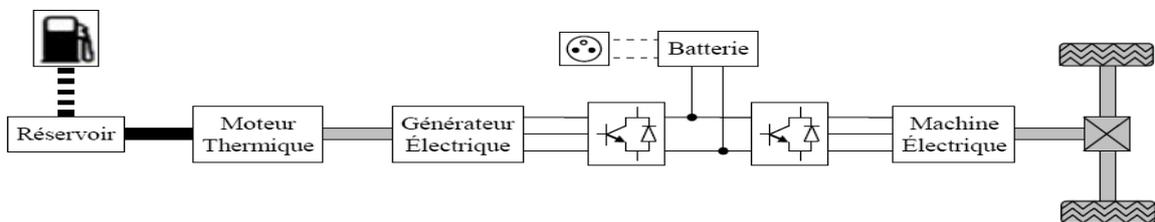


Figure 11 : hybride série

Source Lhomme 2007

Selon les classifications, d'autres types d'hybrid existent (MESTER, 2007) (Cf Tableau 29)

- Le micro hybrid provient des systèmes "stop start" qui ne régénèrent pas d'énergie. Il économiserait 10% de consommation moyenne.
- L'hybride mild" : le moteur électrique chargé assiste le moteur thermique sans s'y substituer le gain est entre 20 et 25%.
- Le full hybride : le moteur électrique remplace le moteur thermique le gain est de 30%.

Tableau 29: performance énergétique d'hybride.	
Micro hybrid	10%
Hybride mild	20 à 25%
Full hybride	30%

Source : Mester

Ces motorisations plus économes se diffuseront lentement. Le parc se renouvelle d'environ un quart tous les cinq ans en IDF (COUREL, 2010). L'actuel taux de véhicule hybride 0.69% implique un faible effet sur la consommation du par cet son efficacité énergétique. Néanmoins, lorsqu'il se propulse électriquement l'hybride est plus efficace que le TC.

2-3-2-7) La voiture électrique.

La conception d'un véhicule électrique date du 19ième siècle (LHOMME W. , 2007). L'engouement de l'aristocratie pour la voiture à essence, accroît la demande.

Elle supplante les autres types de propulsion dès 1920 (SYROTA, 2008). La traction électrique émet moins de CO₂ (13.49 g/Mj) que le diesel (74.90 g/Mj) ou l'essence (73.99 g/Mj). Les pertes dues aux alternateurs des moteurs, aux résistances ou aux transmissions sont faibles 2 à 5%. Le rendement du véhicule est d'environ 85%. La possibilité de régénérer l'énergie du freinage et la baisse du poids du véhicule due au moteur s'y ajoute ce qui permet, si nous comparons au poids d'un véhicule à moteur thermique, d'augmenter la quantité de batteries. Vis-à-vis des motorisations antérieures, l'électrique est moins consommateur en milieu dense. La consommation unitaire est bien plus faible au véhicule 0.90Mj/Km (25 Kwh/100Km) pour le milieu mixte 0.65 Mj/Km en milieu dense. La consommation unitaire d'un véhicule diesel correspond à 1.83Mj/Km en 2008 soit un rapport 2 fois moindre pour le milieu mixte et 3 fois en milieu dense. Néanmoins, son bilan reste difficile à appréhender. Les mesures varient selon le cycle de conduite et l'environnement (CGDD, 2017) et le périmètre de comparaison (ADEME, 2016). Ainsi, la mesure à l'énergie primaire ne donne pas les mêmes résultats. Nous passons à 2.25 et 1.61 Mj/Km en milieu dense. La comparaison avec l'hybride diesel (ou essence) montre un cycle urbain à 1.21Mj/Km à l'énergie primaire. Le véhicule électrique est désavantagé. Enfin, il a une autonomie insuffisante. Le fonctionnement des auxiliaires (phares veilleuse, stop) l'influence (PICHERIT, 2010). Il rencontre donc un obstacle majeur qui renvoie aussi à son évaluation. A la fabrication le véhicule électrique est moins avantageux que le thermique (PICHERIT, 2010) (ADEME, 2011), il est plus respectueux de l'environnement vis à vis du véhicule thermique à usage similaire aussi une utilisation intense est recommandée (ADEME, 2016). Or, dans l'usage, ce mode est aussi bien utilisé pour faire les courses que pour aller travailler. Si le véhicule électrique est spécialisé sur certains motifs son avantage faiblira. Les temps de recharge restent importants (30 min) et dépendent de l'ampérage (débit d'électricité) dont provient l'effet joule (PICHERIT, 2010). En outre, les capacités électriques seront à augmenter. En effet la transition « pétrole électricité » en IDF implique de produire l'équivalent de 12,87 TWH en supposant la consommation unitaire de 1,74 Mj/Km (Calcul de l'auteur). Pour l'étude, les effets de parc sont négligés vu la faible quantité de voitures électriques en circulation, 10000 véhicules sur 25 millions en 2010 (ADEME, 2011). Néanmoins sa diffusion progressive modifiera l'efficacité énergétique de la VP vis-à-vis du TC, et la rapprochera de ce mode.

2-3-2-8) La voiture à hydrogène.

La conception de la pile à combustible date de 1839. Développée par la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) des premières applications existent aujourd'hui pour les voitures ou les transports urbains (autobus). L'électricité de traction est produite au travers d'une réaction chimique. Plusieurs types de pile haute ou basse température dans différentes applications existent. Certaines sont mobiles (basse température), d'autres stationnaires (haute température). Une pile de type PEM (« Proton Exchange Membrane » ou « membrane échangeuse de proton ») s'applique à la voiture ou les autobus (PIFFARD, 2017).

Elle est le noyau central de plusieurs sous-systèmes qui régulent son fonctionnement (Arrivée d'air, d'hydrogène, refroidissement, régulation électrique, système de contrôle central). Son avantage est de fournir une énergie de traction propre, dont la ressource est abondante (hydrogène) pour la production de carburant. Un deuxième avantage vis-à-vis de la voiture électrique propulsée par batterie est sa plus grande autonomie. Les contraintes de cette technologie sont nombreuses. La puissance de traction libérée par litre de carburant est insuffisante pour concurrencer les véhicules thermiques (PIFFARD, 2017). Les performances dynamiques du véhicule (accélération) sont inférieures à celles du moteur thermique et nécessitent des adaptations sous peine de dégrader la performance de la pile (BERNARD, 2007). La durée de vie des piles n'est pas suffisante pour concurrencer les véhicules thermiques. La source pose des problèmes dans la distribution puisque son stockage nécessite des spécifications particulières. La forme gazeuse implique un réservoir soumis à une pression comprise en 300 et 700 bars. Enfin, la production de terre rare en grande quantité est nécessaire pour ce type de technologie. L'hybridation peut améliorer la performance de ce type de traction : la pile peut alimenter les batteries de la voiture électrique en complément ce qui augmente son autonomie, un système de régénération de l'énergie de cinétique peut s'y adjoindre. Plusieurs flottes de voitures ont mis en œuvre la pile à combustible (La poste) (PIFFARD, 2017). Ce véhicule est au stade expérimental.

2-3-2-9) La diésélisation du parc.

Les moteurs des voitures diesels et essences ont le même principe de fonctionnement. L'explosion d'un composé chimique (le carburant) dans un cylindre met en mouvement un piston relié à un vilebrequin au travers d'une bielle. Plusieurs éléments expliquent l'efficacité du diesel : L'auto-combustion par compression des gaz délivre plus d'énergie que la combustion de carburant. La masse volumique du gasoil rend l'explosion plus énergique que l'essence. La force sur le piston relié au vilebrequin s'accroît. Les matériaux plus lourds augmentent l'inertie. Pour une même puissance le couple moteur (C) est plus important réduisant la vitesse de rotation (w). L'énergie d'enclenchement de la rotation des roues baisse ($P = C \times w$) (Cf Tableau 30).

Tableau 30: rendement et tours minutes Agora.			
Tour minute	1100	1500	2100
Rendement énergétique	28%	26%	16%

Source RATP

Les technologies d'injection directe améliorent l'utilisation du carburant vis-à-vis d'un moteur à essence.

Les moteurs diesels bénéficient en premier de la réduction de la taille du moteur. La diffusion des technologies améliore l'efficacité des véhicules à essence (SYROTA, 2008). L'utilisation massive du diesel est le principal motif de décroissance des consommations spécifiques (SECODIP, 2010) (METEYER, 1997) (KOLI, 2013) (ANDRE & al, 2015). L'avantage fiscal lié au prix du carburant diesel et sa plus faible consommation spécifique expliquent sa diffusion (KOLI, 2013). Néanmoins, les normes anti-pollution le remettent en cause (BEAUMONT, 2007).

Depuis 2015 en IDF (DRIEE, 2021) des mesures règlementaires sont prises contre cette motorisation (arrêt des subventions pour les carburants). Cet infléchissement n'intervient pas dans les tendances passées. L'âge du parc est un élément qualitatif qui en traduit la structure. Il est estimé par plusieurs méthodes (KOLI, 2013):

L'exploitation du Panel Parc auto, des vignettes, des ECAM (Enquête Consommation des Ménages), les kilométrages effectués. Il augmente par plusieurs éléments : le multi-équipement des ménages (le véhicule secondaire a un âge plus important que le véhicule principal, la croissance de l'activité féminine, la dépendance automobile, la démocratisation de l'équipement aux ménages aux revenus modestes grâce au marché d'occasion, la stagnation des immatriculations des véhicules neufs (KOLI, 2013). La consommation spécifique croît avec l'âge moyen. Les véhicules neufs bénéficient des dernières améliorations. Toute chose égale par ailleurs, le renouvellement du parc implique une baisse des consommations spécifiques. Aussi, les zones résidentielles ou les revenus sont plus importants impliquent alors des renouvellements de parcs plus fréquents et des véhicules moins polluants (ANDRE & al, 2015). Les consommations spécifiques moyennes baissent quelque-soit, la puissance fiscale ou l'âge des véhicules (SECODIP, 2010). L'âge moyen des véhicules diesel n'augmente pas l'âge global du parc (KOLI, 2013) tout en faisant baisser la consommation spécifique. (Cf Tableau 31)

Tableau 31 : âge du parc et consommation spécifique

Unité : litre/100 km

	1990	1995	1996	1997	1998*	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<i>Age des véhicules</i>												
1 à 5 ans	7,8	7,3	7,5	7,4	7,4	7,3	7,3	7,3	7,3	7,1	7,0	6,9
6 à 10 ans	8,6	8,0	7,7	7,7	7,5	7,6	7,5	7,5	7,4	7,3	7,2	7,3
11 à 15 ans	9,4	8,8	8,4	8,5	8,4	7,9	7,7	7,7	7,6	7,4	7,3	7,0
16 ans et plus	9,7	9,9	10,1	9,4	9,5	9,4	8,8	8,9	8,3	8,1	7,8	7,4

Source : SECODIP

2-3-2-10) La répartition spatiale des parcs roulants EGT.

Deux parcs existent, statique et roulant. Le parc statique est le nombre de véhicules en service hors du kilométrage parcouru par chacun d'entre eux. Plusieurs approches différentes les évaluent : (EGT, ECAM (Enquête consommation des ménages) ou les modèles. De nombreux travaux (BOURDEAU, 1998) (HUGREL & JOUMARD, 2004) l'estiment. Le fichier des immatriculations regroupe les véhicules âgés de moins de 15 ans. Jusqu'au 1er janvier 2010, elles étaient produites avec le fichier central des automobiles (FCA) que le répertoire RSVERO remplace. Les statistiques concernent les voitures particulières, les autobus et autocars, les camionnettes, camions, tracteurs routiers, remorques et semi-remorques et les véhicules automoteurs spécialisés. Les autres véhicules ne sont pas comptés. Le répertoire contient un nombre important de véhicules comptabilisés à tort dans le parc (détruits, hors d'usage...), les déclarations correspondantes n'ayant pas été effectuées. Aussi les données de parc présentées résultent d'estimations effectuées avec les limites d'âge.

Elles sont ajustées avec le rythme de diminution de leur kilométrage dans le temps, des données de parc provenant d'autres enquêtes statistiques, et des résultats de l'appariement entre les données du répertoire RSVERO et celles des contrôles techniques (FCT). La différence moyenne entre le parc estimé et recensé est 40%. Les mesures du parc recensées avec la vidéo donnent des résultats sensiblement différents du parc IFSTAR (ANDRE, 2014). La relation entre parc statique et roulant est (Cf Equation 24) :

$$\mathbf{PR = PS \times Coef U (24)}$$

Source Bourdeau

Avec PR = parc roulant. PS= parc statique. Coef U = coefficient d'utilisation.

Le parc roulant constitue une évaluation de la circulation effective des véhicules nécessaire pour estimer la pollution due au transport (ANDRE & al, 2015). Le kilométrage annuel du coefficient U moyen est connu avec des panels SECODIP et SOFRES qui présentent quelques différences (20% d'écart non expliqué (GRIMAL, 2001) reste dans l'évaluation des trafics nationaux). Le parc EGT à l'usage des ménages intègre des voitures particulières (VP) et de société regroupant les voitures et les VUL (Véhicule Utilitaire Léger) de PTAC (Poids Total Admis en Charge) de moins de 3.5 tonnes conduit avec un permis B. Le parc augmente en IDF et baisse à Paris depuis 1990. Les parcs statiques et roulants EGT 2010 diesel et essence ont été reconstitués (ANDRE & al, 2015) selon les départements (Cf Tableau 32).

Tableau 32 : parc automobile disponible en IDF (milliers)					
	1975	1982	1990	1999	2008
Paris	560	580	610	590	566
Petite couronne	1110	1330	1500	1590	1670
Grande couronne	1180	1550	1980	2390	2623
IDF	2850	3460	4090	4600	4859

Source : EGT

Des informations non interprétables, faibles en proportion ont été ôtées. Les véhicules concernés ont été négligés. Plusieurs hypothèses sont posées (Cf Tableau 33) :

1. 100 % (alors qu'il pourrait s'agir de seulement 70 %) des VP diesel de 2010 étaient EURO 4
Même hypothèse pour les VP essence de 2010.
2. Tous les deux-roues et trois-roues d'une cylindrée inférieure à 50 cm³ ou ceux dont la motorisation était renseignée comme « deux temps » sont des cyclomoteurs considérés comme « motocyclette 2 temps », idem pour les moteurs quatre temps.
3. La répartition des parcs par département est alors donnée ci-dessous en pourcentage.

Tableau 33 : composition des parcs statiques IDF VP.

En % Motorisation	National IFSTTAR	Île-de-France	Paris (75)	Hauts-de- Seine (92)	Seine-Saint- Denis (93)	Val-d'Oise (95)	Essonne (91)	Seine-et- Marne (77)	Yvelines (78)	Val-de- Marne (94)
Diesel	58,0	50,4	38,2	43,2	51,5	56,0	53,4	59,9	53,3	46,2
Essence	41,9	48,7	61,2	55,5	47,8	43,4	45,4	39,3	46,1	52,7
Hybride		0,2	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6
Electrique	0,2	0,0	0,0	-	-	-	-	-	0,0	-
Autre		0,6	0,4	1,0	0,7	0,5	0,8	0,6	0,4	0,5
Non renseigné	-	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0
Total général	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Source : M Carteret et alii

Paris a un parc diesel moins important que les départements en petite et grande couronne ; Ce travail a été aussi réalisé pour les VUL. L'étude recense alors les parcs roulants (Cf Tableau 34)

Tableau 34 : parcs roulant en région IDF par département.

En % Motorisation	National IFSTTAR	Île-de- France	Paris (75)	Hauts-de- Seine (92)	Seine-Saint- Denis (93)	Val-d'Oise (95)	Essonne (91)	Seine-et- Marne (77)	Yvelines (78)	Val-de- Marne (94)
Diesel	70,6	63,8	48,9	59,3	64,7	67,2	66,6	71,8	66,9	57,9
Essence	29,2	35,5	50,6	39,8	34,9	32,1	32,3	27,4	32,4	41,0
Hybride		0,2	0,1	0,4	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,9
Electrique	0,2	0,0	0,0	-	-	-	-	-	0,0	-
Autre		0,5	0,3	0,5	0,3	0,6	0,8	0,7	0,4	0,2
NR	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Total général	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Source : André et alii

Les changements significatifs sont dus aux kilomètres parcourus entre les motorisations (Cf Tableau 35).

Tableau 35 : kilomètre parcourus diesel et essence.

En km/an Motorisation	National IFSTTAR	Île-de- France	Paris (75)	Hauts-de- Seine (92)	Seine-Saint- Denis (93)	Val-d'Oise (95)	Essonne (91)	Seine-et- Marne (77)	Yvelines (78)	Val-de- Marne (94)
Diesel	14 713	16 069	22 030	18 954	17 254	15 303	14 948	14 908	15 991	13 981
Essence	8 438	9 869	15 279	10 186	9 421	9 151	8 283	8 914	10 101	9 127
Hybride		10 816	6 502	16 047	1 308	8 407	5 502	4 987	5 819	30 241
Electrique	14 202	1 421	249	-	-	-	-	-	2 594	-
Autre		10 770	11 280	12 623	4 089	10 026	17 823	14 743	8 730	6 052
NR	-	4 651	1 721	2 945	4 293	491	12 747	2 553	2 212	1 029
Moyenne (km/an)	12 086	13 095	17 886	14 081	13 259	12 539	11 846	12 566	13 355	11 494

Source : André et alii

Pour Paris alors qu'il existe un écart de 27% entre les parcs statiques diesel et essence, l'écart entre les parcs roulants n'est plus que 1%. Pour la banlieue l'écart est aux alentours de 30%.

Les observations et le parc statique EGT ne se recoupent pas dans l'ancienneté des véhicules ou le taux de diésélisation. Néanmoins, par catégorie, les parcs certains départements se retrouvent à la même place (93,77 95) quelle que soit la méthode (Cf Tableau 36).

Tableau 36 ; dispersion des parcs statiques en fonction des méthodes.

Tri selon l'âge	Récent				Ancien			
EGT2010- statique	92	78	77	91	94	95	75	93
Observé	91	77	78	92	75	94	95	93
Tri selon le taux de Diésel	Peu de Diesel				Beaucoup de Diesel			
EGT2010- statique	75	92	94	93	78	91	95	77
Observé	75	92	78	94	91	93	95	77

Source : André

2-3-3) Les facteurs techniques des consommations spécifiques TC RATP.

2-3-3-1) Parc routier.

Les autobus, où omnibus automobiles (GUYON, 2000), sont des véhicules non guidés, transportant leur propre source d'énergie. Leur essor a lieu à la fin du 19^{ème} siècle à Berlin, en 1900 à Londres, en 1904 à Paris où ils remplacent les tramways dans les années trente. Ils s'insèrent dans les circulations existantes sans aménagement spécifique de la voirie urbaine. De 1950 à 1962, la RATP met en service 1700 véhicules neufs dans un contexte économique difficile. Une nouvelle organisation crée deux zones distinctes : la ville de Paris et la banlieue. Les lignes de Paris soulagent le métro sur ses tronçons les plus chargés, complètent sa desserte dans les quartiers mal irrigués, assurent l'accès aux principaux sites touristiques. En banlieue, les lignes radiales constituent le prolongement des lignes de métro. En grande banlieue, les lignes assurent un rabattement vers les gares ferroviaires. Des rocade relie plusieurs communes entre elles. Néanmoins, le trafic connaît un déclin progressif : 852 millions de voyageurs en 1960, 501 millions en 1973. La congestion automobile entraîne des retards fréquents, la vitesse commerciale baisse de 20 % : 14 km/h à Paris et 10 km/h en banlieue. Les autobus à 2 agents disparaissent en 1974. En 50 ans, le parc autobus s'est « diésélisé » rapidement avec l'arrivée de nouveaux matériels (Agora). Sa puissance a augmenté. (Cf Tableau 37)

Années	1975	1982	1990	1999	2008
MJ	865	909	973	1192	1466

Source : calcul de l'auteur.

Cette croissance des puissances explique sans doute une plus forte consommation (Cf Tableau 38).

1975	1982	1990	1999	2008	2018
2083046	2230670	2560218	2986020	3589110	3988338

Source : calcul de l'auteur.

Des autobus hybrides couplent plusieurs technologies issues des voitures, les systèmes stop-Start, la récupération d'énergie au freinage et d'autres configurations (hybride gaz, hydraulique). Pour le plus répandu, l'hybride diesel, l'économie de carburant va de moins de 3 l/100 km à plus de 75 l/100 km (GOUVERNEMENT DU CANADA, 2015) selon le cycle de conduite. L'efficacité croît de 15 à 27% sur banc de test. La RATP a relevé une baisse des émissions de CO₂ de -24 %, moyennant un travail d'optimisation du véhicule en lien avec le constructeur (rodage du véhicule, calibration des calculateurs...) (ADEME, 2018). Après des essais sur batteries (bus de Montmartre), le plan bus 2025 développe une filière électrique. Les trolleybus sont des autobus électriques à alimentation permanente. Les filières électrique et hybride n'étaient pas développées lors de la période de l'étude.

2-3-3-2) Le parc Tramway

Le funiculaire intègre les systèmes spéciaux guidés. Ces TC desservent des lieux particuliers (Montmartre à la RATP) dont l'aménagement est spécifique. L'UITP utilise l'anglais LRT (Light Rail System) pour désigner le tramway, et les systèmes VAL (Véhicule Automatique Leger). Les tramways circulent en site propre franchissable où ils sont accessibles depuis la chaussée, un trottoir ou des quais. Ils sont relancés en IDF dans les années 90 (ligne T1 puis T2). Alstom transport conçoit le TFS et les Citadis. Leurs caractéristiques techniques sont similaires. Les Citadis ont des planchers surbaissés économisant du temps dans les échanges voyageurs vis-à-vis du TFS, ils sont modulables, la livrée est adaptable.

2-3-3-3) Parc réseau ferré

Le métro est un système guidé en site propre intégral, généralement souterrain, rarement aérien, exceptionnellement au sol. Ces systèmes effectuent des services urbains ou suburbains. Les réseaux sont à traction électrique, et, presque partout, la prise de courant s'effectue avec un troisième rail conducteur qui entre dans un gabarit étriqué contrairement à d'autre système. De nombreux conflits entre l'Etat et la municipalité retardent la construction de la ligne 1 (1899). Le gabarit du tunnel insuffisant empêche la circulation des matériels des grandes compagnies ferroviaires privées et résout cette querelle (LARROQUE & al, 2000). L'ensemble du réseau métro était équipé en matériel fer « Sprague Thomson » disparu en 1982. Les progrès technologiques font émerger divers matériels. Les capacités d'accélération et de décélération des matériels à roues pneumatiques accroissent la vitesse et la fréquence des rames. Les premiers essais ont lieu dès les années trente (TRICOIRE, 1999) mais des barrières technologiques empêchent (gestion des courbes) son expansion. En 1950, un nouvel essai conduit la RATP à produire le MP 55 (Matériel Pneu 1955). La ligne 11 est transformée. Sa capacité de transport augmente de 5.5%. Avec la ligne 4, la ligne 1, équipée du MP59, l'augmente de 15 à 20%. Les Matériels Fer (MF67), en ligne dès 1974, rendent l'avantage technologique insuffisant pour modifier le réseau au regard des coûts de structure. Néanmoins, la ligne 6 devant être rénovée, cette transformation fut décidée avec le matériel le MP 73. Le premier matériel à régénération d'énergie est le MF 77 apparu dès 1979.

Notons une accélération dès 1999, avec l'arrivée des matériels de nouvelle génération (MP 1989 MF 2000). Le type de matériel varie entre les lignes. L'année de conception suit le sigle. (Cf Tableau 39).

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Type de matériel 2008	MP 89	MF 67	MF 67	MP 59	MF 67	MP 73	MF77/ MF88	MF 77	MF 67	MF 67	MP 59	MF 67	MF 77	MP89
Type de matériel 2018	MP 05	MF 01	MF 67	MP 89	MF 01	MP 73	MF88	MF 77	MF 01	MF 67	MP 59	MF 67	MF 77	MP05/ MP89

Source RATP

La composition est différente selon les lignes et la technologie utilisée. L'évolution lente du parc implique sa stabilité. La puissance par place disponible montre l'effet des capacités selon la motorisation. Hors régénération d'énergie, pour un temps donné, sa baisse favorise l'efficacité, pour une puissance donnée le nombre de passager potentiel augmente. La baisse du ratio ne dépend pas de la conception des matériels. Celui du MP 55 est inférieur au MP 73 (Cf tableau 40).

Matériels.	Puissance KW	Motrice	Puissance par place
MP 55 (ligne 11)	1464	3	3,16
MP59 (ligne 4)	1760	4	2,51
MP59 (ligne 11)	880	2	1,90
MP 73	2400	3	4,17
MP 89 (ligne 1)/MP05	2000	4	2,78
Sprague Thomson	368	2	1,16
Sprague Thomson	1030	2	1,87
MF 67	1272	3	2,21
MF 67 (ligne3bis)	848	2	2,49
MF 77	1500	3	2,61
MF 88	840	2	2,39
MF 2000	1800	3	3,23

Source : calcul de l'auteur.

Ensuite, le nombre de motrice des trains intervient. La capacité du train à franchir des rampes en dépend. Pour une vitesse commerciale donnée la configuration des lignes exige plus ou moins de puissance. Les trains courts ont plus d'essieux moteurs que les longs (ALBERT & al, 1995). A longueur égale, il est donc plus lourd et sa puissance par place augmente (MF 67 ligne bis). Avec la mise en mouvement du véhicule et les masses en rotation, le poids des essieux moteurs croît de 20% contre 10% pour les non moteurs. L'énergie consommée par voyageur augmente. Pour le MF 2000, la limitation de la vitesse maximale du train à 70 km/h optimise le dimensionnement des moteurs et de la chaîne de traction. La baisse des exigences en puissance de traction réduit de 20% le poids des matériels. La résistance des matériaux baisse de 800 à 2000 kN à 500 à 600kN, avec les procédés de simulation et des vitesses limitées. Les portes "louvoyantes-coulissantes" économisent 300 ou 400 Kg par voiture. Néanmoins, le nombre de sièges et leur rembourrage le renforce d'autant. De même, l'isolation phonique par l'adjonction de panneaux isolateurs induit un surpoids de 50 à 100 Kg. A cela s'ajoutent la batterie de secours, les dispositifs d'information, la protection contre l'incendie, les dispositifs d'amortissement des roues pour un poids de 240Kg.

La climatisation induit un surpoids d'environ 750Kg outre la consommation de l'appareil. De plus, ces équipements rejettent la chaleur dans les tunnels et les quais, augmentant leur température. A la RATP, les trains circulant sur les lignes 1 et 14 (certains trains des lignes 7, 8 et 13) et le RER A sont dotés d'une « ventilation réfrigérée » avec une circulation de l'air interne aux voitures sans chaleur supplémentaire. Ce système, plus économe que la climatisation, augmente néanmoins la consommation d'énergie. Les réseaux régionaux sont des chemins de fer qui desservent des banlieues éloignées de la ville centre (S bahn, RER par exemple). Les RER RATP sont des métros régionaux avec des lignes dédiées. Son origine vient du plan de Ruhlmann-Langewin de 1936. Les Z 23000, issus des Sprague Thomson, sont la première génération de matériels du métro régional. Néanmoins, leur courant d'alimentation (1500 V continu) empêche le passage de ces matériels en zone SNCF (alimentée en 25Kv) lors de la mise en œuvre du RER B. Le changement de train s'imposait à Gare du nord. Un nouveau matériel est conçu en 1961 pour le RER A, le MS 61 (Métro Suburbain 1961). D'autres matériels les remplacent, le MI79 (Matériel d'Interconnexion 79), dont dérive le MI84 du RER A, bi-courant change de voltage. Le changement de trains devient un changement de conducteur. Les matériels à régénération d'énergie arrivent en 1996 avec le MI 09. La puissance disponible par voyageur augmente (Cf Tableau 41). Les matériels démarrent plus vite pour respecter les fréquences. Le parc RER est plus diversifié qu'en 1975 et plus moderne, 60% des motrices ont moins de 14 ans. Contrairement au métro, plusieurs matériels circulent sur les lignes, la consommation unitaire ne vient pas d'un type de matériel.

Tableau 41: puissance par place disponible 2008					
Matériels	Puissance KW	Rames	Capacité train	Puissance par place KW/p	Masse tonnes
Automotrice Z	1390	2	844	1,65	180
MS 61	1600	2	629	2,54	148
MI 79 MI 84	2480	2	844	2,94	208
MI 09	4500	3	1291	3,49	288

Source : RATP

2-3-3-4) Les pertes du réseau ferré.

Deux schémas de distribution de l'énergie électrique se dégagent à la RATP. Le premier renvoie au « tronçon central » à Paris intra-muros et des terminus de banlieue du métro Le réseau électrique national alimente des postes haute tension (PHT) (225 Kv ou 63 Kv) qui alimentent des Postes Eclairage et Force (PEF) (20Kv) pour l'éclairage et les équipements des stations et les Postes de Redressement (PR) (20Kv) pour la traction. Pour les premiers, la tension initiale baisse avant l'utilisation. Pour les seconds, la baisse de tension s'accompagne d'une transformation en courant continu. Des génératrices peuvent alimenter ce réseau pour évacuer des voyageurs sous tunnel avec un éclairage d'appoint en cas de pannes d'électricité. (Cf figure 12)

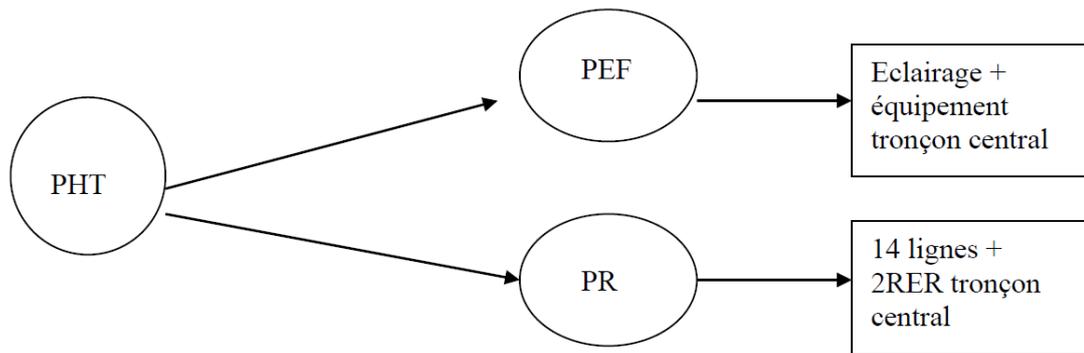
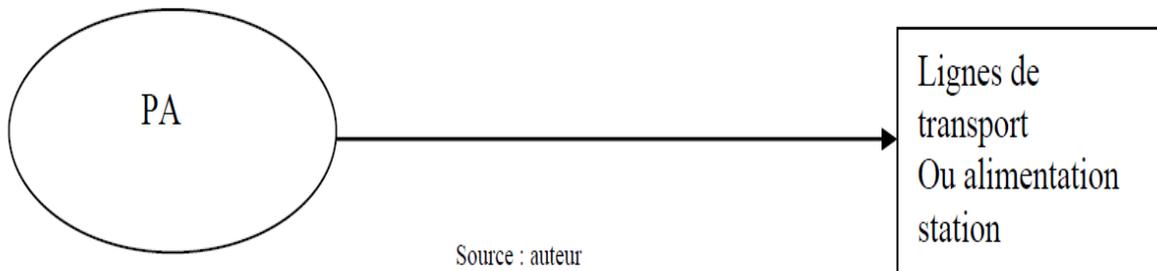


Figure 12: schéma 1 d'alimentation électrique

Source : auteur

Le deuxième schéma renvoie aux tramways et des branches de RER en banlieue (figure 16). Le réseau électrique national alimente les postes d'alimentation et de redressement (PR) comme pour un grand nombre de métro (Lyon Marseille...). (Cf figure 13)



Source : auteur

Figure 13: schéma 2 d'alimentation électrique

Ensuite des alimentations de plus faibles tensions alimentent des stations ou des bâtiments d'autobus. A la RATP, les compteurs des postes de redressement (PR) comptent l'énergie de traction et d'autres les postes annexes (Eclairage force notamment). L'interface entre le véhicule et l'alimentation s'effectue avec des caténaires ou un troisième rail. Les tensions d'alimentation varient entre 650 v et 1500 v. Deux types de perte existent celles associées aux résistances dans l'alimentation. Elles viennent de l'échauffement issu du courant dans les câbles. Les principales seraient situées dans les rails de roulement et les lignes aériennes de contact. Elles croissent avec la distance que parcourt le courant pour « regagner » le négatif du circuit (effet joule).

Aussi, la part fixe des pertes en ligne correspond à l'échauffement des câbles du à leur résistance propre. La part variable des pointes vient de l'échauffement du à l'offre. Elles seraient de 15% en moyenne avec des pointes à 42% (ADAM, 2010). Plusieurs pistes d'amélioration existent (ALBERT & al, 1995). Un rail composite (Londres) réduit la résistance du troisième rail, les consommations d'énergie, équilibre les tensions et évite l'installation de stations d'alimentation supplémentaire. Le couplage est une technique alimentant le train « moitié-moitié » par les PR. Il peut être « longitudinal » distribué le long d'une voie ou « transversal », entre les deux voies. Le retour traction s'effectue sur une moindre distance, les pertes se réduisent. La ligne de renfort est la pose de câbles spécifiques dédiés au retour traction. Elle limite la résistance des rails de roulement qui servent généralement de support.

2-3-3-5) La régénération et la récupération

La régénération transforme l'énergie mécanique en électricité lors du mouvement du mobile. L'arrivée des MF 77 intègre cette technique. Lors des séquences de freinage, les éléments moteurs du train produisent de l'énergie et la renvoient sur le rail d'alimentation. Il y a transition énergétique avec le passage d'une forme d'énergie à une autre. Néanmoins, elle n'est réutilisée qu'avec la traction du train accélérant qui la récupère si la tension se maintient sous une valeur de seuil dépendant de la tension d'alimentation. Les appels de puissance sont limités lors de l'accélération évitant une surintensité au point d'alimentation. Le taux de régénération vient donc de la coordination des trains en ligne et de la résistance des rails. (Cf figure 14).

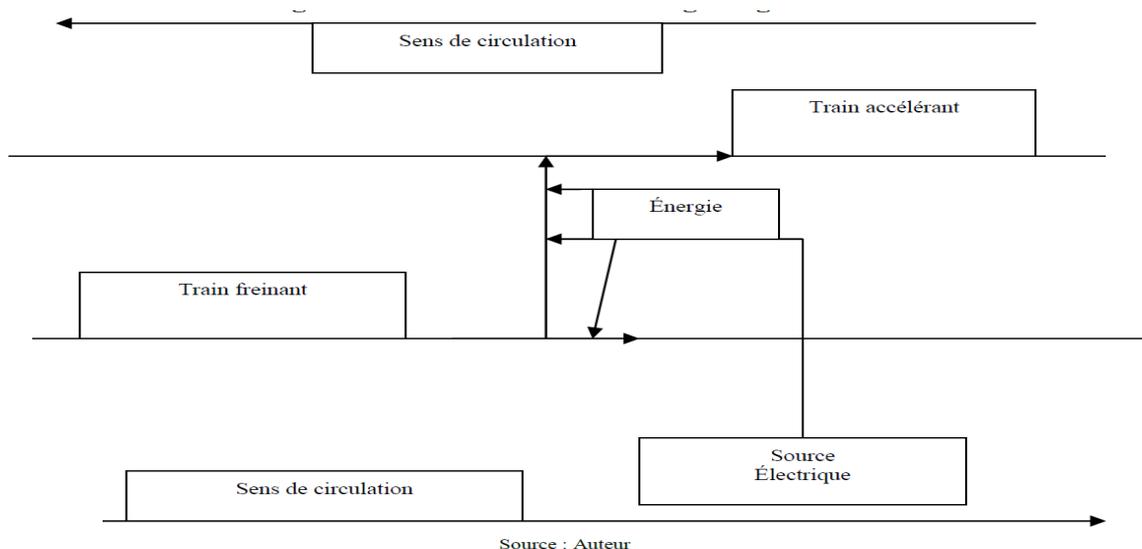


Figure 14: distribution de l'énergie régénérée.

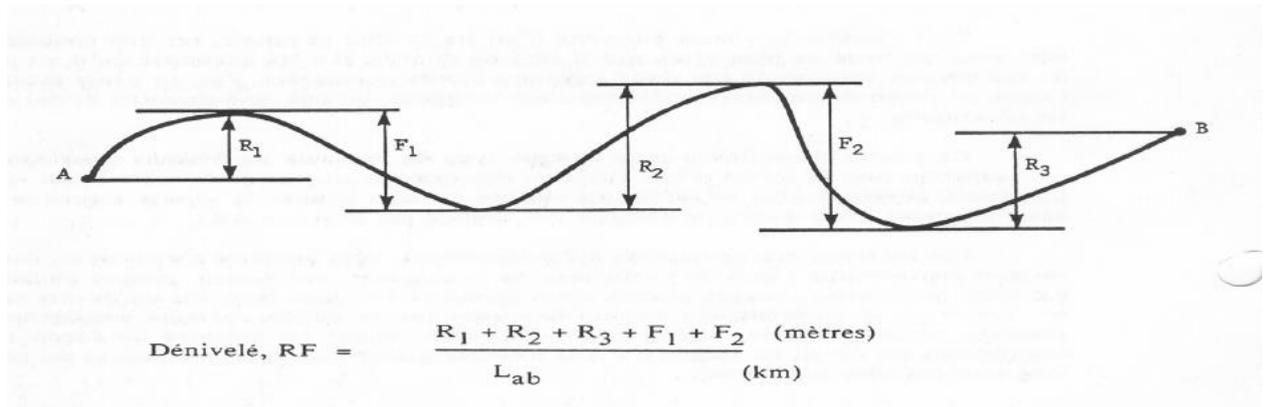
Maximum en heure de pointe, il est quasi nul en heures creuses ouvrant des perspectives attachées à une régénération par les infrastructures (PR réversibles). Les consommations spécifiques moyennes des véhicules baissent (Cf tableau 42).

Tableau 42 : consommation spécifique en Km/Km par voiture		
Matériel	Récupération	Consommation spécifique
MF67 D	Non	2.4 à 3.0
MF 77 (ETF à hacheur de courant)	Oui	1.7 à 1.9
MF 01	Oui	1.3 à 1.5
MP 59	Non	3.0 à 3.8
MP 89/MP05	Oui	1.9 à 2.3
MS 61	Non	4.2
MI 79	Oui	2.6
MI09	Oui	2.9

Source : Seiler et Leduc 2011.

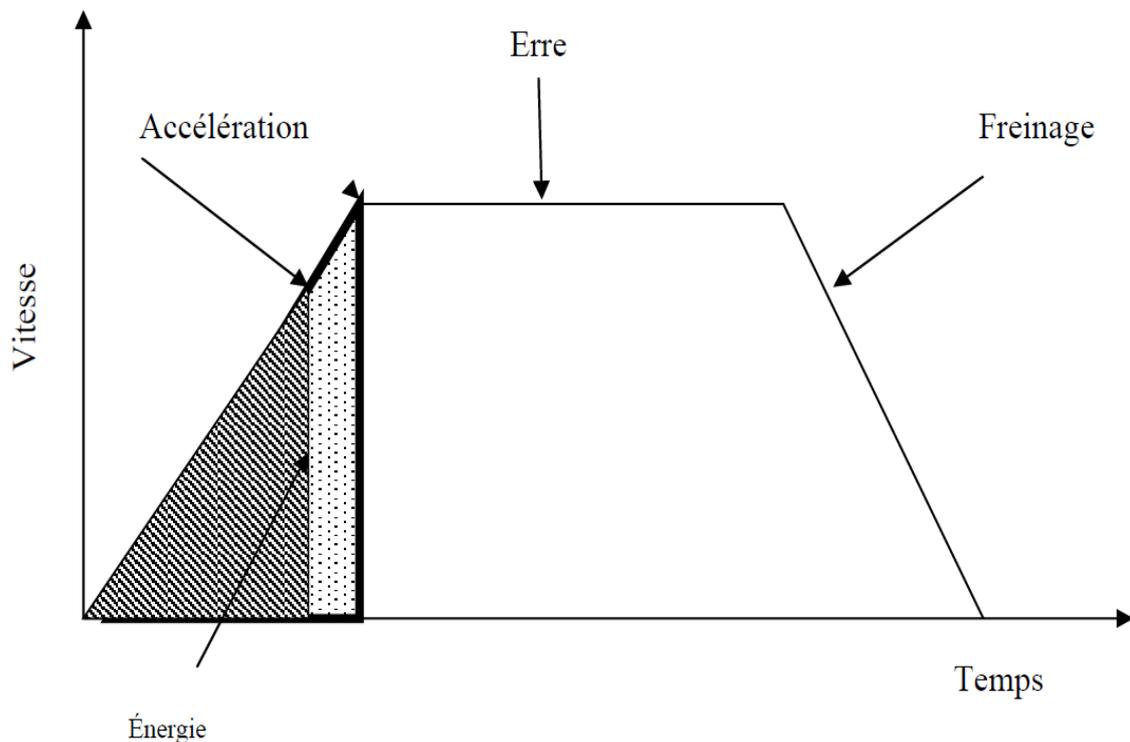
La récupération provient de la variation de la hauteur du parcours ou dénivelé de la voie et s'opère lors du mouvement. (Cf Graphique 17)

Graphique17 : dénivelé



Source Wiki

L'énergie potentielle emmagasinée pendant la première partie du trajet est restituée lors de la seconde. La partie rayée représente la séquence énergétique du premier type de parcours avec dénivelé. La partie en pointillée représente la partie supplémentaire d'énergie consommée sans dénivelé, impliquant une phase de coupure plus longue et une consommation moindre pour une même accélération. Ce principe se retrouve dans les escaliers mécaniques, les ascenseurs etc... (Cf Figure 15).



Source : Tirée de Albert et alii 1997.

Figure 15 : accélération et consommation d'énergie.

Cette restitution dépend du conducteur ou de la programmation des pilotages automatiques. Ce phénomène s'applique aussi pour les VP. Les pentes, modifient l'effort des moteurs thermiques. En descente pour une vitesse donnée, ils consomment moins (BERGNAUD, 2011).

Les métriques lentes et sinueuses augmentent les consommations d'énergie (GENDRE GRAND PIERRE, 2007). Les forces de frottement (E_f) dissipe l'énergie potentielle selon :

- La résistance de l'air, les métros le poussent impliquant une résistance supplémentaire.
- La résistance au roulement ; Les matériels pneus ont des forces de frottements qui limitent l'utilisation de l'énergie potentielle qui est dissipée sous forme de chaleur.
- La résistance à l'inscription en courbe est évaluée à 70Newton/tonne pour une courbe de 100 mètres et 30 Newton/tonne pour une courbe de 200 mètres. Celles de 300 mètres réduisent ces forces de frottement. Plus l'inter-station est courte plus la consommation d'énergie est importante, la fréquence des arrêts et des démarrages l'explique.

Certains métros ont optimisé le tracé des voies (Helsinki, Tokyo, Bucarest). Une station entre 3 et 5 mètres de profondeur économise de 20 à 40% d'énergie par rapport à une à 10 mètres. (Cf Tableau 43)

Consommation unitaire		Taux d'occupation
Tokyo	29,4	38%
Hong Kong	35,3	51%
Bucarest	73,6	18%
Mexico	74,2	26%
Lisbonne	83	30%
Helsinki	84,9	14%
Paris	88,4	24%
Hambourg	90,8	17%
Nuremberg	92,4	17%
Madrid	104,8	19%
Munich	126,8	16%
Londres	130,6	10%
Bruxelles	167,9	17%

Source : Tirée de Albert et alii 1997

A taux d'occupation équivalent, la consommation unitaire baisse, ce qui induit la variation des consommations spécifiques. Pour la SNCF, c'est dans les véhicules qu'est recherché la régénération en alimentant des batteries qui hybriderait des TER à traction diesel. L'énergie peut aussi être réutilisée dans les stations ou stockée le long des voies. D'autres technologies (pile à combustible...) émergent. Ces deux techniques régénération et récupération accroissent l'efficacité énergétique du parc. Néanmoins la consommation augmente avec l'offre sauf dans la dernière période. (Cf Tableau 44)

Traction	1983-1990	1990-1999	1999-2008	2008-2018
Métro	3	33	57	-22
Traction	1983-1990	1990-1999	1999-2008	2008-2018
RER	42	80	45	-26

Source : auteur

2-3-3-6) Les équipements du réseau ferré

Le nombre d'équipements stations (escalier mécanique, distributeur automatique, téléaffichage...) ou des lignes (aiguillage automatique, télécontrôle de la circulation...) augmentent. Leur consommation double entre 1975 et 2018 traduisant l'automatisation des fonctions de vente et de guidage des trains. L'énergie se substitue à la force de travail (Cf Tableau 45).

Années	1975	1983	1990	1999	2008	2015
Ascenseurs	19	21	26	83	74	96
Escaliers mécanique	225	387	404	478	520	531
Télévision	159	332	313	332	355	884
Sono	303	359	367	380	297	337
Téléaffichage (IMAGE +SIEL en 2015)				770	785	1272
PILI plan indicateur lumineux				129	85	13
Lecteurs (magnétique + télébillétique)	1676	1738	1806	1868	1732	4207
Distributeur automatique			162	561	1054	836

Source : RATP

Néanmoins, les consommations de 2008-2018 s'infléchissent renvoyant au plan d'économie d'énergie (RATP, 2001) avec l'usage de technologies plus efficaces (Cf Tableau 46)

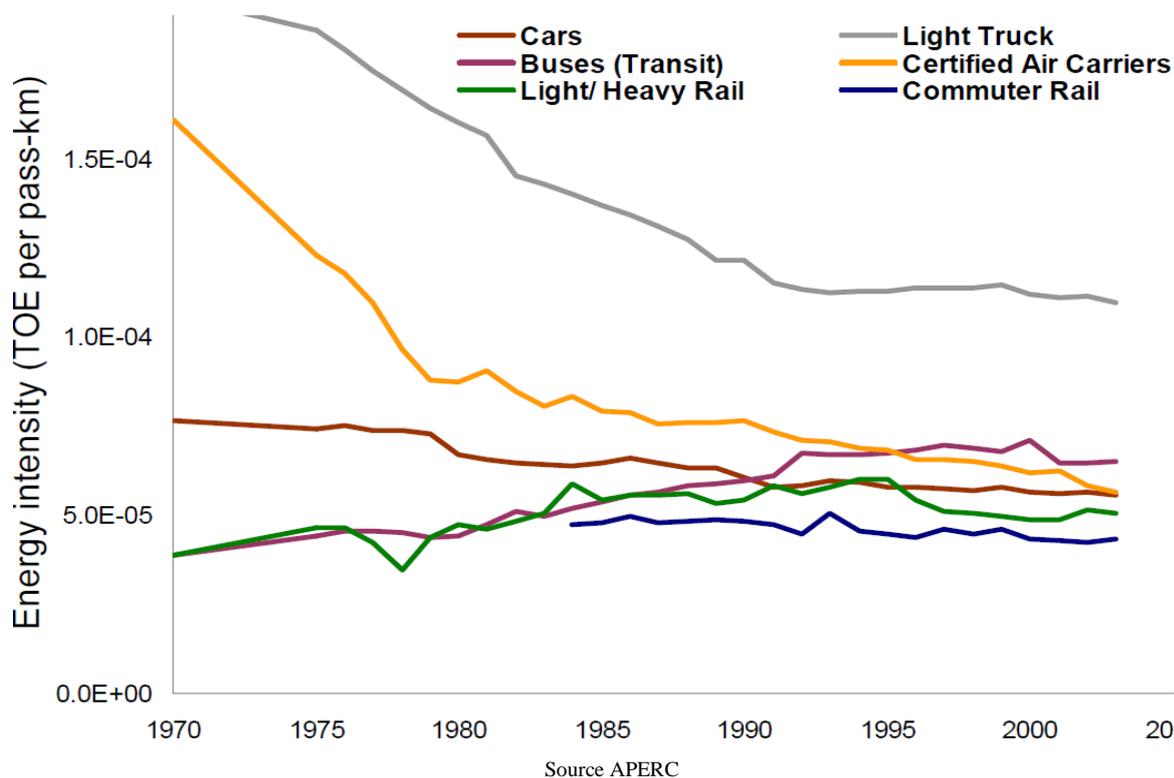
Années	1975-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008	2008-2018
Equipement	60,4	2,6	67,5	36,5	-31

Source : RATP

2-3-4) Effet du progrès technique sur les efficacités des modes : la convergence.

Sur longue période (35 ans), l'efficacité énergétique de la voiture augmente aux USA (APEREC, 2007) A taux d'occupation constant, cela traduit des effets différenciés dans la diffusion des technologies dans les parcs selon les modes. Si nous divisons les deux efficacités TC et VP alors il converge vers 1. Le TC est alors aussi compétitif que la voiture. Aussi la convergence est la tendance à l'égalisation des consommations unitaires des modes, c'est une évolution. Les modes ont convergé lorsque les deux consommations unitaires sont égales c'est un état (Cf Graphique 18)

Graphique 18: convergence



Cette tendance se retrouve en France (PLASSAT, 2005) où nous retrouvons une baisse des consommations spécifiques pour la voiture vis-à-vis du ferroviaire Néanmoins les efficacités énergétiques donnent un résultat plus en faveur des TC (aérien ferroviaire) à cause du taux de remplissage. (BIGO, 2020) (Cf Graphique 19).

Graphique 19 : baisse des consommations spécifiques

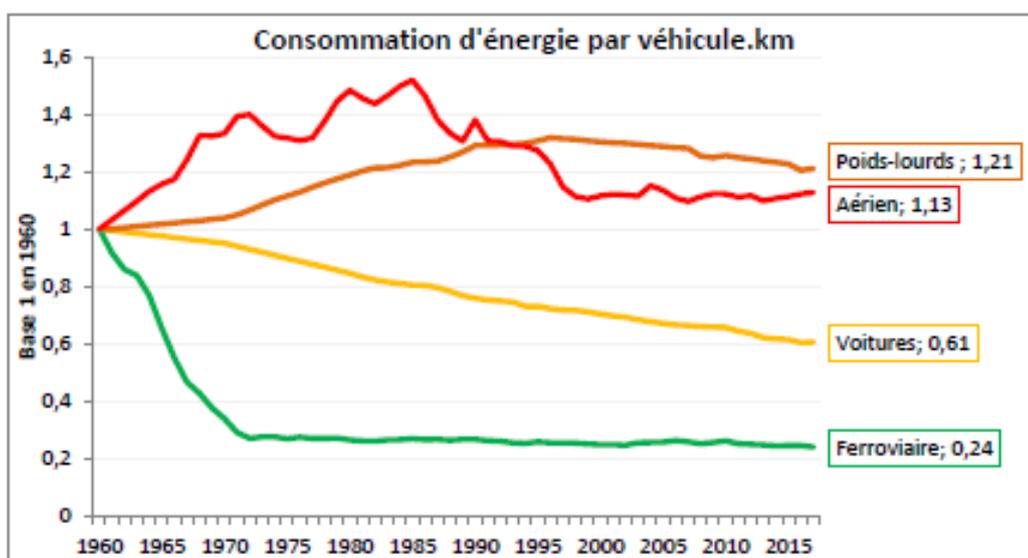


Figure 23 : Evolution de l'efficacité énergétique (par véhicule.km) pour différents modes par rapport à 1960

Source Bigot

En IDF, les consommations spécifiques des VP baissent avec la diésélisation du parc. Cette baisse modifie les efficacités énergétiques à taux de remplissage constant. Néanmoins, l'amélioration des performances énergétiques de la VP n'implique pas nécessairement une croissance de sa compétitivité énergétique vis à vis du TC. En effet ce mode intègre aussi des progrès technologiques ce qui est le cas pour la RATP. De plus, la variation du taux de remplissage peut à son tour modifier les efficacités énergétiques respectives des deux modes. La moyenne ne signifie pas que les VP deviennent nécessairement plus efficaces que les TC quelque-soit les jours. Enfin, la vitesse peut aussi modifier les performances des véhicules et donc les consommations spécifiques.

3) La vitesse comme facteur de variation réticulaire des consommations spécifiques

3-1) La vitesse réticulaire

La vitesse est une notion abstraite décrivant un mouvement. Aristote prenait l'image de l'eau versée, Galilée effectuait le rapport entre les distances et les temps pour obtenir une inégalité formelle et obtenait une première approche de la vitesse. Varignon définit la notion de vitesse instantanée (qu'il nomme vitesse en chaque instant) par un écart infiniment petit de la distance dx en fonction du temps dt au travers d'une communication à l'Académie royale des sciences le 5 juillet 1698. Einstein montre que la croissance de la vitesse remet en cause la notion du temps en tant qu'absolu alors que Kant en faisait une catégorie posée « à priori ». C'est alors par rapport au mouvement que se définissent l'énergie et la masse. La vitesse devient la référence et non une représentation dans un référentiel. Dans le domaine des transports, elle modifie la perception des distances, la capacité à atteindre un lieu. L'espace est espace-temps et se déforme. (Cf Figure 16)

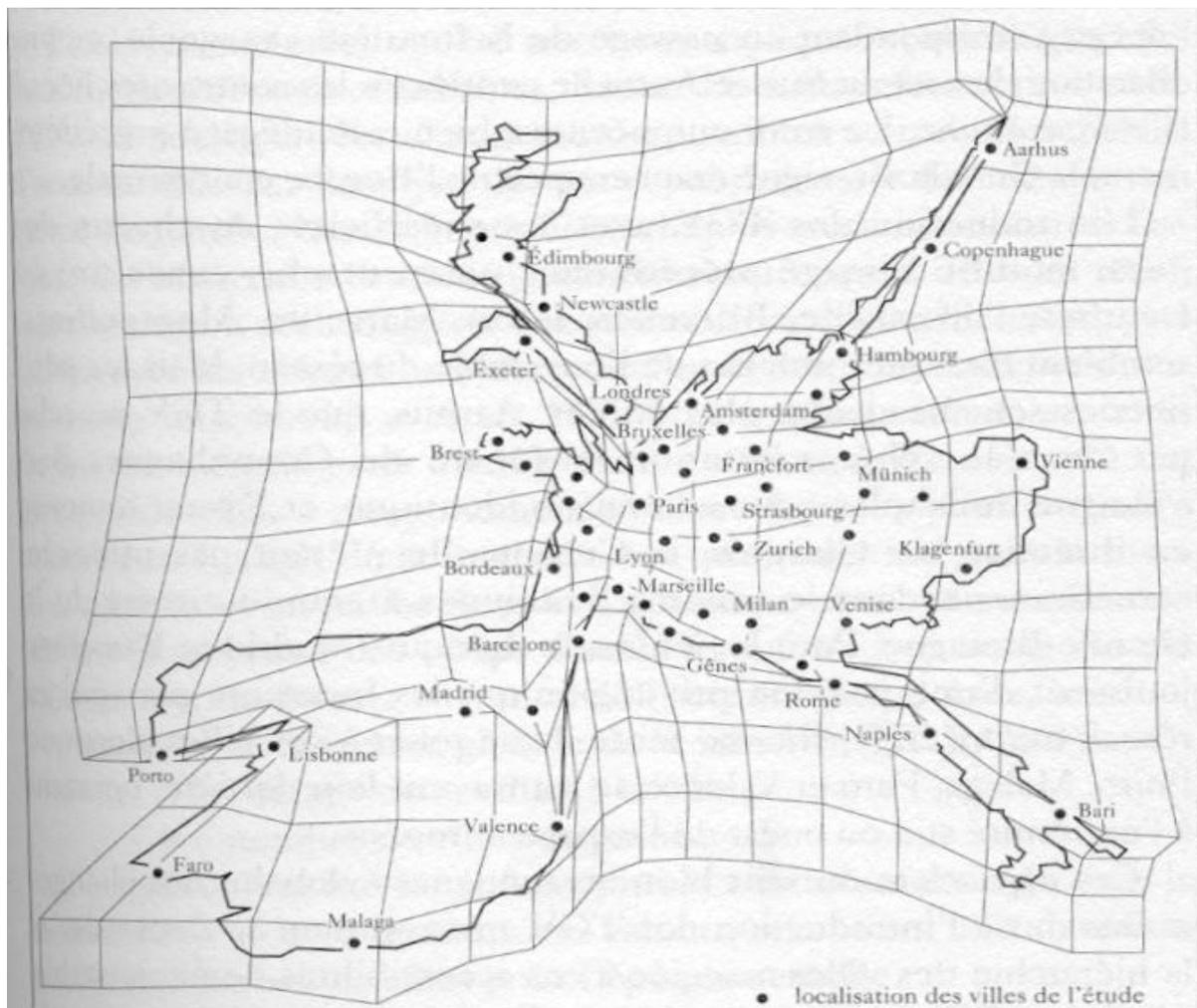
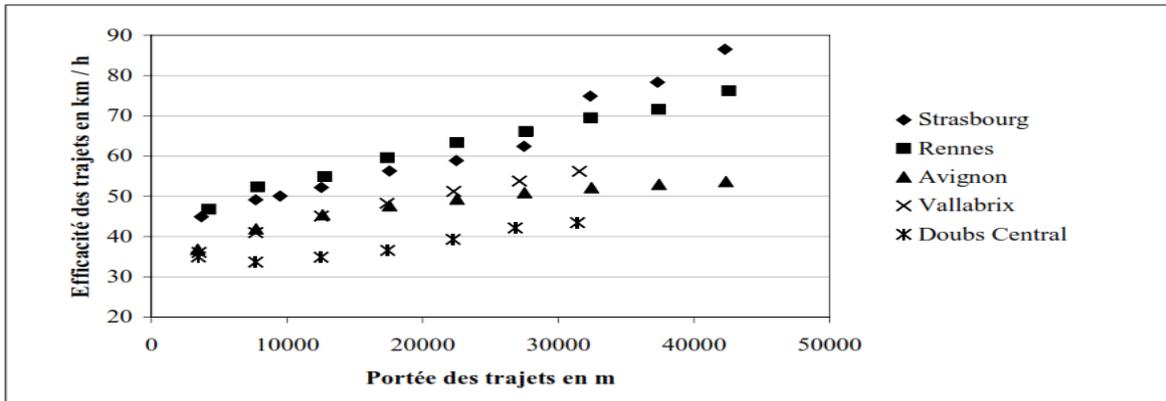


Figure 16: espace et espace-temps.

Source : internet

La vitesse est un facteur de qualité du fonctionnement des réseaux (GENDRE GRAND PIERRE, 2007). Elle traduit la disponibilité de la surface dans l'infrastructure, plus elle est disponible, c'est-à-dire sans conditionnement (travaux, feux rouges, croisement, surface dynamique...), plus la vitesse peut augmenter. Cette vitesse est donc réticulaire. Le réseau produit ou non de la vitesse. Cette capacité vient des surfaces des voies empruntées. Une autoroute est plus capacitive qu'une nationale. La vitesse y est plus forte. Cette stratégie attachée aux infrastructures (GENDRE GRAND PIERRE, 2007) des réseaux viars, optimise les vitesses qui augmentent avec les distances parcourues. Certains vont plus vite que les autres. Des détournements apparaissent puisque les personnes gagnent du temps en usant de métriques plus rapides. La distance de parcours croît le temps est constant. Ces détours sont l'effet de la hiérarchisation des réseaux (PRUD'HOMME, 2016). (Cf Graphique 20) ;

Graphique 20 : vitesses et portées.



Source : gendre grand pierre.

3-2) Vitesse de circulation et fluidité ;

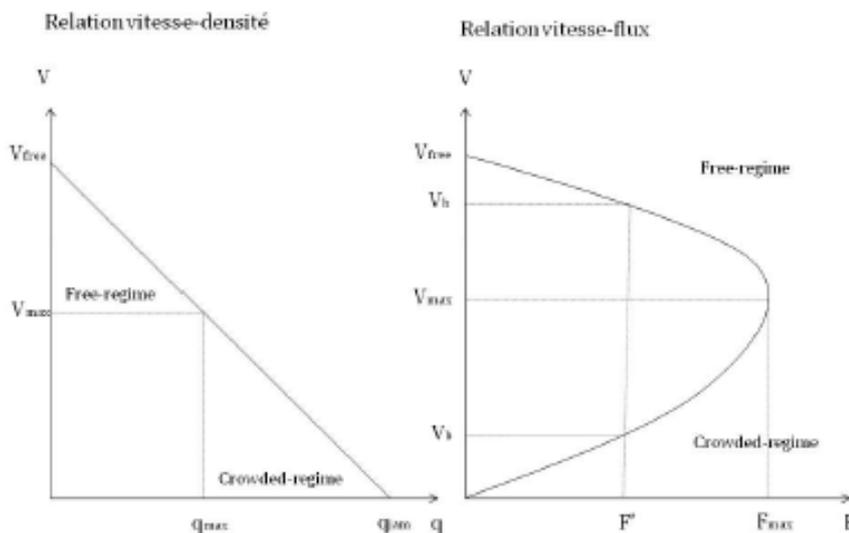
L'approche microscopique (comportement du conducteur des véhicules) à macroscopique (ensemble de véhicules) s'effectue avec l'intégration des calculs du trafic (ENALTY, 2003). Connue pour des sections de route, elle se généralise difficilement. Dans l'approche macroscopique, le débit des réseaux et la vitesse sont interdépendants :

$$V = V_{\text{free}} + c \times q \quad (25)$$

Source Koning

Les vitesses moyennes « macroscopiques » se calculent avec des « concentrations de véhicule » ou des flux. La première est une relation inverse entre vitesses et densité de véhicules. (Cf Graphique 21)

Graphique 21: relation vitesse concentration de véhicules.



Source : Koning

En régime saturé le nombre de véhicules est maximum et la vitesse est nulle correspondant à la congestion (KONING, 2012).

L'approche vitesse-flux renvoie au même type analyse avec les véhicules par heure qui sont la variable de fonctionnement du réseau. Les origines de la congestion divergent selon les espaces (pointe de trafic ou un déficit d'offre). La congestion en ville implique un réseau viaire avec une gestion des feux due aux croisements. Sur les voies rapides elle dépend d'autres phénomènes puisque les tronçons de route sont accessibles qu'à des points spécifiques (LESTEVEN, 2014). Pour le BP parisien (KONING, 2012) nous obtenons (Cf Equation 26) :

$$F(v) = 356.86 \times v - 3.95 \times v^2 \quad (26)$$

Source Koning

Le débit maximum est atteint à 42.5 Km/h et 8020 veh/h soit la dérivée du débit. La vitesse moyenne est de 37.5 Km/h, proche de l'optimum en régime moyen. Elle dépend des largeurs largeur d'emprise (LME) (HERAN & RAVALET, 2008) (Cf Equation 27) :

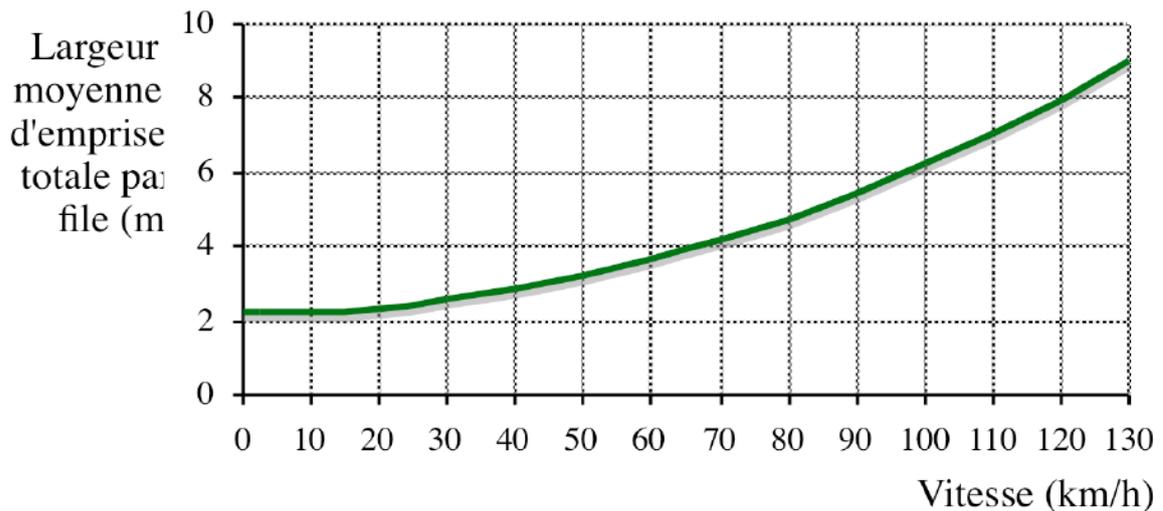
$$LME = 2.2 + 0.0052V^2 \quad (27)$$

Source PREDIT

Plus la largeur est importante plus la vitesse des véhicules l'est aussi (Cf Graphique 22)

Graphique 22 : largeur des voies et vitesses

Relation entre la vitesse et la largeur moyenne d'emprise totale par file

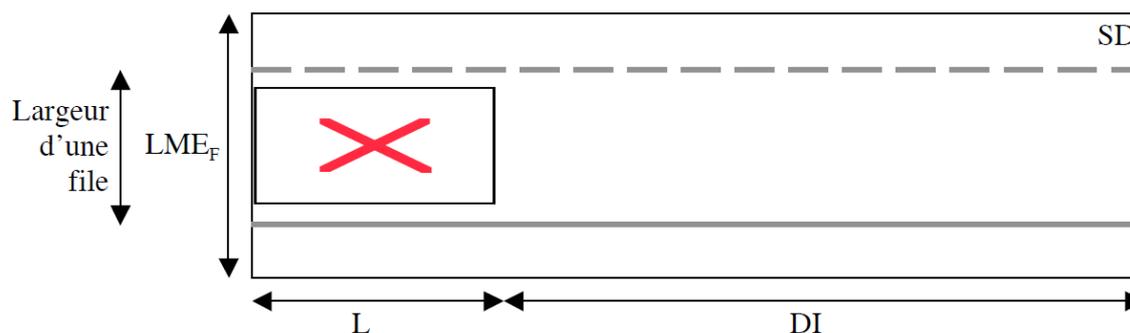


Source Heran ravalet

A partir de cette largeur nous introduisons la notion de surface dynamique (Cf Figure 17)

Figure 17:surface dynamique

Schéma représentant le calcul de la surface dynamique



Source Heran ravalet

Elle est le produit de la largeur de la voie par la longueur du véhicule et la distance intra-véhiculaire. Cette surface dynamique dépend de l'insertion des véhicules dans le trafic. Une onde de choc se produit si l'insertion est trop lente conduisant les autres conducteurs à ralentir (CEREMA, 2018). Elle dépend aussi des vitesses. L'interaction des comportements individuels est donc inhérente à la circulation et aux vitesses réticulaires. (Cf Tableau 47)

Tableau 47: surface dynamique et vitesse

La surface dynamique selon la vitesse

Vitesse (km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Distance d'arrêt (m)	3,3	7,5	13	19	26	34	44	54	65	77	90	104	119
Distance intervéhiculaire (m)	2,9	6,0	9,3	13	17	20	25	29	34	38	43	49	54
Largeur d'emprise par file (m)	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	3,0	3,3	3,6	4,0	4,4	4,9	5,4	5,9
Largeur moyenne d'emprise totale par file (m)	2,2	2,4	2,6	2,8	3,2	3,6	4,2	4,8	5,5	6,2	7,1	8,0	9,0
Surface dynamique (m ²) par rapport à 30 km/h	15	24	34	48	66	89	119	157	205	263	334	419	521
			1	1,4	1,9	2,6	3,5	4,6	6,0	7,7	9,8	12	15

Source Heran ravalet

3-3) Calcul des vitesses réticulaires des réseaux routiers en IDF.

Le temps passé en circulation (QT) s'exprime en véhicules x heures et correspond au temps passé sur le réseau par l'ensemble des véhicules y circulant durant une période donnée. La vitesse de circulation moyenne en IDF s'exprime en km/h (DIRIF, 2016) (Cf Equation 28) :

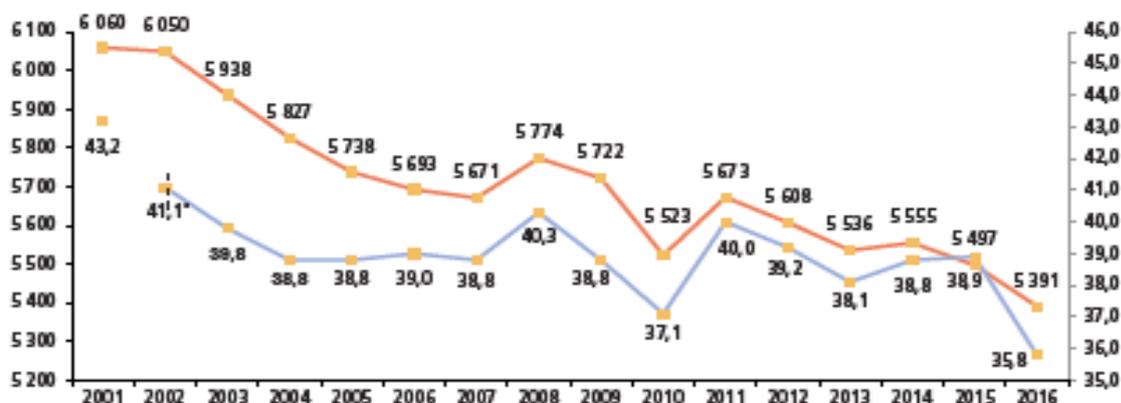
$$V = QL/QT \text{ (28)}$$

QL = Le volume de trafic. La vitesse instantanée d'un mobile se mesure de plusieurs manières (OFROU, 2010) (avec un système radar, système laser, par tronçon, avec barrières lumineuses, avec capteurs piézo). Néanmoins, les données internes de trafic VP sont fournies que sur les réseaux instrumentés. D'autres données dépendent des conseils généraux selon leur dispositif de comptage.

Les vitesses enregistrées en 2008 se distinguent entre les radiales, (entre A 86 et le BP (Boulevard Périphérique) = 59.3 Km/h, Francilienne et A 86= 77.3 Km/h) et les rocades (Francilienne = 76.1 Km/h, A86 = 56 Km/h).

Pour le BP, il existe la charge (courbe orange) et la vitesses (courbe grise). Les vitesses moyennes autour de 38KM/h (courbe grise) sur dix ans varient faiblement. (Cf Graphique 23)

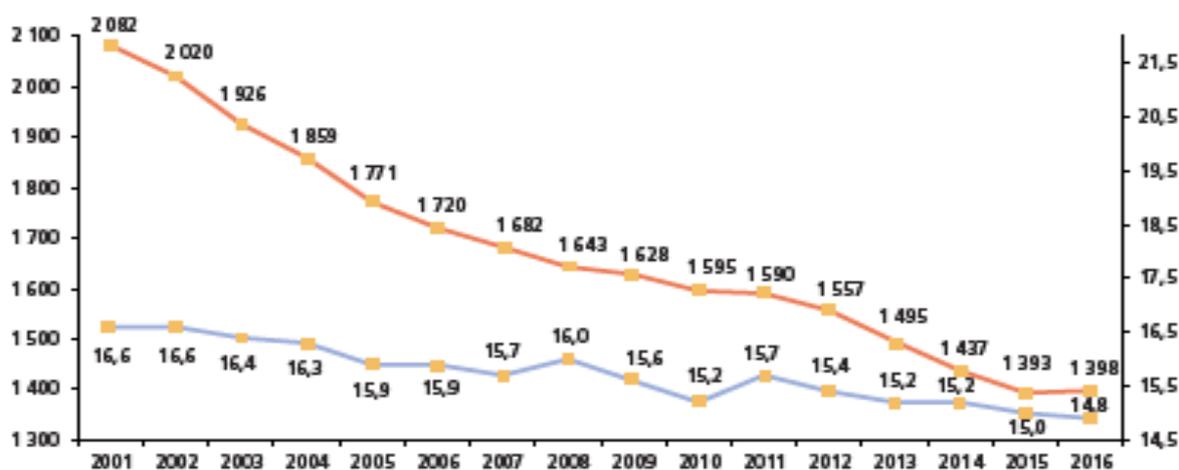
Graphique 23: circulation périphérique Paris



Source : Ville de Paris

La vitesse diminue de 20 km/h entre le BP et l'intérieur de Paris où la courbe grise montre une stabilité des vitesses 16.6 en 2001 contre 14.8 en 2016. Ses trames viaires ont un maillage très important. Aussi des priorités, des feux rouges, des passages piétons, réduisent les vitesses (Cf Graphique 24)

Graphique 24: circulation intra-muros Paris



Source : ville de Paris

Il existe une baisse de la vitesse de la périphérie vers Paris. Ces baisses de vitesses conduisent alors à une surconsommation d'énergie qui se traduit dans les modèles et les mesures par une plus forte consommation spécifique. Ensuite la vitesse de déplacement en IDF est plus faible que celle des autres régions françaises. La saturation des infrastructures l'expliquerait (ENMV, 2020).

3-4) La vitesse des lignes TC RATP

Selon les statistiques la vitesse reste stable sur les réseaux Paris environ 12Km/h et Banlieue 15,2 Km/h entre 1975 et 2015. Néanmoins ces agglomérats cachent des variations. La vitesse en KM/h des autobus de notre échantillon de lignes est inconnue.

Nous l'estimons avec l'indicateur KCC (Kilomètre commerciaux parcourus) par JA (Journée Agent) soit le nombre d'heures de conduite effectués. Nous faisons la moyenne (73), le minimum et le maximum de l'ensemble. (Cf Tableau 48).

Moyenne	73,54
Minimum	24,11
Maximum	173,01

Source : RATP

Des vitesses extrêmes sont enregistrées dans les services de nuit ou les services spécifiques de type traversiel qui sont de dessertes de quartier. Les autobus dépendent de la circulation des voitures et de la congestion. La mise en place d'une partition de la voirie en sa faveur est censée améliorer sa vitesse et le trafic (UITP, 2001). Malgré l'aménagement spécifique pour améliorer les vitesses du service PDU (Plan de Déplacement Urbain) elles varient faiblement par rapport aux autres (H PDU) à Paris. En banlieue la différence moyenne est de 2KM/h entre les lignes PDU ou non (Cf Tableau 49)

Tableau 49 : autobus					
Paris			Banlieue		
Lignes	PDU	H PDU	Lignes	PDU	H PDU
Moyenne	59,03	59,36	Moyenne	77,09	75,5
Minimum	49,21	49,21	Minimum	58,27	35,37
Maximum	75,49	77,11	Maximum	105,21	129,01

Source : auteur

L'aménagement spécifique des voies, ou site dédié, à l'instar des tramways, ne semble pas modifier les vitesses des réseaux routier à la RATP. Ensuite, la vitesse reste stable sur le réseau ferré entre 1975 et 2008. Elle varie faiblement sauf pour la ligne 14 configurée spécifiquement. La vitesse maximum est de 70KMh sur le métro et de 110 Km/h sur le RER. Les lignes de RER desservent la banlieue sur la majorité de leur longueur expliquant leur vitesse supérieure. (Cf Tableau 50)

Ligne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B
1975	25.8	22.2	22	21	22.9	24	21.9	25.2	23.4	23.2	22.3	22.3	24.6	Abs	49.4	40.4
2015	27,4	21,6	21,7	20,9	24,9	24,4	24,7	26,7	23,2	24,5	25,4	25,1	26,4	38,6	50,1	38,4

Source : RATP

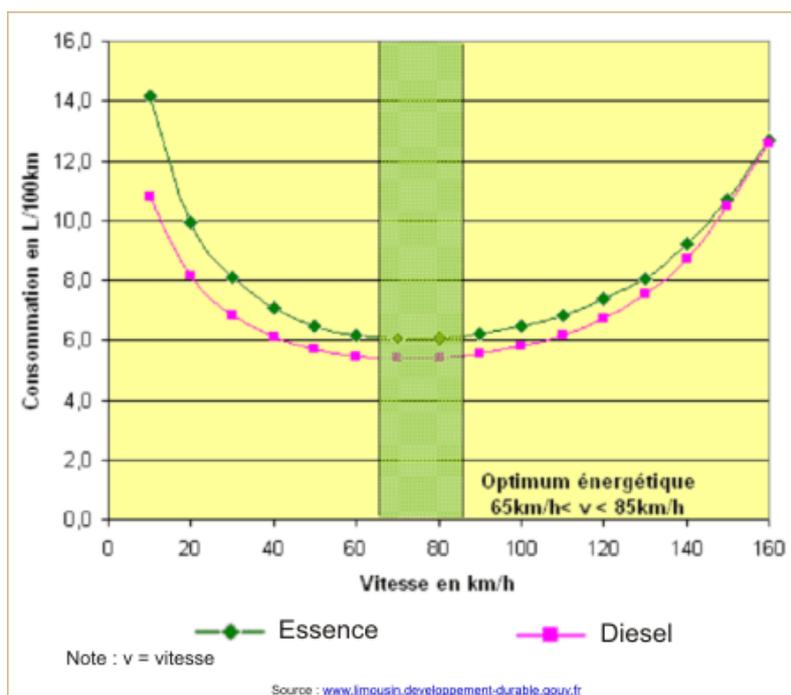
La régénération, la variation des vitesses et des accélérations (SEILER & LEDUC, 2011), entre les différentes lignes du réseau ferré modifient les consommations. La programmation des PA (Pilotage Automatique) d'ancienne génération impliquait une surconsommation de 10% vis-à-vis des conduites manuelles à la RATP. Les séquences d'accélération plus fortes pour diminuer l'intervalle lors des heures de pointe l'expliquent. Le train part de la station avec un train arrêté devant lui, impliquant un arrêt et un redémarrage en inter-station. La vitesse moyenne de parcours de l'inter-station baisse telle une congestion routière.

Il n'y a pas de modèles unifiés (diagramme fondamental) dans la distribution de l'offre de TC même si plusieurs modèles existent pour le réseau ferré (CUNIASSE, 2015). Quelque-soit les réseaux la diminution des vitesses caractérisent cette situation. La situation idéale du plan de transport n'est donc pas respectée.

3-5) Vitesse et variation des consommations spécifiques.

L'énergie cinétique renvoie à la masse que multiplie la vitesse au carré. La consommation d'énergie est donc liée à la vitesse. Il existe un optimum de vitesse de circulation pour la consommation spécifique plus faible à 70Km/h. Deux effets de la hausse et de la baisse des vitesses se distinguent. Le premier augmente les consommations d'énergie ($E = \frac{1}{2} MV^2$). La baisse de la vitesse de 4% pour la VP diesel et de 8% pour l'essence économiserait de 0.9 à 2% de la consommation de carburant sur le parc (ROLIN, 2004). Une formation « d'éco-conduite », des conducteurs économiserait de 15 à 20% de carburant à court-terme. A long terme, l'effet est moins fort 4 à 8,9% nécessitant une formation de rappel (HONG, 2011). La réduction de la vitesse sur route aurait fait baisser les consommations entre 1.9 et 6.5% entre 2002 et 2005. Une réduction des vitesses de 130 à 100 Km/h réduirait la consommation de 17% pour une perte de temps de 8 minutes. (BIGO, 2020). (Cf Graphique 25)

Graphique 25 : consommation en litre/100km et vitesse



Source INRETS

Le second effet provient des vitesses faibles qui renvoient à une faible fluidité de la circulation. L'arrêt et le redémarrage du véhicule augmentent ses appels de puissance dans la mise en mouvement. Les moteurs fonctionnent à l'arrêt avec des consommations à vitesse nulle. Une circulation fluide baisse les consommations spécifiques des modes routiers, y compris des autobus (ENERDATA, 2004).

3-6) Consommation spécifique : l'effet spatial

Les cycles de conduite dans les laboratoires simulent les comportements des véhicules dans les conditions réelles d'exercice (ANDRE & al, 1999), (ANDRE, 2014). Elles ne sont pas testées en milieu urbain (SETRA, 2009). L'étude de l'ADEME comprend les véhicules disponibles en France. Ils montrent la puissance administrative et réelle. Le sigle BV désigne la boîte de vitesse (M étant manuelle) A (automatique) le chiffre (5 ou 6) désignant le nombre de rapport de transmission. Trois milieux existent urbain extérieur à l'urbain et mixte dans les calculs. L'urbain est le plus consommateur des cycles. Le dictionnaire le Robert le définit comme « ce qui est de la ville ». Cette notion fait l'objet d'un grand nombre de débats (BRAUDEL, 1979) (BAIROCH, 1985). Aujourd'hui, l'agglomération fixée par l'INSEE est de 2000 personnes (JULLIEN, 2000). Une surconsommation due à la baisse des vitesses (GALLEZ & HIVERT, 1998) (ENERDATA, 2004) (ADEME, 2016) traduirait l'effet de « l'urbain » c'est à dire d'un nombre d'habitants (Cf tableau 51).

Tableau 51 : cycle de conduite.

Marques Modèle, Version	CNIT Code National d'Identification du Type (retrouvez tous les CNIT sur http://cariabellingademe.fr)	Puissance		BV	Consommation		
		Admin. CV	Max KW		Urb.	Ex-urb.	Mixte
CITROEN - Diesel (suite)							
BERLINGO HDi (90ch) FAP BVM5	M10CTRV001P035	5	68	M 5	6.2	4.8	5.3
C-CROSSER 5PL HDi (160ch) BVM6	M10CTRV002T947	9	115	M 6	8.6	5.6	6.7
C-CROSSER 5PL HDi (160ch) FAP DCS	M10CTRV002U948	9	115	A 6	8.8	5.8	6.9
C-CROSSER 7PL HDi (160ch) FAP BVM6	M10CTRV002V949	9	115	M 6	8.6	5.6	6.7
C-CROSSER 7PL HDi (160ch) FAP DCS	M10CTRV002W950	9	115	A 6	8.8	5.8	6.9

Source : ADEME 2018.

La consommation spécifique VP augmente avec le nombre d'habitants Les zones rurales ont des consommations plus faibles que les zones urbaines comme la région parisienne. Aussi la baisse des vitesses des réseaux se conjugue avec le nombre d'habitants du territoire. Il existe donc une interaction entre l'espace de circulation la vitesse et l'efficacité énergétique. (cf Tableau 52).

Tableau 52: effet de la spatialisaton sur les consommations spécifiques

	1990	1995	1997	1998*	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<i>Unité : litre/100 km</i>												
<i>Zone d'habitat</i>												
zones rurales	7,8	7,4	7,2	7,3	7,2	7,2	7,1	7,0	6,9	7,0	6,8	6,7
2 000 à 50 000	8,0	7,5	7,5	7,6	7,4	7,4	7,5	7,2	7,1	7,0	6,9	6,9
50 000 et plus	8,5	7,9	7,9	7,8	7,8	7,7	7,7	7,8	7,6	7,3	7,4	7,3
région parisienne	8,9	8,5	8,3	8,3	8,3	8,3	8,1	8,1	8,0	7,8	7,5	7,6
Moyenne générale	8,3	7,8	7,6	7,6	7,6	7,5	7,5	7,4	7,3	7,2	7,1	7,0

Source : SECODIP

Les sites propres de certains TC « les protégeraient » de cet aspect (BONNAFOUS, 2003).

4) Conclusion

Le périmètre d'action des transporteurs ne recouvre pas les mêmes zones. Plusieurs sources de données existent. Les statistiques RATP, la base UITP, l'OMNIL, pour le TC, le CTN, le CDPD ou les mesures effectuées par le panel SECODIP pour le VP. Les carburants n'ont pas les mêmes unités de mesures et les mêmes processus de transformation énergétique. L'utilisation de l'unité physique joule à l'énergie primaire uniformise les différentes énergies de traction dans leur consommation unitaire en les intégrant.

La consommation unitaire traduit la productivité énergétique (efficience) pour un service donné. C'est le ratio de la consommation spécifique et du taux de remplissage qui n'est pas le taux d'occupation. Pour la voiture c'est l'occupation d'un véhicule alors qu'il s'agit du ratio de la charge moyenne sur le service offert pour le TC. Ces derniers dépendent du nombre d'entrants, du parcours moyen, des capacités et du nombre de kilomètre offert dans une ligne. La stagnation du taux d'occupation montre une croissance simultanée de la demande et de l'offre. La consommation spécifique mesure les facteurs techniques de la consommation selon l'offre. Pour la VP, nous constatons alors une baisse des consommations spécifiques due à la diésélisation et à la baisse des consommations unitaires des véhicules à essence. D'autres facteurs de variation existent selon les véhicules mais aussi des zones de circulation. Les parcs et les vitesses de circulation modifient alors les consommations spécifiques. Pour les TC, nous constatons une augmentation de la puissance et des consommations des autobus. Pour le réseau ferré, si les technologies et les parcs tirent les consommations à la baisse du réseau ferré, avec l'introduction de la régénération, d'autres éléments compensent cette baisse. Le réinvestissement énergétique implique une stagnation des consommations spécifiques pour les modes ferrés. Pour les vitesses nous une baisse des vitesses de la périphérie vers le centre et une relative stabilité des vitesses dans le temps à Paris.

L'efficacité énergétique des TC vis-à-vis de la VP dépend de deux variables. Les taux de remplissage ou d'occupation, et la consommation spécifique. Dans cette dernière, deux sont remarquables en IDF l'effet du progrès technique avec la diésélisation du parc et la réduction des vitesses selon la quantité d'habitants dans l'espace en particulier pour la VP (Cf Tableau 53).

Tableau 53 : tableau des variables de l'efficacité énergétique des voyageurs

VP		TC
Taux de remplissage et d'occupation moyen		Stable
Consommation spécifique	Progrès technique	Récupération d'énergie + automatisation des fonctions annexes
	Effet spatial	Vitesse variable réseau routier et stable réseau ferré.

Source : auteur

Ces variables évoluent différemment entre les deux modes VP et TC. Nous étudions l'effet de ces trois facteurs sur la compétitivité énergétique des modes en IDF.

Chapitre 2 : Mise-en-évidence de la convergence des consommations unitaires TC et VP (voyageur.km) en Ile-de-France.

Introduction.

Notre recherche s'intéresse à l'effet de la variation de trois variables identifiées de l'efficacité énergétique en IDF : le taux de remplissage, le progrès technique, la réduction des vitesses selon les espaces.

Nous posons l'hypothèse que l'évolution différenciée de ces facteurs peut conduire à une baisse de compétitivité énergétique du TC vis à vis de la VP et conduire à une convergence ,c'est-à-dire à une égalisation des consommations unitaires. En effet la compétitivité du TC n'est pas une donnée mais un résultat issu de l'usage d'une technologie dans un milieu donné. Or de nombreux indices montrent au travers du premier chapitre que ce phénomène constaté par ailleurs pourrait se reproduire en IDF.

Nous examinons cette question en trois étapes :

Nous exposons d'abord des éléments de méthode. Nous choisissons une méthode empirique plutôt que la simulation modélisée ce qui nous permet d'observer dans l'espace les variations de l'efficacité énergétique et l'effet du progrès technique. Nos données sont issues de la base UITP, des statistiques RATP et des études d'ENERDATA (2004). Nous montrerons que l'approche quantitative sur la base UITP, si elle montre une causalité entre taux d'occupation et consommation unitaire reste insuffisante pour notre objet.

C'est à partir des secteurs EGT (EPCI) que nous examinons cette hypothèse de convergence des consommations unitaires VP et TC. Nous les calculons en IDF pour le Transport en commun et la VP au sens des EGT. Nous les spatialisons dans le temps à partir des secteurs EGT (EPCI). Nous pouvons alors discuter selon les couronnes de l'évolution des consommations unitaires et donc des indices de convergence.

Nous exposons l'indice de convergence à partir de la base UITP avant d'envisager ses variations en IDF. Cette spatialisation permet alors d'examiner l'effet du progrès technique selon les couronnes mais aussi l'effet combiné du progrès technique et du taux de remplissage selon ces mêmes couronnes vis-à-vis de l'indice de convergence.

Le chapitre est donc décliné en trois parties :

La première à la méthodologie.

La seconde au calcul des consommations unitaires des modes TC et VP sur la région IDF depuis 1975.

La troisième à la mise en évidence d'une convergence en IDF.

1) Élément de méthodes modèles versus empirisme.

1-1) Les modèles énergétiques.

Plusieurs modèles de calcul d'émissions existent (BEED, COPERT IV, IMPACT...). L'agence européenne pour l'environnement utilise le modèle COPERT (Computer Programme To Calculate Emission Of Road Transport). Le logiciel IMPACT de l'ADEME l'intègre. La structure est donnée ci-dessous (Cf Figure). (ANDRE M. C., 2015) (Cf Figure 18)

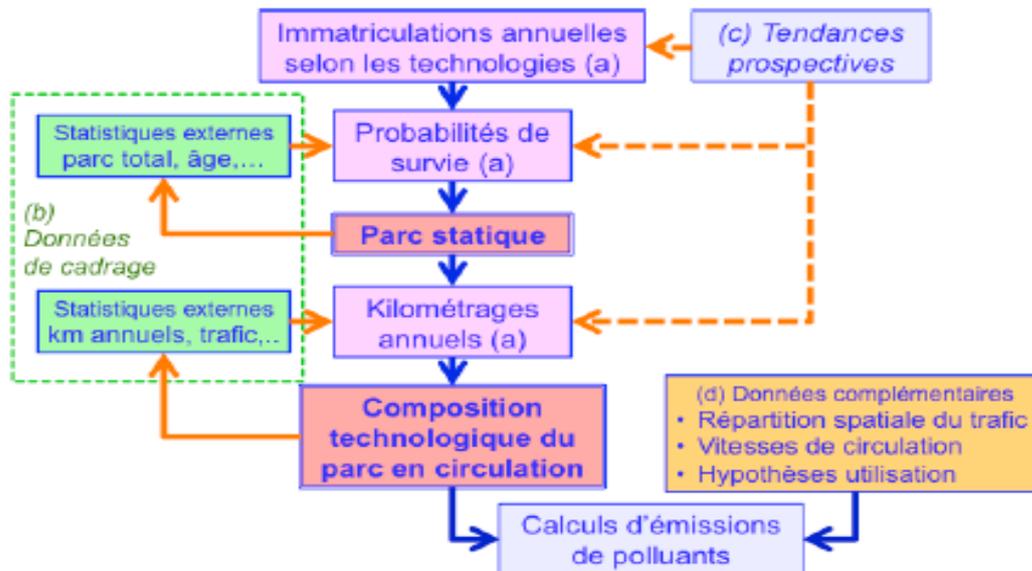


Figure 18: calculs d'émission de polluants et parcs.

Source : André

Plusieurs types de données sont définis. La longueur du tronçon et sa pente, le nombre de VL, PL, Bus et une clé VUL (taux de VUL), la vitesse des VL, PL et Bus, le milieu d'insertion du tronçon (urbain dense, urbain diffus, rase campagne) pour la monétarisation des effets de la pollution, le parc à prendre en compte (année, type, parc, modifié par l'utilisateur), l'année, qui fait référence à une structure de parc et à une consommation de carburant, le mois de l'année, qui renvoie aux conditions de températures, le nombre journalier de trajets effectués VP, pour le calcul des émissions par évaporation utilisée aussi pour les surémissions à froid, la longueur moyenne des trajets, la charge PL (0,50 ou 1). Nous constatons deux boucles de rétroaction sur le parc statique et les kilométrages annuels. La composition technologique renvoie aux motorisations et aux consommations spécifiques ce qui permet d'estimer les polluants émis. Un certain nombre de données peuvent être ajoutées. Ces modèles comparent des consommations d'énergie et des variations d'efficacité énergétique selon des situations fictives. Ainsi, il existe des situations où l'efficacité énergétique des TC et des VP s'égalise selon des taux d'occupation ou des vitesses. Néanmoins, les variables n'intègrent pas l'espace comme le montre le schéma ci-dessus. Ils peuvent donner une image dans un espace sous l'hypothèse que l'ensemble des réseaux y soit intégré, ce qui n'est pas le cas pour les secteurs. C'est aussi valable pour l'évolution. Or notre objet est d'abord d'observer l'évolution dans l'espace de l'efficacité énergétique et l'effet des progrès techniques dans le temps.

1-2) La méthode empirique.

L'empirisme est d'abord un ensemble de doctrines philosophiques sur notre propension à connaître. Il se base sur les données de l'expérience « sensible » puisque ce sont nos sens qui nous permettent de les appréhender. Sans entrer dans la philosophie et ses nombreux débats, nous allons repartir des données statistiques dont nous disposons pour les projeter dans l'espace sachant que l'implémentation du progrès technique produit une baisse des consommations spécifiques dans la région parisienne pour la VP. Pour le TC, elle reste à calculer, puisqu'il existe une modernisation du matériel roulant mais aussi des équipements.

1-3) L'approche quantitative : l'exemple du taux d'occupation

L'approche quantitative provient des variables discrètes traitées sous l'hypothèse de continuité d'une fonction (WONNACOT, 1974). Une fonction affine (ou un polynôme), en résulte, avec un (ou plusieurs) coefficients de régression calculés par le ratio entre la somme des covariances (X;Y) avec X variable explicative et Y variable expliquée et la variance de X. Ces coefficients de régression sont linéaires. La constante est calculée selon la moyenne de Y soustrait du produit du coefficient de régression et de la moyenne de X. Cette moyenne du coefficient de régression indique la relation quantitative entre les variables X et Y. Cette relation est plus ou moins juste. Aussi, le calcul du résultat de Y par la relation (Y estimé) et le Y observé produit un écart appelé résidu. Sa variance représente la variance non expliquée du modèle. La variance expliquée vient du fait que si nous ne connaissons pas les variables qui ajustent la prévision seule la moyenne de la distribution le permet. Aussi, la variance existante entre le Y estimé et la moyenne de Y représente une connaissance supplémentaire de la variation de Y. La variance totale est la somme des deux variances. Le coefficient de détermination vérifie l'adéquation de la relation entre la valeur observée et les valeurs estimées. Ce coefficient est le ratio entre la variance expliquée par la régression et la variance totale. Deux tests de signification (Fisher (F) et Student (T)) vérifient la validité du modèle. Ils nécessitent que les résidus de l'estimation de la relation suivent une loi normale. Le test de Jarque-Berat (JB) adapté pour les grands échantillons (> 50) vérifie cette condition. Il est aisé à utiliser dans Excel, même s'il est moins puissant que d'autres. Il renvoie à deux coefficients de la distribution des résidus le coefficient d'asymétrie et le Kurtosis normalisé. Si leur distribution s'éloigne de 0 la distribution n'est pas normale (H1). L'hypothèse H0 est donc un préalable à l'utilisation des tests. La visualisation de la distribution des résidus nous informe sur la fiabilité du modèle. Le test F est basé sur le ratio entre la variance expliquée et la variance moyenne des résidus. Cette dernière est calculée selon le nombre de variables moins deux du fait que nous ne disposons d'une information sur la variance résiduelle d'une droite que si nous avons au moins deux points. Il en résulte une valeur comparée aux valeurs issues d'une table de distribution de probabilité dite de Fisher. Pour le test de Fisher, l'hypothèse nulle (H0) implique que la variance expliquée par rapport à la variance totale n'est pas différente. La régression n'est pas significative.

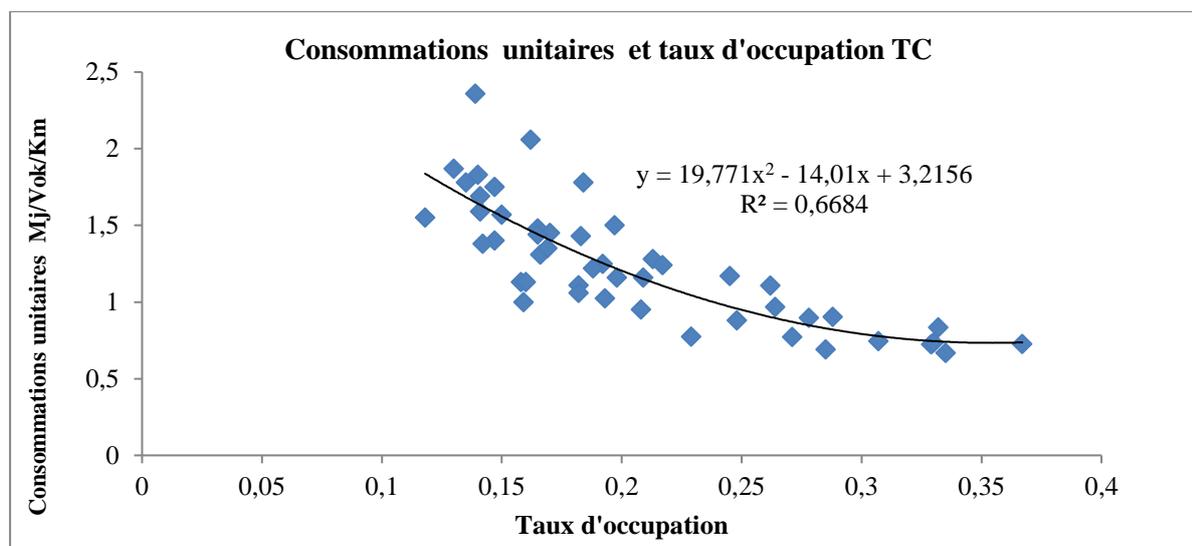
Lorsque la probabilité dite « critique » est en queue de distribution, l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée. Pour vérifier la validité de la moyenne de la régression, le test T se base sur deux éléments. Le coefficient moyen de la droite de régression et l'écart type du coefficient. Ce dernier est le ratio entre l'écart type des résidus et l'écart-type des écarts à la moyenne de X. Un écart-type important implique que le ratio prendra une faible valeur comparée à une table dite de Student. L'hypothèse H_0 signifie que la moyenne n'est pas différente de son écart type. La colinéarité renvoie à une régression à plusieurs facteurs. Si le modèle l'est, la relation se situe entre des variables du modèle. Pour détecter cet effet nous utilisons le test de Klein qui compare le coefficient de détermination de la relation et celui de corrélation entre chaque facteur. Si le premier est supérieur à chaque coefficient de corrélation partielle alors il n'y a pas de multicollinéarité. Deux problèmes attachés à la signification de la relation ne sont pas détectés par ces tests : l'autocorrélation spatiale, l'hétéroscédasticité.

L'autocorrélation spatiale provient d'un phénomène de voisinage ou d'une mauvaise spécification du modèle (LE GALLO, 2002). Pour le premier l'indicateur de Moran est souvent utilisé pour spécifier sur de petit périmètre des phénomènes de voisinage. Pour le deuxième aspect, il existe une interdépendance importante entre les divers indicateurs de mesures utilisées selon les échelles ou les zonages. L'interaction spatiale entre les indicateurs implique que l'éventuelle relation trouvée entre un indicateur et une variable vient d'une variable cachée par l'indicateur utilisé. La distribution des résidus est conforme mais la relation est incomplète. Il existe plusieurs types de test d'autocorrélation spatiale. Le multiplicateur lagrangien (LM test) estime sa présence sans mettre en œuvre une relation supplémentaire (LE GALLO, 2002).

Concrètement nous mettons en relation les résidus et les variables explicatives. Ensuite nous calculons le coefficient de détermination que nous multiplions par le nombre de degré de liberté ($n \times R^2$). Elle suit alors une loi du Khi à 2 ou n degré de liberté selon le nombre de variables ($X_1 X_2 \dots$). H_1 implique la présence d'autocorrélation spatiale. L'hétéroscédasticité signale une mauvaise spécification de la relation. Le test de White vérifie sa présence. Ce test repose aussi sur le multiplicateur Lagrangien mais sa modalité implique que le carré des résidus est évalué par rapport aux variables explicatives ($X_1 X_2 \dots$) à leur produit ($X_1 X_2 \dots$) et à leur carré ($X_1^2 X_2^2 \dots$). Elle suit alors une loi du Khi à 2 ou n degré de liberté en fonction du nombre de variables ($X_1 X_2 \dots$). H_1 implique la présence d'hétéroscédasticité. Notre approche est quantitative. Sans précision de notre part, les tests seront conformes à 5% c'est-à-dire H_1 pour les tests T et F et H_0 pour le test de white (hétéroscédasticité). Nous spécifions nos relations avec le modèle stat d'Excel. L'exemple de la variation de la consommation unitaire selon le taux d'occupation dans la base UITP nous permet d'illustrer le propos. Dans les données, le taux d'occupation n'existe pas. Nous le reconstituons à partir de deux indicateurs dérivés. Les place kilomètre offerte par habitant et les passager km par habitant. Cette reconstitution ne vaut que pour l'ensemble des TC et non chaque mode.

Les consommations unitaires décroissent selon les taux d'occupation pour les TC ($R^2 = 0.66$, deux points extrêmes sont ôtés de la distribution). C'est un résultat usuel. (Cf Graphique 26)

Graphique 26: consommations unitaires et taux d'occupation réseau de TC base UITP



Source : calcul de l'auteur

Néanmoins, ce taux n'est qu'une des variables explicatives comme nous l'avons vu précédemment mais aucune autre régression n'apparaît que ce soit pour la vitesse, au travers d'un indicateur dérivé, ou la consommation spécifique. Ceci peut être due à la construction même des données, aux périmètres choisis, et à la multiplication des variables potentielles différenciant les territoires en particulier l'effet des différentes cultures dans l'usage, leur rythme de travail propre, leur revenu etc... L'échelle de référence modifie les variables explicatives potentielles et les méthodes de construction des données peuvent fausser les résultats. Aussi nous travaillons exclusivement sur la région IDF afin d'approfondir cette question.

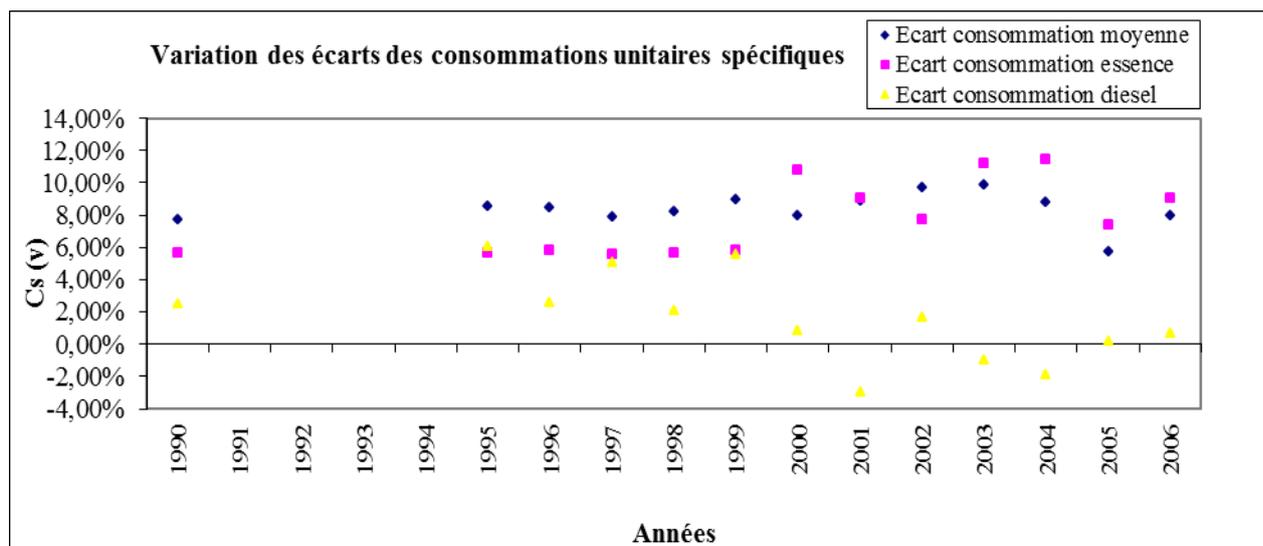
2) Consommations unitaires moyennes VP en IDF selon les secteurs.

2-1) Calcul de la consommation réticulaire

2-1-1) Consommation spécifique en litre/100Km

Deux motorisations diesel et essence sont mesurés, les autres sont marginales. Les écarts moyens sont de 10%, 9% sur l'essence. Les consommations spécifiques SECODIP excèdent les mesures du compte national transport pour l'essence de 6% à 12%, pour le gasoil (2%) ils sont négatifs. (Cf Graphique 27)

Graphique 27: écart des consommations unitaires en île de France



Source : calcul de l'auteur

Pour les points manquants, 1982, 2008 et 2018, les écarts aux valeurs nationales sont affectés régionalement sauf pour le gasoil, les valeurs négatives augmenteraient les écarts (Cf Equation 29).

$$C_u(v)_{RP} = C_u(v)_{Nat} \times (1 + \Delta) \quad (29)$$

Avec $C_u(v)_{Idf}$ = consommation unitaire région parisienne $C_u(v)_{Nat}$ = consommation unitaire nationale.

Δ = Ecart = (1,1). Pour 1975, nous reportons la tendance entre 1982 et 1990. (Cf Equation 30).

$$C_{u1975} = C_{u1982} \times C_{s1982} / C_{s1990} \quad (30)$$

Source : calcul de l'auteur

Les valeurs moyennes sont conformes aux estimations d'Honoré (1990) (Cf Tableau 54)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Moyenne	12,14	10,40	8,90	8,31	7,68	6,96

Source : calcul de l'auteur

Pour les VUL nous prenons les parts de parc roulant diesels et essence (0.88 pour le diesel et 0.12 pour l'essence) de l'année 2008. (Cf Equation 31).

$$\text{Parc 1999} = \text{parc roulant 2008} (0.88) \times 0.90 \quad (31)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous les faisons évoluer selon un parc roulant national calculé avec les distances de l'IDF. Le parc de 1999 représente 90% du parc de 2008 et 65% en 1990. Nous considérons qu'il n'y avait de VUL diesel en 1975, 1982 est la moitié de la tendance entre 1990 et 1975 (Cf Tableau 55).

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Diesel	0,00	0,28	0,57	0,79	0,88	0,97
Essence	1,00	0,72	0,43	0,21	0,12	0,03

Source : calcul de l'auteur

Nous disposons uniquement des données nationales des consommations spécifiques jusqu'en 1990. Le taux de 1,1 est appliqué aux deux motorisations. (Cf Equation 32).

$$C_{svul1982} = C_{svp1982} / C_{svp1990} \times C_{svul1990} \quad (32)$$

Source : calcul de l'auteur

L'évolution des consommations spécifiques VP appliqués aux VUL donne les points de 1975 et 1982.

(Cf Tableau 56)

Tableau 56 : consommation spécifique VUL L/100Km IDF						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Diesel	20,74	13,96	9,39	9,44	9,29	7,77
Essence	11,45	10,58	9,77	9,68	8,36	8,71

Source : calcul de l'auteur

Le produit des consommations spécifiques et des parts de parc (P_d, P_e) est sommé (Cf Tableau 57).

$$C_{smoy} = C_{sdiesel} \times P_d + C_{sessen} \times P_e \quad (33)$$

Source : calcul de l'auteur

Tableau 57 : consommation spécifique moyenne VUL l/100Km						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Moyennes	12,60	12,29	10,00	9,63	8,58	7,83

Source : calcul de l'auteur

2-1-2) Calcul en joule à l'énergie primaire

En ile de France, le parc était à essence en 1975, la part des voitures diesel en 1993 était à 17% (CALIO, 1993). Sa progression est estimée à 69% entre 1993 et 2009 (APUR, 2008). L'IAU (Institut d'aménagement et d'Urbanisme) indique des valeurs pour 2000 (0,29) et 2009 (0,51), 50,4 pour 2010 (ANDRE & al, 2015). Pour 2016, l'estimation est de 0,524 (L'AUTO EN CHIFFRE, 2020). Une tendance linéaire croissante estime les points en 2008 et 1999. (Cf Equation 34).

$$(0,29-0,51) / 9 = \text{tendance} \quad (34)$$

Nous recommençons la même opération entre 1993 et 1999 pour estimer la part en 1990. En 1975, il n'y avait pas de diesel en IDF au vu de la consommation CPDP. Nous estimons 1982 par la tendance entre 1990 et 1975 (Cf Equation 35)

$$(0-0,10) / 15 = \text{tendance} \quad (35)$$

Nous obtenons alors les coefficients suivants (Cf Tableau 58) :

Tableau 58 : part du parc de voiture diesel en île de France					
1975	1982	1990	1999	2008	2016
0	0,05	0,1	0,27	0,49	0,53

Source : calcul de l'auteur

Nous mobilisons l'étude sur les parcs imputons les kilométrages 2008 (ANDRE & al, 2015) du parc roulant diesel et essence sur les valeurs des parts de parc statique depuis 1975 (Cf Equation 36).

$$0,49 \times 16069 + 0,51 \times 9589 = 12754 \quad (36)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous calculons les parts de parc roulant diesel et essence avec l'exemple du diesel pour 2008 (Cf Equation 37)

$$0,49 \times 16069 / 12754 = 0,62 \quad (0,38 \text{ pour l'essence}) \quad (37)$$

Nous calculons les masses volumiques moyennes des parcs roulants par carburant (Cf Equation 38,39,40) :

$$T (\text{Essence}) = (1 - \text{part de parc diesel}) \times 0,744 \quad (38)$$

$$T (\text{Gasoil}) = (\text{part de parc diesel}) \times 0,844 \quad (39)$$

$$\text{Taux moyen} = T (\text{Essence}) + T (\text{Gasoil}) \quad (40)$$

Le taux moyen de masse volumique est alors de 0.81 que nous reportons en 2018 (Cf Tableau 58)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Essence	0,74	0,68	0,63	0,46	0,29	0,29
Gasoil	0,00	0,07	0,13	0,32	0,52	0,52
Total	0,74	0,75	0,76	0,78	0,81	0,81

Source : calcul de l'auteur

Nous estimons le coefficient à l'énergie primaire selon les données de l'ADEME. Nous procédons de la même manière que ci-dessus pour la moyenne (Cf Tableau 59) :

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Essence	0,20	0,18	0,17	0,12	0,08	0,08
Gasoil	0,00	0,02	0,03	0,08	0,14	0,14
Total	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21

Source : calcul de l'auteur

Nous obtenons alors une consommation par véhicule à l'énergie primaire en Joule (Cf Equation 41) :

$$Cs_v \times Mv \times (1+K) \times 42 = Cs_v \text{ à l'énergie primaire} \quad (41)$$

Source : calcul de l'auteur

Cs_v = consommation spécifique. Mv = masse volumique moyenne. K coefficient de passage à l'énergie primaire 42 est le coefficient de masse énergétique TEP joule.

La commission nationale des comptes transport de la nation compte les consommations spécifiques essence et diesel des VUL ; L'essence est affectée d'un coefficient de 1.1 comme celui de la voiture. (Cf Tableau 60)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Diesel	20,74	13,96	9,44	9,36	8,36	7,77
Essence	11,45	10,58	9,77	9,68	9,29	8,71

Source : calcul de l'auteur

La consommation spécifique diesel est affectée d'un coefficient à l'énergie primaire ($Coef_{Ep}$) de 1,20 pour le diesel et de 1,22 pour l'essence. Nous estimons les parcs roulants entre 1975 et 2008. Les chiffres de 2008 viennent de l'étude sur le parc EGT effectué en 2015 (ANDRE M. C., 2015). Le chiffre de 2018 vient d'une estimation de l'APUR (APUR, 2022). Pour les années antérieures, nous repartons des chiffres du parc roulant national du CCTN. En 1999 le VUL diesel représentaient 90% du parc de 2008 et en 1990 65%. Nous appliquons ces pourcentages aux données de l'IDF en 1999 et 1990. Sachant qu'il n'y avait pas de diesel en 1975, nous divisons la tendance par deux. Pour les VUL, nous effectuons le calcul suivant pour la consommation spécifique moyenne (Cf Equation 42) (Cf Tableau 61) :

$$Cs \text{ moyenne à l'énergie primaire} = C_{sdiesel} \times P_d \times M_v \times Coef_{Ep} + C_{s essence} \times P_e \times M_v \times Coef_{Ep} \quad (42)$$

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Parc roulant Diesel (Pd)	0,00	0,28	0,57	0,79	0,88	0,97
Parc roulant Essence (Pe)	1,00	0,72	0,43	0,21	0,12	0,03
Consommation spécifique moyenne à l'énergie primaire	11,18	11,47	9,64	9,60	8,66	8,02
Consommation spécifique en GEP	111,84	114,66	96,44	96,00	86,64	80,19
Consommation spécifique en joules	4,70	4,82	4,05	4,03	3,64	3,37

Source : calcul de l'auteur

Nous obtenons alors le coefficient en GEP que nous convertissons en joules.

2-1-3) Variation des consommations unitaire selon les jours.

Nous réduisons le taux de remplissage suites aux travaux du SETRA de 4% sur les trajets inférieurs à 20km en 2008. Nous affectons en 1975 les tendances des années postérieures. (Cf Tableau 62)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
JO	1,19	1,19	1,19	1,19	1,15	1,15
Samedi	1,4	1,4	1,39	1,49	1,5	1,5
Dimanche	1,45	1,45	1,44	1,45	1,45	1,45
Semaine	1,25	1,25	1,24	1,25	1,22	1,22

Source : EGT et calcul de l'auteur

En 50 ans ils n'ont guère varié. Nous effectuons alors à consommation spécifique constante (cf. équation 43)

$$Cu_v = Cs_v \times Tr_s / Tr_{jo} \quad (43)$$

Source : calcul de l'auteur

Cs_v = consommation unitaire spécifique. Tr_s = taux de remplissage de la semaine Tr_{jo} = taux de remplissage JO. Le taux de remplissage modifie les consommations unitaires. L'utilisation augmente l'efficacité VP en jours non ouvrables. (Cf Tableau 63)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Semaine	3,71	3,35	2,90	2,79	2,70	2,47
JO	3,89	3,51	3,02	2,93	2,87	2,61
SAM	3,31	2,98	2,58	2,34	2,20	2,00
DIM	3,20	2,88	2,49	2,41	2,27	2,07

Source : calcul de l'auteur

2-2) Calcul des consommations VP par secteur.

2-2-1) Variation des consommations spécifiques selon les habitants.

Les secteurs EGT ne dénombre pas les habitants. Le recensement communal de la population contient deux exploitations : principale et complémentaire. L'exploitation principale fournit des résultats sur la structure de la population, la formation, les diplômes, les déplacements et les migrations, la situation vis-à-vis de l'emploi. Antérieurement à 2000, la population résidentielle était dénombrée selon son lieu d'habitation tous les sept ans.

Depuis 2004, le recensement repose sur une collecte d'information annuelle, concernant successivement tous les territoires communaux au cours d'une période de cinq ans. Chaque année, les cinq enquêtes annuelles les plus récentes donnent les résultats du recensement. L'enquête la plus ancienne est abandonnée (INSEE, 2017). Une commune sur cinq de moins de 10 000 habitants recense toute la population chaque année. Les communes de 10 000 habitants ou plus réalisent tous les ans une enquête par sondage auprès d'un échantillon de logements représentant 8 % de leur population. Ainsi, chaque année, l'enquête annuelle constitue un échantillon de 14 % des personnes vivant en France. Sur une période de cinq ans, l'ensemble des habitants des communes de moins de 10 000 habitants et 40 % de la population des communes de 10 000 habitants ou plus sont intégrés dans le recensement. (Cf figure 19)

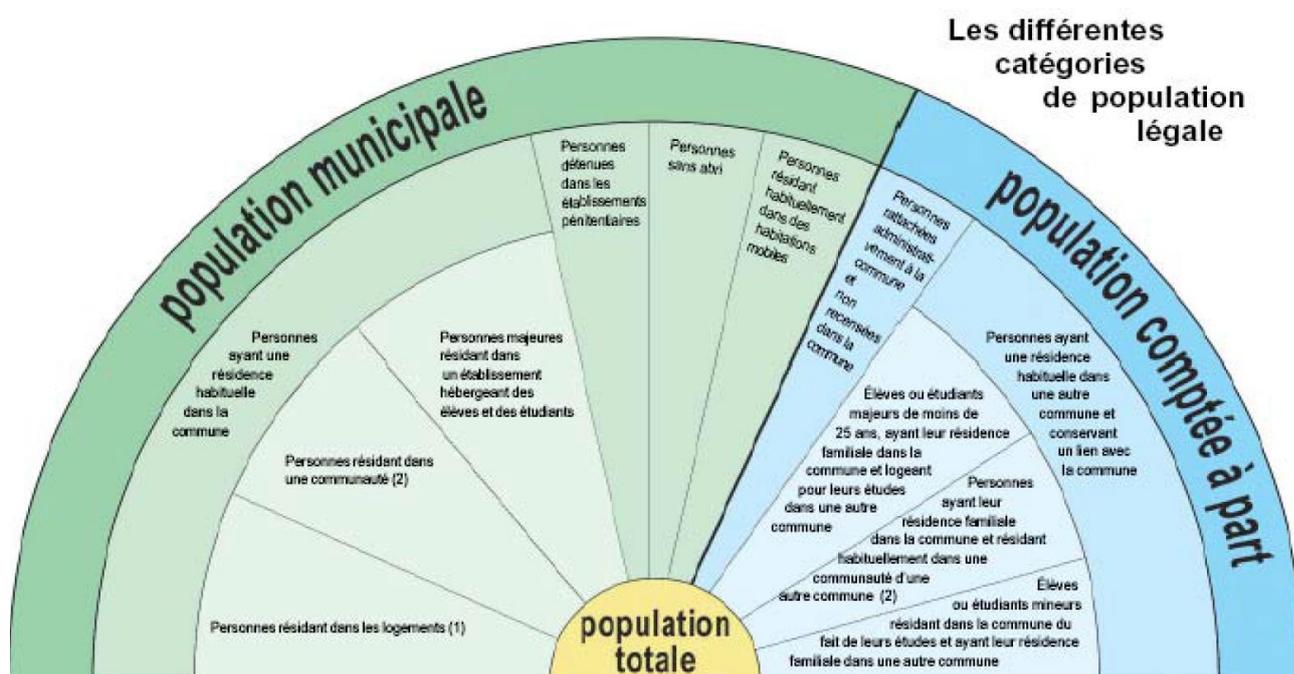


Figure 19: comptage de la population INSEE.

Source INSEE.

Deux catégories sont comptées. La population municipale et comptée à part. La première catégorie renvoie aux résidents y compris les détenus de l'administration pénitentiaire, tandis que la seconde renvoie à une occupation temporaire le lieu de résidence étant ailleurs.

Sur longue période l'INSEE fournit des données comparables entre les méthodes. Nous sectorisons ces habitants avec un programme VBA (Visual Basic). Comme les EGT, nous ôtons la population totale de moins de 5 ans soit par secteur (Cf équation 44) :

$$\text{Population secteur} = \Sigma \text{ population des communes (44)}$$

Source : calcul de l'auteur

Le nombre de communes traité par le programme est donné ci-dessous (Cf Tableau 64). Nous effectuons cette distribution sur les populations issues du recensement de 1975 à 2018. Nous disposons donc dans chaque secteur EGT d'une quantité de population qui évolue.

Tableau 64 : secteur de l'enquête EGT.	
Départements	Nombre de communes traitées
75	100%
92	100%
93	97%
94	94%
77	75%
91	91%
95	89%
Zone RATP	90%

Source : calcul de l'auteur

Les données SECODIP (SECODIP, 2010) modulent la consommation spécifique en 3 zones selon les habitants. Pour une zone de 2000 à 50 000 elle représente 0.91 fois celle de la région parisienne, pour une zone de 50 000 habitants et + elle représente 0.96. Nous supposons que ces coefficients selon les populations renvoient à l'effet de congestions se manifestant en JO. Nous pouvons alors pour une consommation unitaire donnée traduire l'effet de la congestion sur le secteur considéré (Cf Tableau 65).

Tableau 65: coefficient de population			
Nombre hab.	2000 à 50 000	50 000 et +	RP
Coefficients	0.91	0.96	1

Source : calcul de l'auteur

2-2-2) Variation des consommations spécifiques selon les parcs

Nous reprenons les chiffres d'une étude sur les parcs EGT en IDF de 2015 (ANDRE M. C., 2015). Le coefficient de parc est le rapport entre la moyenne de la consommation spécifique du département et de la région ($7,53 / 7,23 = 1,04$). Les consommations spécifiques diesel (6.6) et essence (8.5) sont multipliés par leurs parts de parc roulant et donnent celles des départements. (Cf Tableau 66)

Tableau 66 : coefficient de parc 2009									
Années	IDF	75	92	93	94	77	78	91	95
Part Diesel (parc roulant)	63,8	48,9	59,3	64,7	57,9	71,8	66,9	66,6	67,2
Part Essence (parc roulant)	35,5	50,6	39,8	34,9	41	27,4	32,4	32,3	32,1
Consommation spécifique diesel 6.6	4,21	3,23	3,91	4,27	3,82	4,74	4,42	4,4	4,44
Consommation spécifique essence 8.5	3,02	4,3	3,38	2,97	3,49	2,33	2,75	2,75	2,73
Conso spécifique moyenne	7,23	7,53	7,3	7,24	7,31	7,07	7,17	7,14	7,16
Coefficient de parc	1	1,04	1,01	1	1,01	0,98	0,99	0,99	0,99

Source : calcul de l'auteur

Néanmoins, la part du diesel baisse de 2008 à 1975 (cf. ci-dessus), les parcs diesel essence varient. Nous cherchons alors à intégrer cette variation. Nous prenons l'exemple de 2000. La première ligne renvoie au parc roulant régional global en IDF (38% diesel, 62% essence). A partir de ces pourcentages globaux nous faisons une règle de trois entre 2008 et 2000 pour chaque motorisation dans chaque département. Nous prenons l'exemple de Paris (cf. Tableau 67).

$$48.9 \times 38/63,8 = 29,13 \text{ (45)}$$

Tableau 67 : variation en fonction des parcs roulants 2000

Types de motorisation	IDF	75	92	93	94	77	78	91	95
Diesel	38,00	29,13	35,32	38,54	34,49	42,76	39,85	39,67	40,03
Essence	62,00	88,37	69,51	60,95	71,61	47,85	56,59	56,41	56,06
Total	100,00	117,50	104,83	99,49	106,09	90,62	96,43	96,08	96,09
Part diesel	0,38	0,25	0,34	0,39	0,33	0,47	0,41	0,41	0,42
Part essence	0,62	0,75	0,66	0,61	0,67	0,53	0,59	0,59	0,58
Consommation spécifique diesel 6,6	2,51	1,64	2,22	2,56	2,15	3,11	2,73	2,72	2,75
Consommation spécifique essence 8,5	5,27	6,39	5,64	5,21	5,74	4,49	4,99	4,99	4,96
Calcul consommation spécifique moyenne	7,78	8,03	7,86	7,76	7,88	7,60	7,71	7,72	7,71
Variation due au parc 2000	1	1,03	1,01	1,00	1,01	0,98	0,99	0,99	0,99

Source : calcul de l'auteur

Nous effectuons la même opération sur l'essence (88,37). Nous ajoutons les deux parts (117,50) et remettons en base 100 (part diesel 0.25). Ensuite nous effectuons le produit de la part (0,25) et de la consommation spécifique 6,6 soit 1.64. Nous faisons la même chose pour l'essence, le total est alors de 8.03. Nous effectuons le ratio entre la consommation spécifique moyenne de l'IDF et celle des départements (1.03 pour le 75). Nous calculons cette consommation spécifique selon les consommations spécifiques de 2008 afin d'isoler l'effet des parcs. Nous contrôlons alors notre méthode avec des données de l'IAU (IAU, 2013) pour l'année 2000. En effet, nous considérons qu'il existe une proportionnalité dans la variation du parc ce qui n'est pas forcément exact. Néanmoins, nos données de contrôle sont des parts de parc fixe. Si nous appliquons les distances diesel (16069) et essence (12754) issues de l'étude de André (ANDRE, 2015) aux parts de parc fixe au lieu de 70% et 29% nous obtenons un parc de 61% essence et de 39% diesel, très proche de nos calculs 62% et 38%. (Cf. Tableau 68)

Tableau 68 : part diesel essence dans parc fixe.

	2000			2009		
	essence	diesel	GPL	essence	diesel	GPL
PARIS	78%	21%	0%	58%	41%	1%
HAUTS-DE-SEINE	70%	29%	0%	48%	52%	0%
SEINE-SAINT-DENIS	69%	30%	0%	45%	54%	0%
VAL-DE-MARNE	73%	27%	0%	53%	46%	0%
SEINE-ET-MARNE	62%	38%	0%	40%	60%	0%
ESSONNE	69%	31%	0%	46%	53%	0%
YVELINES	70%	30%	0%	48%	51%	0%
VAL-DOISE	69%	31%	0%	46%	54%	0%
Ile de France	70%	29%	0%	48%	51%	0%
France métropolitaine	62%	37%	0%	40%	60%	0%

Source : IAU

Nous appliquons alors la même méthode pour les parcs départementaux. Nous calculons les parts de parcs roulant diesel et essence à partir des parts de parcs fixe données dans le tableau.

Nous obtenons alors les valeurs des parts diesel et essence et nous calculons les consommations spécifiques moyennes de 2000 selon la même méthode que ci-dessus et nous comparons avec les résultats précédents. A partir des données de parc fixe la variation est de 1.04 contre 1.03 pour le 75. La différence maximale est de 1%. Nous obtenons des différences et des variations faibles. La méthode n'est pas invalidée. (Cf. Tableau 69)

Région/département	IDF	75	92	93	94	77	78	91
Part diesel	0,26	0,37	0,40	0,34	0,48	0,39	0,38	0,39
Part essence	0,74	0,63	0,60	0,66	0,52	0,61	0,62	0,61
6,6	1,75	2,41	2,64	2,25	3,16	2,58	2,49	2,58
8,5	6,25	5,39	5,10	5,61	4,43	5,18	5,29	5,18
Calcul à partir des données de parc fixe	7,73	7,86	7,76	7,88	7,60	7,71	7,72	7,71
Variation due au parc avec données de parts fixes	1	1,04	1,02	1,00	1,02	0,98	1,00	1,00
Calcul avec part régionale	7,78	7,81	7,74	7,85	7,59	7,76	7,78	7,76
Variation due au parc méthode	1	1,03	1,01	1,00	1,01	0,98	0,99	0,99

Source : calcul de l'auteur

Nous continuons donc avec la première méthode et obtenons les résultats suivants (cf. Tableau 70).

	IDF	75	92	93	94	77	78	91	95
Variation due au parc 2008	1	1,04	1,01	1,00	1,01	0,98	0,99	0,99	0,99
Variation due au parc 2000	1	1,03	1,01	1,00	1,01	0,98	0,99	0,99	0,99
Variation due au parc 1990	1	1,02	1,01	1,00	1,01	0,99	1,00	1,00	0,99
Variation due au parc 1982	1	1,01	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00

Source : calcul de l'auteur

Les coefficients se modifient légèrement sont égaux à 1 en 1975 puisqu'il n'y avait pas de diesel à l'époque. Nous reproduisons pour 2018 les coefficients de 2008. Pour les VUL, nous repartons de la même étude (Cf Tableau 71). Nous reproduisons la même procédure.

	IDF	75	92	93	94	77	78	91	95
Diesel	88,40	87,80	90,90	85,40	64,70	97,10	95,60	97,60	85,00
Essence	11,00	12,20	2,60	14,60	34,80	2,90	4,40	2,40	15,00
8,36	7,39	7,34	7,60	7,14	5,41	8,12	7,99	8,16	7,11
9,29	1,02	1,13	0,24	1,36	3,23	0,27	0,41	0,22	1,39
Conso spécifique moyenne	8,41	8,47	7,84	8,50	8,64	8,39	8,40	8,38	8,50
Coefficient de parc	1,00	1,01	0,93	1,01	1,03	1,00	1,00	1,00	1,01

Source : calcul de l'auteur

2-2-3) Estimation des consommations spécifiques VP de 1975 à 2018.

Nous estimons alors la consommation VP pour chaque secteur (Cf Tableau 72). Nous reprenons les compte transport des parcs VUL et VP en circulation.

1990	2000	2010	2018
0,16	0,16	0,17	0,18

Source : calcul de l'auteur

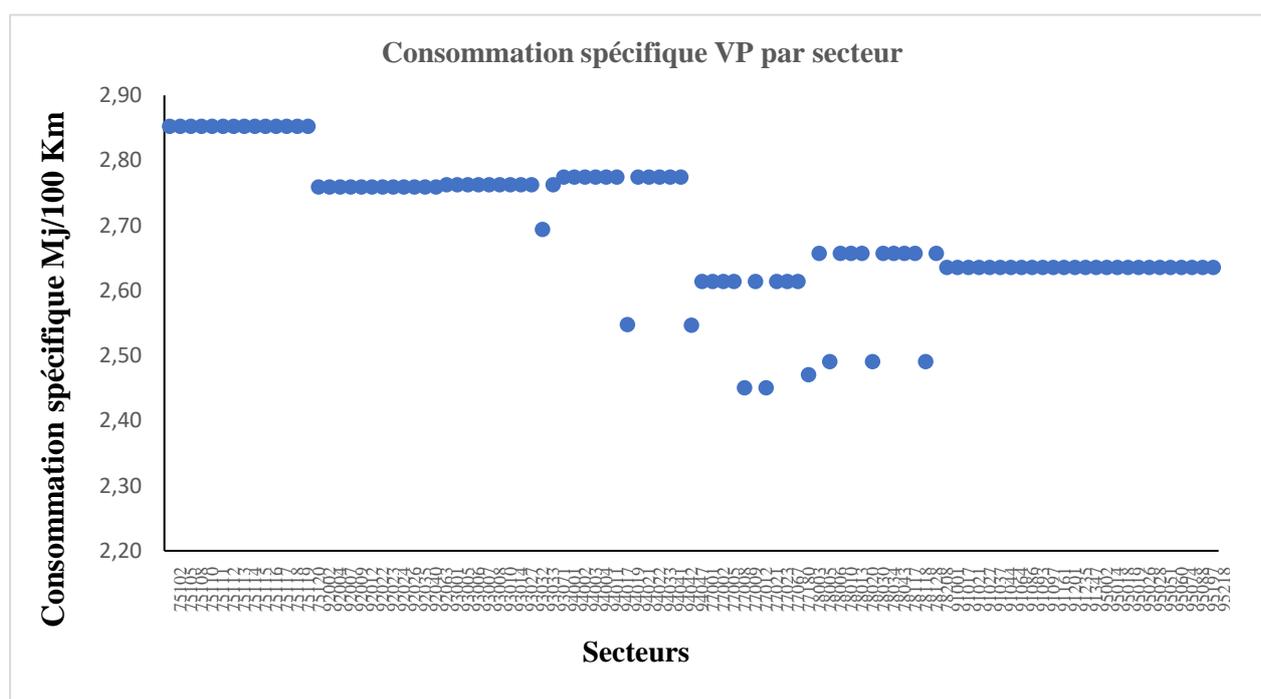
Pour estimer par secteur les consommations pour 2018 nous prenons une part de parc de 82% pour les VP et de 17% pour les VUL (Cf équation 46)

$$0.83 \times (C_{SRPVP} \times \text{coef}_{\text{zone}} \times \text{coef}_{\text{parc}}) + 0.17 \times (C_{SRPVUL} \times \text{coef}_{\text{zone}} \times \text{coef}_{\text{parc}}) = C_{\text{voiture}} ;(46)$$

Source : calcul de l'auteur

Les parts de circulation VUL antérieurs à 1990 sont supposés être de 16%. Les secteurs sont référencés par la première commune du secteur dans les données. Le graphique reproduit les numéros des secteurs. Sur l'axe des abscisses 7501 est donnée par 75101. Les baisses dans certains secteurs viennent de la variation des populations. Les consommations sont plus élevées à Paris et la zone fortement urbanisée (RP + 1^{ière} couronne) qu'en GC (Cf Graphique 28).

Graphique 28: consommation spécifique VP au sens de l'EGT par secteur 2008



Source : calcul de l'auteur

En tendance, le progrès technique améliore l'efficacité énergétique.

2-2-4) Variation des consommations unitaires VP selon les couronnes et les jours.

Les consommations spécifiques des secteurs EGT sont regroupés selon les couronnes. La moyenne des secteurs estime les consommations spécifiques moyennes de la région. Pour passer de la consommation spécifique à la consommation unitaire, nous imputons alors le taux de remplissage moyen uniforme sur la région de l'année considérée. (Cf Tableau 73)

Tableau 73 : consommations unitaires véhicules individuels JO MJ/voy-km						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC (Première Couronne)	3,99	3,58	3,10	3,02	2,95	2,70
Paris	4,01	3,62	3,13	3,08	3,02	2,76
PC (Première Couronne)	3,98	3,56	3,08	3,00	2,93	2,67
GC (Grande Couronne)	3,76	3,39	2,94	2,84	2,77	2,54
RIF	3,87	3,49	3,02	2,93	2,86	2,62

Source : calcul de l'auteur

Nous retrouvons alors par couronne l'effet de l'implémentation du progrès technique sur les consommations unitaires. Nous obtenons avec la variation du taux de remplissage. (Cf Tableau 74)

Tableau 74: Consommation unitaire samedi/dimanche (MJ/voy-km)												
	Samedi						Dimanche					
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC (Première Couronne)	3,39	3,04	2,65	2,41	2,26	2,07	3,27	2,94	2,56	2,48	2,34	2,14
Paris	3,41	3,08	2,68	2,46	2,32	2,12	3,29	2,97	2,59	2,52	2,4	2,19
PC (Première Couronne)	3,38	3,03	2,64	2,4	2,24	2,05	3,26	2,92	2,55	2,46	2,32	2,12
GC (Grande Couronne)	3,2	2,88	2,51	2,27	2,12	1,94	3,09	2,78	2,43	2,33	2,2	2,01
Moyenne RIF	3,29	2,96	2,58	2,34	2,19	2,01	3,18	2,86	2,49	2,41	2,27	2,08

Source : calcul de l'auteur

3) Consommation unitaire TC.

3-1) Calcul de la consommation réticulaire.

3-1-1) Du taux d'occupation au taux de remplissage TC.

Le taux d'occupation n'est pas semblable au taux de remplissage de la voiture. Nous cherchons une relation entre les deux indicateurs. Le taux remplissage de la voiture s'écrit (Cf Equation 47) :

$$(\text{Passagers} \times \text{Km} + \text{Conducteurs} \times \text{Km}) / \text{Conducteurs} \times \text{Km} = \text{Taux de remplissage (Tr)}$$

$$\text{Soit } 1 + V \text{ Km} / K_v = \text{Tr (47)}$$

Source : calcul de l'auteur

$V \times \text{Km}$ = Voyageur kilomètre, K_v = nombre de kilomètre parcourue par la voiture. Le 1 renvoie au conducteur effectuant autant de kilomètre que la voiture ($\text{Km} = K_v$) ce qui n'est pas forcément le cas du passager. Aussi, le Tr est similaire aux statistiques RATP des autobus (Cf Equation 48) :

$$1 + \text{million Voy-km/million } K_v \text{ (48)}$$

Source : calcul de l'auteur

Le taux de remplissage passager est donc (Cf Equation 49) :

$$\text{Tr} = \text{Cm}_1 / K_{v1} \text{ avec } \text{Cm} = E \times \text{Pmi} = N \times E \times \text{Pmi} \text{ soit } \text{Cmv} = N_v \times E_v \times \text{Pmi. (49)}$$

Source : Calcul de l'auteur

Cm = charge moyenne N_v = nombre de voiture = (Composition véhicule x Nombre véhicule). E_v = entrant par voiture Pmi = parcours moyen. Le nombre de K_v (Kilomètre voiture) est (Cf Equation 50).

$$K_v = N_v \times L \text{ (50)}$$

Calcul : auteur

L = Longueur de la voie N_v = nombre de voiture Nous obtenons donc (Cf Equation 51).

$$\text{Tr} = \text{Cmv} / N_v \times L \text{ (51)}$$

Source : Calcul de l'auteur

Or le nombre place kilomètre offert n'est rien d'autre que (Cf Equation 52) :

$$\text{Pko} = N_v \times C_v \times L \text{ soit } \text{Pko} / C_v = N_v \times L \text{ (52)}$$

Source : Calcul de l'auteur

C_v = capacité des voitures. On a donc (Cf Equation 53).

$$Tr = Cmv / Pko / Cv \text{ soit } To \times Cv = Tr \text{ (53)}$$

Source : Calcul de l'auteur

Le taux de remplissage est le produit du taux d'occupation par les capacités des voitures. Il augmente entre 1975 et 1990 sur le RER ou le métro. Il chute puis augmente de nouveau 1999 et 2018. Pour l'autobus ils stagnent voire baissent légèrement durant la dernière période (Cf Tableau 75)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Autobus	14	16	17	17	17	16
Métro	31	29	31	28	29	32
RER	39	49	51	46	49	58
Tramway				46	30	30
Total	26	28	30	28	29	31

Source : calcul de l'auteur

Le taux du tramway se modifie avec la croissance du nombre de véhicule en circulation.

3-1-2) La consommation spécifique

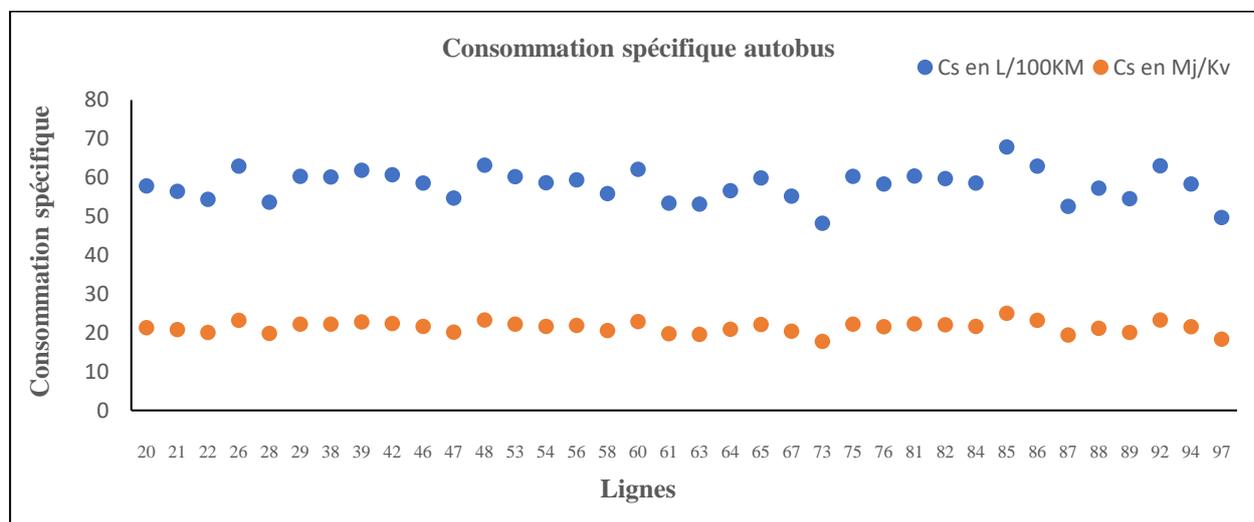
La consommation spécifique des autobus s'exprime par des litres/100Km, celle des réseaux ferrés en Kilomètres/voiture. Nous substituons pour l'autobus, les consommations spécifiques des TC sont définies comme l'énergie dépensée sur les Kilomètres/voiture (Cf Equation 54).

$$Cs_u = E/Kv \text{ (54)}$$

Source auteur

Même si les valeurs changent, la variation des données reste même si elles sont moins prononcées (Cf Graphique 29).

Graphique 29 : consommation spécifique Paris



Source : RATP

Les périodes de 1975 à 2018 sont calés sur les EGT. Celles du métro intègrent le funiculaire. Les consommations spécifiques des autobus augmentent entre 1975 et 2008. Elles stagnent pour le réseau ferré (métro et RER) entre 1975 et 2008 avec une légère baisse pour le RER (Cf Tableau 76).

Tableau 76 : consommation par KV (Joules/KV)						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Autobus	16	17	18	22	23	22
Métro	35	34	33	35	33	29
RER	50	47	45	49	46	38
Tramway				38	19	20
Total	29	30	30	33	32	28

Source : calcul de l'auteur

Les consommations spécifiques du réseau ferré stagnent voire augmentent entre 1975 et 1999, il existe un réinvestissement de l'énergie économisée des véhicules dans l'offre de transport voire les services à la clientèle. Ils baissent ensuite entre 2008 et 2018. La mutation des parcs technologique renvoie à la pénétration des technologies et une baisse des consommations spécifiques. La plus faible consommation spécifique du tramway vis-à-vis de l'autobus (la mesure de 1999 n'est pas significative), malgré une masse à vide plus forte (50 Tonnes), vient de la régénération. Néanmoins, les conditions d'exploitation (Arrêts aux carrefours, croisements avec d'autres circulations) en baissent les performances. Les consommations du mode routier stagnent avec l'usage de moteurs diesels puis augmentent à partir de 1999 avec l'augmentation de puissance des véhicules.

3-1-3) Les consommations unitaires par mode.

Nous calculons alors les consommations unitaires moyenne par mode et sur l'ensemble du réseau (Cf Tableau 77).

Tableau 77 : Consommation unitaire moyenne par mode						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Autobus	1,17	1,09	1,09	1,27	1,34	1,38
Métro	1,10	1,14	1,07	1,23	1,13	0,90
RER	1,29	0,95	0,89	1,07	0,94	0,66
Tramway				0,84	0,63	0,65
Consommation unitaire TC	1,14	1,08	1,02	1,19	1,09	0,89

Source : calcul de l'auteur

La consommation unitaire augmente avec la baisse du taux de remplissage pour les autobus. Pour le métro, elle augmente entre 1975 et 1982 puis baisse entre 1982 et 1990 avant de d'augmenter entre 1990 et 1999 pour baisser de nouveau entre 1999 et 2018. Ces variations sont dues à l'action des deux variables, taux de remplissage et consommation spécifique. Le taux de remplissage baisse entre 1975 et 1999. En même temps, les consommations spécifiques du réseau ferré restent stables. L'économie d'énergie des matériels issue de la régénération est réinvestie vers les équipements. Ensuite, le taux de remplissage augmente alors que la consommation spécifique baisse ce qui produit la baisse des consommations unitaires. Pour le réseau RER, nous observons une dent de scie. Une baisse entre 1975 et 1999 avant une hausse puis une baisse. La hausse des consommations unitaires était due à une variation du taux de remplissage. La baisse continue ensuite est due à la fois à l'augmentation du taux de remplissage et à l'arrivée de nouveau matériel. La baisse des consommations du tramway vient quant à elle de l'amélioration de l'exploitation des matériels.

Un taux de remplissage important ne garantit pas une faible consommation unitaire des réseaux ferrés vis-à-vis de la voiture.

3-1-4) Consommation unitaire selon les jours réseau RATP

3-1-4-1) Réseau ferré.

Nous construisons une courbe de la consommation unitaire horaires du réseau ferré en divisant les consommations par le trafic par heure des entrants selon nos données de trafic et de consommation.

Trois types de jour, ouvrable JO, Samedi, Dimanche, apparaissent (Cf Tableau 78)

Jours	JO	Samedi	Dimanche
Consommation unitaire (R1)	1,075	1,4	1,8
Consommation unitaire moyenne en semaine R2	1,175	1,175	1,175
Rapport R1/R2	0,92	1,18	1,54

Source : calcul de l'auteur

Les consommations unitaires moyennes selon les jours (R1) ou un jour de semaine (R2) sont données. A parcours moyen constant, la consommation unitaire par voyageur d'un représente 0.92 fois d'un jour de semaine. Nous supposons ces ratios invariants par la suite.

3-1-4-2) Réseau routier.

Pour le réseau routier, nous repartons des taux de charge moyenne par kilomètre (Cf Equation 55)

$$\text{Voy x Km (sem)}/\text{Kcc (sem)} = (\text{Voy} \times \text{Km (Jo)} + \text{Voy} \times \text{Km (sam)} + \text{Voy} \times \text{Km (dim)}) / (\text{Kcc (Jo)} + \text{Kcc (Sam)} + \text{Kcc (Dim)}) \quad (55)$$

Source calcul de l'auteur

α est alors la variation du taux de remplissage d'un JO par rapport à un jour semaine (Cf Equation 56) :

$$(\text{Voy} \times \text{Km (sem)} / \text{Kcc (sem)}) / (\text{Voy} \times \text{Km (Jo)} / \text{Kcc (Jo)}) = \alpha \quad (56)$$

Source calcul de l'auteur

Nous reproduisons alors les taux de remplissage. Ils sont plus fort en JO (Cf Tableau 79)

JO	SAM	DIM
1.08	0.92	0.67

Source : calcul de l'auteur

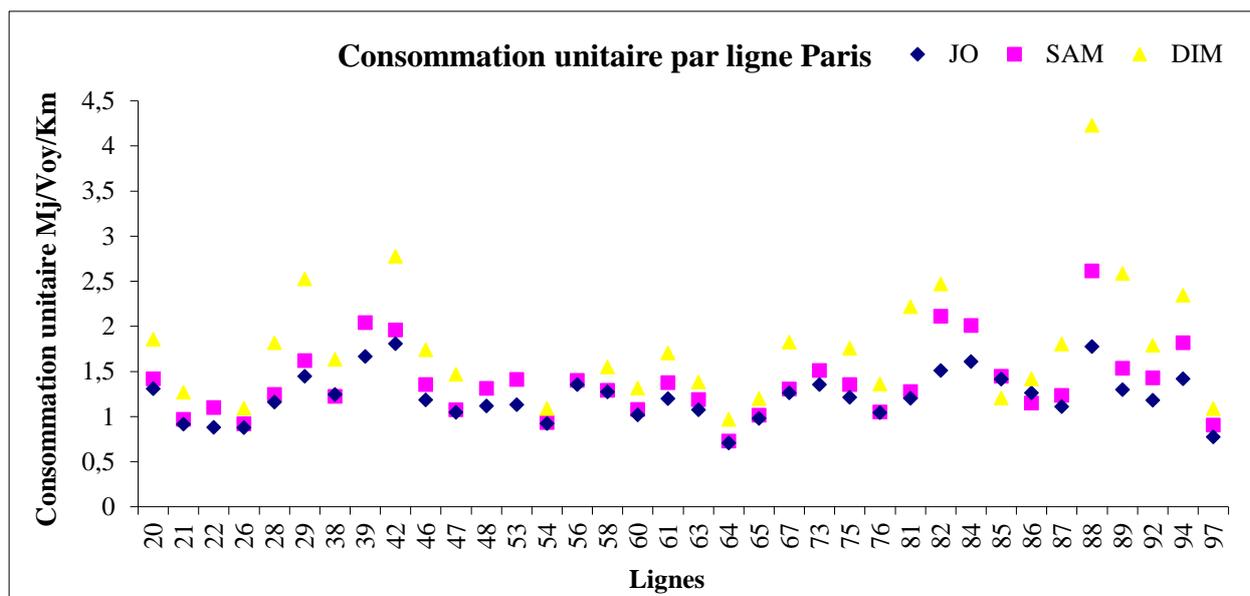
En moyenne, les consommations unitaires du réseau routier sont les suivantes (Cf Tableau 80) :

Moyenne	JO	SAM	DIM
1.36	1,24	1,7	1,06

Source : calcul de l'auteur

Nous déclinons ces taux sur notre échantillon de ligne en 2008. La différence entre les consommations unitaires va du simple au double (88) sur Paris ou en banlieue. Certaines lignes ne circulent pas le dimanche leur mesure n'existe pas. (Cf Graphique 30)

Graphique 30: consommation unitaire par lignes Paris



Source : calcul de l'auteur.

3-1-4-3) Réseau TC RATP

Les coefficients de variation des consommations unitaires entre les jours ouvrables et les jours de semaine sont quasiment égaux pour le réseau routier (0.93) et le réseau ferré (0.92). Ce n'est pas le cas pour les autres jours. La variation entre un jour de semaine et un samedi est de 1.05 pour le réseau routier et de 1.18 pour le ferré et pour un dimanche elle est de 1.47 pour le réseau routier et de 1.54 pour le ferré. Nous calculons alors un coefficient moyen pour les samedis et dimanches des réseaux TC RATP en négligeant le tramway (1%). Les taux de variation des consommations unitaires, les samedis et dimanche, sont multipliés par les parts de consommation (mode routier (20%) et ferré (80%) en week-end). Le taux moyen de 2008 est alors (Cf Tableau 81).

Tableau 81 : taux moyen de variation des consommations unitaires TC	
JO	0,92
SAM	1,16
DIM	1,53

Source : calcul de l'auteur

3-2) Calcul des efficacités énergétiques par secteur

Nous reprenons notre méthode d'évaluation des vitesses (KCC/JA) du premier chapitre puisque nous n'avons pas de données de vitesse routières. La consommation spécifique des lignes autobus baisse selon les vitesses en banlieue ($R^2 = 0.60$) mais pas à Paris ($R^2=0.27$) qu'elle soit PDU ou non. Cette différence est due à un effet global de congestion sur les secteurs Parisiens. Les données de circulation montrent des vitesses faibles 17 KM/h. La vitesse devient alors uniforme pour les réseaux routiers parisiens, ce facteur ne fait plus varier l'efficacité. La relative indépendance entre les vitesses et la consommation spécifique des TC se justifie du fait que la majorité du trafic est effectuée en site propre.

Les réseaux ferrés concentrent 91% de la charge moyenne ôtant tout effet des congestions dues aux circulations des réseaux routiers. Aussi nous supposons que les consommations spécifiques TC sont indépendantes des vitesses. D'autres entreprises de TC interviennent en IDF. (Cf Tableau 82)

Réseau	Cu	Charge moyenne	Consommation	Cu TC
SNCF	1,28	3979	5089746	1,30
OPTILE	1,30	1560	2110952	

Source : calcul de l'auteur

Pour la Grande Couronne (GC), nous évaluons la charge moyenne selon les trafics et les parcours moyens d'OPTILE (5 Km) et de la SNCF (17 Km). La consommation spécifique du réseau routier OPTILE est inférieure à la RATP (19 MJ/Kv). La circulation dans les zones plus rapides l'explique. Celle du réseau ferré SNCF est plus forte (44MJ/KV). Les trains sont différents sur la configuration et le plan technique. La consommation unitaire du réseau RATP renvoie à Paris et sa PC avec des trafics SNCF. Nous dissociions les trafics SNCF entre Paris 310 millions de voyage et sa PC 220 avec les données des entrants par département de l'OMNIL 2008 (Cf Tableau 83) :

Zone	Entrant (milliers)	Trafic total (millions)
75	984	816
92	243	
93	294	
94	161	
Total	2571	
Paris	0,38	310,08
liere couronne	0,27	220,32

Source : calcul de l'auteur

Pour les charges moyennes, nous supposons des parcours moyens égaux :

1. A Paris de 2.33 Km pour le bus, 5 Km, métro, 10,8 Km, RER (RATP et SNCF), le voyageur dans Paris a un parcours inférieur à 10,8 Km du fait du diamètre du périmètre.
2. Pour la première couronne à 2 Km pour le Bus, 10 Km RER RATP, 17KM RER SNCF.

La consommation unitaire des TC est calculée à Paris en appliquant les parts de charges moyennes des entreprises dans le territoire. Le métro est intégré à Paris, la charge moyenne du tramway (0% en 2008, 0.73% en 2018) y est incluse. Le même calcul est fait en PC (Cf Tableau 84)

Années	Charge moyenne			Consommation unitaire		
	2008	2018	%	2008	%	2018
RER	387,072	440,9504	3,36%	0,03	3,41%	0,02
Métro	7336	8109,45	63,59%	0,72	62,67%	0,57
Bus	1021	827,882	8,85%	0,12	6,40%	0,09
SNCF	3349	3467,95383	27,69%	0,33	26,80%	0,32
Tramway		94	0,00%	0,00	0,73%	0,00
Total	11535,9756	12940	1	1,15		1,00

Source : calcul de l'auteur

En 2008, les consommations unitaires sont données par couronne (Cf Tableau 85) :

Tableau 85 : consommations unitaires TC 2008			
Cu	Paris	Petite couronne (PC)	Grande couronne (GC)
Moyen	1,15	1,10	1,30

Source : calcul de l'auteur

Paris est moins efficace que la PC, la présence moins importante du RER, dont les consommations unitaires sont très faibles, et celle du réseau SNCF l'explique. Nous supposons qu'elles évoluent selon celles de la RATP jusqu'en 2008 depuis 1975. Pour 2018, nous reportons la consommation unitaire de 2008, la SNCF n'a pas intégré lors la période de technologie de régénération. La consommation unitaire régionale est la moyenne des consommations unitaires des secteurs. Dans les secteurs, l'existence de TC n'est pas vérifiée pas dans certaines communes. Néanmoins, cela ne remet pas en cause leur efficacité énergétique puisque des TC y circulent sans forcément desservir toutes les communes. Nos calculs montrent des variations faibles. (Cf Tableau 86)

Tableau 86 : TC MJ/voy-Km JO						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC	1,16	1,10	1,04	1,21	1,11	0,99
Paris	1,20	1,13	1,07	1,25	1,15	1
PC (Première Couronne)	1,15	1,09	1,03	1,19	1,1	0,98
GC (Grande Couronne)	1,36	1,28	1,21	1,41	1,30	1,30
Moyenne RIF	1,23	1,19	1,12	1,31	1,21	1,04

Source : calcul de l'auteur

Notons une différence entre les modes. Il existe une croissance de l'efficacité énergétique selon les couronnes du point de vue des voyages sur les réseaux ferrés grâce au taux de remplissage. Ce n'est pas le cas du réseau routier, dans lequel la consommation unitaire augmente, alors qu'ils sont dans les mêmes milieux urbains que les réseaux ferrés en particulier pour la RATP. Il existe une différenciation selon les modes bien qu'ils évoluent dans les mêmes milieux. Nous pouvons alors comme pour la VP estimer les consommations unitaires pour les samedi et dimanche. (Cf Tableau 87,88).

Tableau 87 : Consommation unitaire par couronne samedi						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC	1,31	1,28	1,20	1,40	1,29	1,14
Paris	1,40	1,32	1,25	1,45	1,34	1,14
PC (Première Couronne)	1,34	1,26	1,19	1,38	1,28	1,14
GC (Grande Couronne)	1,59	1,49	1,41	1,65	1,51	1,51
Moyenne RIF	1,45	1,39	1,31	1,53	1,40	1,33

Source : calcul de l'auteur

Tableau 88 : Consommation unitaire par couronne dimanche						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC	1,73	1,68	1,59	1,85	1,70	1,51
Paris	1,85	1,74	1,64	1,92	1,76	1,50
PC (Première Couronne)	1,76	1,66	1,57	1,82	1,68	1,50
GC (Grande Couronne)	2,09	1,97	1,86	2,17	2,00	2,00
Moyenne RIF	1,91	1,83	1,73	2,01	1,85	1,75

Source : calcul de l'auteur

Sans surprise ils augmentent parfois très fortement en particulier en 2^{ème} couronne.

4) Convergence des consommations unitaires en IDF

4-1) L'indice de convergence

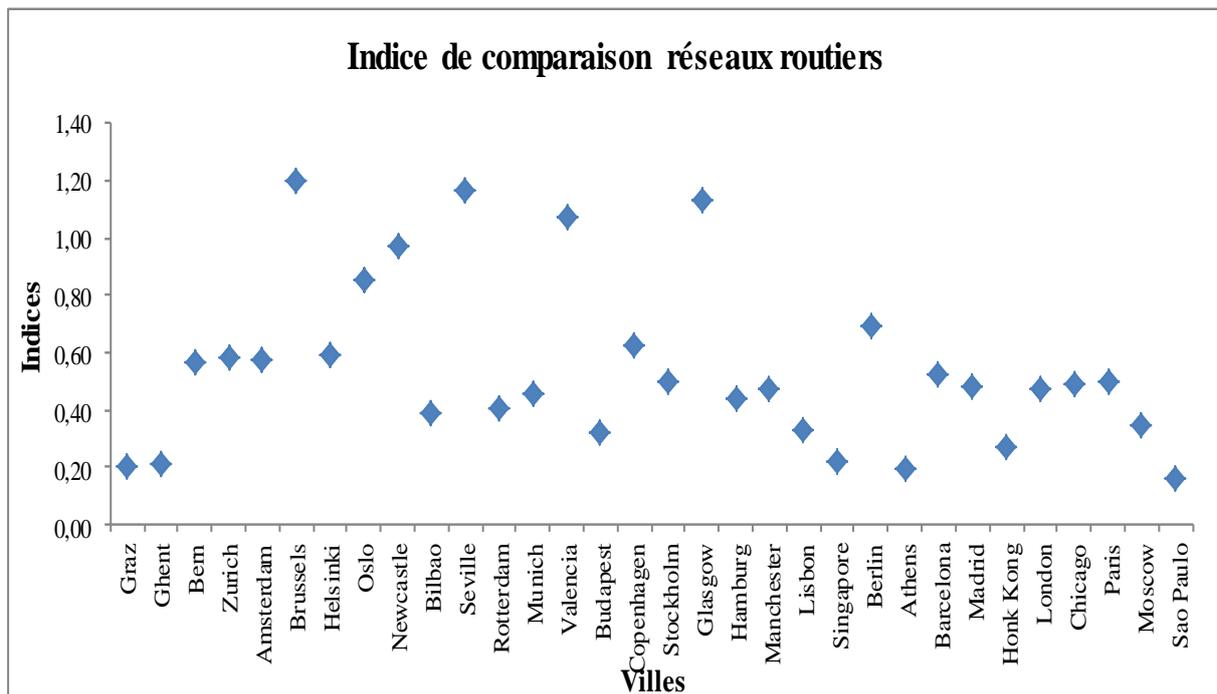
L'indice de convergence I_c compare les consommations unitaires TC et VP des différents territoires (UITP, 2001) (Cf Equation) :

$$I_c = Cu_{tc}/Cu_{vp} \quad (57)$$

Source : auteur

Cu_{tc} = consommation unitaire TC Cu_{vp} = Consommation unitaire VP. S'il est égal à 1 les consommations unitaires sont égales : la VP est aussi compétitive que le TC. (Cf Graphique 31)

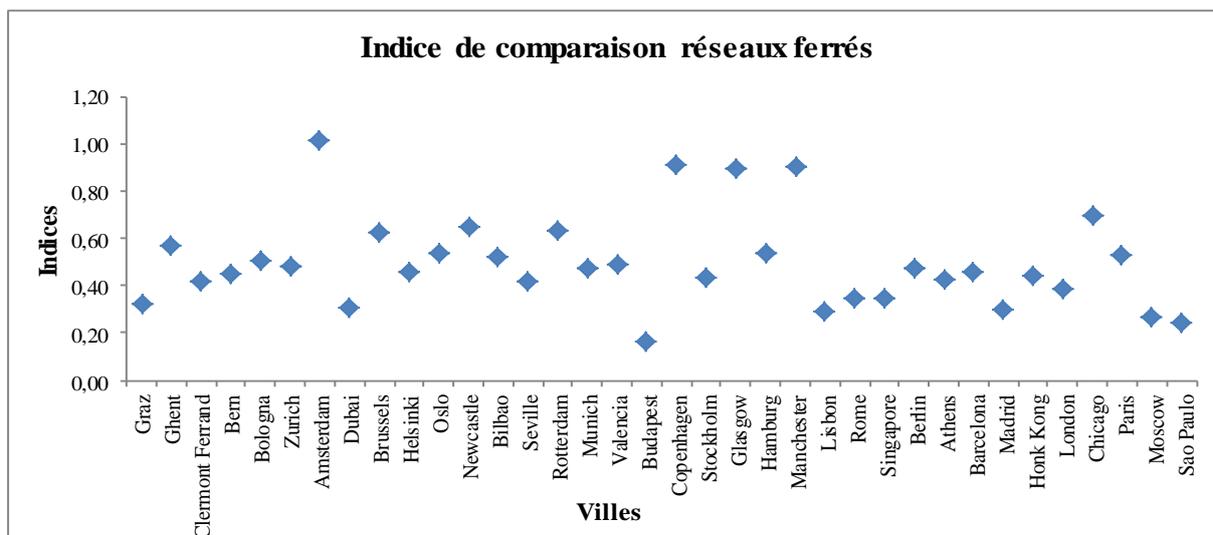
Graphique 31: indice de comparaison réseaux routiers UITP



Source : calcul de l'auteur

Cinq réseaux routiers sont moins efficaces que la VP (Bruxelles, Newcastle, Valence, Séville Glasgow). A Paris, l'indice est à 0.60. Les consommations sont à l'énergie utile et non primaire. Pour les réseaux ferrés, l'indice montre des mesures très proches de 1 ou le dépasse (Amsterdam). Les consommations du réseau ferré sont à l'énergie primaire et non utile ce qui n'est pas le cas des consommations unitaire des VP qui sont à l'énergie utile. Une différence d'environ 20% en faveur du TC montre que les réseaux ferrés restent plus efficaces à l'énergie primaire. (Cf Graphique 32).

Graphique 32: indice de comparaison réseaux ferrés énergie primaire UITP



Source : calcul de l'auteur

Néanmoins les variations montrent que l'efficacité des TC que ce soit en mode bus ou pour le réseau ferré vis-à-vis de la VP est aléatoire en moyenne. A Paris, c'est-à-dire en IDF, l'indice est à 0.45 mais il agrège plusieurs réseaux distincts dans leur maillage et leur configuration spatiale locale.

4-2) Convergence moyenne par modes en IDF

L'indice de convergence (3) divise les consommations unitaires de deux modes. Nous le déclinons sur la zone RATP selon les modes. Deux modes convergent, l'autobus et le métro par rapport à 1975. Le premier à un indice plus important que les autres modes. Il continue sa progression. Le taux remplissage reste stable, c'est donc une dégradation des performances techniques vis à vis de la VP qui explique cette tendance. (Cf Tableau 89).

Tableau 89 : indice de convergence moyen par mode						
Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Autobus	0,32	0,35	0,40	0,49	0,52	0,59
Métro	0,30	0,36	0,39	0,47	0,44	0,39
RER	0,35	0,30	0,33	0,41	0,36	0,28
Tramway	0,00	0,00	0,00	0,32	0,24	0,28
TC	0,31	0,34	0,37	0,46	0,42	0,38

Source : calcul de l'auteur

La hausse de l'indice des autres modes s'arrête à partir de 2008. Entre 1975 et 2008, les consommations spécifiques de la voiture baissent régulièrement alors que celles du réseau ferré sont plus chaotiques, ce qui s'explique par des facteurs internes aux réseaux (renouvellement de matériel, report des consommations vers les équipements, diversité technologique).

4-3) Variation de l'indice de convergence selon les jours

Le taux de remplissage varie selon les usages. Les taux croissent pour la VP le samedi et le dimanche contrairement au TC.

Le plus faible indice en JO se conjugue avec une convergence les autres jours. L'influence du progrès technique avec la consommation spécifique se distingue des effets du taux de remplissage. (Cf Tableau 90)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
JO	0,29	0,29	0,32	0,39	0,36	0,33
SAM	0,45	0,43	0,51	0,66	0,73	0,85
DIM	0,44	0,43	0,47	0,58	0,54	0,49

Source : calcul de l'auteur

Le premier modifie les compétitivités réciproques des TC et des VP avec la diffusion du progrès technique dans les modes. Le second dépend des usages donc des habitants et des territoires.

4-4) Variation selon les couronnes et les jours.

L'indice de convergence de la VP et du TC se différencie selon les couronnes. Il augmente de 0,07 à Paris et 0,08 PC et de 0,15 GC. Il est plus fort en GC qu'à Paris en PC en JO. La compétitivité de la VP vis à vis du TC ne cesse de se renforcer en GC. Néanmoins, les territoires modifient les compétitivités énergétiques du mode indépendamment du progrès technique qui s'inscrit dans les couronnes de manière continue entre 1975 et 2018. En effet, la baisse des consommations unitaires s'inscrit en tendance et les territoires montrent une variation dans cette tendance. (Cf Tableau 91)

Années	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC	0,26	0,28	0,31	0,37	0,35	0,34
Paris	0,28	0,29	0,32	0,37	0,35	0,33
PC	0,27	0,28	0,31	0,37	0,35	0,34
GC	0,33	0,35	0,38	0,46	0,43	0,47
RIF	0,30	0,32	0,34	0,41	0,39	0,40

Source : calcul de l'auteur

La baisse des taux de remplissage du TC et la hausse de ceux de la VP conduisent selon les couronnes à une hausse de la convergence pendant la période. Cette tendance se renforce le dimanche (Cf Tableau 93)

Années	Samedi						Dimanche					
	1975	1982	1990	1999	2008	2018	1975	1982	1990	1999	2008	2018
Paris + PC	0,39	0,42	0,45	0,58	0,57	0,55	0,53	0,57	0,62	0,74	0,73	0,7
Paris	0,41	0,43	0,46	0,59	0,58	0,54	0,56	0,59	0,63	0,76	0,74	0,68
PC	0,39	0,42	0,45	0,58	0,57	0,55	0,54	0,57	0,62	0,74	0,72	0,71
GC	0,5	0,52	0,56	0,72	0,71	0,78	0,68	0,71	0,77	0,93	0,91	0,99
Moyenne RIF	0,44	0,47	0,51	0,65	0,64	0,66	0,6	0,64	0,69	0,84	0,81	0,84

Source : calcul de l'auteur

Cela se traduit alors par une croissance forte du nombre de lignes convergentes en particulier pour l'autobus en banlieue alors que certaines lignes sont fermées. (Cf Tableau 93).

Tableau 93: nombre de lignes convergentes 2008.			
Jours	JO	SAM	DIM
Banlieue	2	13	10
Paris	0	1	6

Source : calcul de l'auteur

L'indice de convergence varie selon les couronnes. L'augmentation de l'indice en GC traduit une augmentation de l'efficacité énergétique de la VP grâce aux progrès techniques. La convergence que nous constatons les jours non ouvrables renvoie elle à une augmentation du taux de remplissage de la voiture. Il diminue plus faiblement pour le TC du fait de l'ajustement de l'offre.

4-5) Discussion des résultats.

De manière transversale c'est-à-dire entre les couronnes nous constatons une croissance de l'avantage du TC. Les trafics des TC sont plus importants dans Paris et la PC modifiant l'indice de convergence avec le taux de remplissage. C'est valable quelque-soit les jours envisagés. L'effet de l'espace sur l'efficacité semble donc acquis pour les voyageurs et le réseau. Ensuite, le progrès technique s'applique ce qui permet de constater une tendance à la baisse des consommations unitaires VP, une stagnation puis une baisse pour le TC pour l'ensemble du réseau. Dans cette tendance baissière, la comparaison montre alors une variation importante des indices de convergence. La compétitivité du TC vis-à-vis de la VP variant très fortement selon les couronnes. L'efficacité du TC vis-à-vis de la VP dépend des conditions techniques et spatiales d'usage. Selon le taux de remplissage, nous constatons que le TC est aussi efficace que la VP le dimanche en Grande Couronne.

L'arrivée de la motorisation hybride ou électrique pourrait bien modifier cet avantage sur le long terme. Même si, aujourd'hui, la diffusion reste à faire, le parc voiture intègre grâce aux aides publiques ces nouvelles motorisations. La compétitivité énergétique du TC vis-à-vis de la voiture n'est donc pas donnée, en particulier, en grande couronne voire à l'avenir dans les milieux plus denses. L'hybride ou la voiture électrique sont performantes même si, pour la propulsion électrique, la faible autonomie la pénalise actuellement. Lorsqu'elle se propulse électriquement grâce à la régénération d'énergie, l'hybride est plus efficace que le transport en commun. Même s'il s'applique aussi au TC, le progrès technique modifie donc les possibilités des modes et donc les choix d'aménagement pour une mobilité urbaine efficace énergétiquement.

L'enjeu du taux de remplissage est donc prégnant pour les transports en commun. En effet, c'est une source de sa compétitivité énergétique. Si pour les heures de pointe, le sujet ne se pose pas, ce n'est pas le cas des heures creuses ou des jours non ouvrables. Il justifie aussi l'interrogation de l'aménagement urbain qui peut favoriser ou non son usage. En effet, l'efficacité énergétique de la mobilité urbaine est un des arguments qui justifie les nombreux investissements publics pour créer une « ville durable ».

5) Conclusion : des facteurs croisés.

Avec la base UITP nous définissons l'indice de convergence et montrons que des TC sont aussi efficaces que la VP. Le taux d'occupation est une variable qui se retrouve avec les régressions statistiques mais son effet sur les consommations unitaires à une efficacité décroissante. Néanmoins cette relation est incertaine et sans doute partielle puisque d'autres éléments existent dans l'efficacité.

Nous étudions alors l'évolution depuis 1975 des consommations unitaires en IDF sur le réseau RATP en intégrant la baisse des consommations spécifiques, l'effet des parcs supposé constants et des habitants qui eux varient selon les secteurs EGT et les périodes. Nous montrons alors une évolution à la baisse de la consommation spécifique pour la VP et une évolution moins régulière pour le TC avec une baisse puis une hausse avant une baisse. Trois facteurs sont à l'œuvre pour le TC à la RATP un réinvestissement de l'économie due au progrès technique une variation du taux de remplissage et enfin un nouveau progrès technologique. Selon les jours, l'indice de convergence varie montrant l'effet du taux de remplissage vis à vis de la consommation spécifique. Des lignes de TC convergent montrant qu'il n'est plus efficace que la VP que selon une exploitation donnée. Enfin nous montrons l'influence des territoires dans ces variations certaines couronnes favorisent le TC vis-à-vis de la VP. Plusieurs éléments sont alors à retenir de cette première étude :

- L'efficacité énergétique dépend de deux facteurs en interaction mais structurellement différent : Le taux de remplissage et la consommation spécifique. Le premier renvoie à l'usage, l'autre à l'exploitation du mode selon une norme technique donnée.
- Le progrès technique s'inscrit en tendance quelque-soit les couronnes.
- L'espace modifie les performances soit dans l'usage du TC soit au travers de la vitesse pour la VP.
- La variation de l'usage a des effets différenciés selon les couronnes du point de vue de la compétitivité énergétique pour une technologie donnée.

Néanmoins, un voyageur n'est pas un habitant. En effet, l'espace des réseaux n'est pas celui des territoires. Si nous constatons une baisse des consommations unitaires en tendance pour les voyageurs, du point de vue des consommations des habitants cette tendance ne se confirme pas nécessairement.

Conclusion section 1 :

Les secteurs de l'enquête EGT permettent d'observer des pratiques de mobilités dans des échelles plus grandes de la Région IDF. Un grand nombre d'autres indicateurs sont distribués par communes ce qui nous permet de compléter les données de mobilité dans l'étude. Trois opérateurs existent, leur activité est reflétée dans les statistiques que nous pouvons comparer aux données de la VP. Ils permettent de dresser le cadre énergétique de notre travail qui montre des variations dans la mesure (source ou véhicule). Nous définissons les consommations unitaires TC et la VP au travers du taux de remplissage et de la consommation spécifique. Nous montrons qu'il n'y a pas d'équivalence entre le taux de remplissage VP et le taux d'occupation TC. Nous montrons alors une grande stabilité moyenne de ces deux taux ce qui laisse supposer que les variations des consommations unitaires proviennent principalement de l'autre variable les consommations spécifiques.

Pour la VP, une tendance à la baisse des consommations spécifiques est due à la diesélisation du parc. Pour le TC, des phénomènes de compensation apparaissent pour le réseau ferré en zone RATP. L'énergie économisée des trains est réinvestie dans l'automatisation des fonctions de vente voire à l'expansion du réseau. Nous montrons alors qu'il existe des travaux qui signalent un rapprochement des efficacités énergétiques des modes urbains (TC et VP) du en particulier au progrès technique que nous appelons convergence. Nous nous intéressons alors à la question de la vitesse de circulation qui varie dans le réseau routier. L'efficacité énergétique de la voiture se modifie selon les espaces, le milieu urbain étant plus consommateur que le milieu rural. Pour le TC, cet aspect est différencié selon les modes. La vitesse des réseaux routiers varie selon les espaces ce qui n'est pas le cas des modes ferrés en site propre. Ces variations sont alors intégrées aux consommations spécifiques. Nous intéressons alors à l'effet du progrès sur les consommations unitaires et la compétitivité énergétique des modes

Nous calculons l'indice de convergence sur la base UITP qui montre l'égalité des consommations unitaires selon les réseaux des territoires de la base avant de nous focaliser sur l'IDF. Nous montrons une efficacité décroissante du taux d'occupation dans l'augmentation de l'efficacité énergétique. La baisse des consommations unitaires de la VP interroge sur l'existence d'une égalisation (convergence) des efficacités énergétiques en l'IDF. Nous calculons les consommations unitaires en IDF des modes et les spatialisons avant de les comparer pendant la période allant de 1975 à 2018 dans l'espace réticulaire et aréolaire. Elle montre une convergence jusqu'en 2008 pour le réseau ferré RATP tandis qu'elle continue pour le bus. Nous montrons l'effet différenciée des deux composantes de l'efficacité énergétique consommation spécifique et taux de remplissage.

Cette convergence se manifeste différemment selon les couronnes, ; elle est plus forte en GC qu'à Paris ou en PC. Elle se manifeste aussi différemment selon les modes. En effet, pour la RATP alors que l'autobus évolue dans les mêmes milieux que le réseau ferré nous observons deux tendances différentes. Le taux de remplissage du réseau ferré augmente alors que celui de l'autobus reste stable.

Il reste alors à savoir comment ces croissances des efficacités énergétiques des voyageurs modifient les consommations d'énergie des habitants.

Section 2 Quels effets des variations de l'efficacité énergétique des voyageurs sur l'efficacité énergétique des habitants ?

Introduction

Dans les couronnes, la compétitivité énergétique varie en faveur de la VP mais en comparant les couronnes, le TC est plus avantage à Paris ou en Petite Couronne (PC). Quels sont alors les effets de cette convergence sur les consommations des habitants et des territoires ?

Tout d'abord, une croissance de l'efficacité énergétique du réseau urbain signifie-t-il que l'efficacité énergétique de la mobilité des habitants augmente ? Pour un territoire, il s'agit du ratio qu'il existe entre la somme des énergies dépensées dans les transports de personnes et le nombre d'habitants de la zone considérée. (NEWMAN & KENWORTHY, 1990) (UITP, 2001), (SDRIF, 2006) (LE NECHET, 2010). Mais cette approche interroge à grande échelle. Avec la conception de l'espace en tant que lieu de pouvoir, la territorialité aréolaire s'oppose à la territorialité réticulaire (DUPUY, 1991). Géographiquement, le réseau traverse plusieurs territoires et forme une unité propre en interaction avec son environnement. Il implique une spatialisation du voyageur indépendante du milieu qu'il traverse. Un voyageur n'est pas un résident du territoire dans lequel il circule. Plus les périmètres spatiaux dans leur forme et leur taille seront faibles, plus la ligne du réseau en traversera, ce qui implique alors une affectation des flux transportés dans le réseau vers ces parties de territoires au demeurant normés dans leur définition. Aussi pour la mobilité courte distance ou quotidienne, la mesure de sa mobilité dans un réseau ou dans un territoire n'est pas la même. Ensuite, les consommations spécifiques dépendent du nombre d'habitants puisqu'ils varient selon les espaces « urbain » ou non.

Pour l'efficacité énergétique, le périmètre des réseaux et des territoires diverge. Il existe une interaction entre deux espaces aréolaire et réticulaire structurellement différents sur plusieurs échelles territoriales. Cette interaction se traduit par une dissociation entre la notion de voyage qui renvoie à l'aspect réticulaire et la notion de déplacement qui renvoie à la mobilité par habitant. Aussi, « l'espace réticulaire » est l'espace des voyageurs, « l'espace aréolaire » est l'espace d'habitation des résidents. L'interaction « spatiale-réticulaire » nécessite alors d'être spécifiée en IDF. La consommation unitaire d'énergie par habitant est certes un enjeu environnemental, social et économique (ILLITCH, 1973) mais aussi un problème de mesure.

Aussi, comment évaluer les conséquences des variations de l'efficacité énergétique réticulaire sur les habitants ?

Chapitre 3 Comment passer des consommations unitaires (voyageur.km) aux consommations spatialisées par habitant ? Application à l'Ile-de-France à partir de l'enquête ménages déplacements

Chapitre 4 : Déclinaison de la consommation spatialisée par habitants en IDF et effet de la convergence.

Chapitre 3 : Comment passer des consommations unitaires (voyageur.km) aux consommations spatiales par habitant ?

Application à l'Ile-de-France selon l'enquête ménages déplacements

Introduction :

La convergence des efficacités énergétiques dans l'espace réticulaire ne signifie pas que les consommations des habitants aient la même tendance. En effet un voyageur qui traverse un espace territorial à l'intérieur d'un réseau n'y habite pas forcément. Les consommations des opérateurs de transport concernent des voyageurs pas des habitants d'un territoire. La spatialisation des consommations des réseaux selon les habitants et l'effet de cette convergence sur leur consommation reste donc à faire.

Pour l'étudier selon les consommations par habitant, il est nécessaire d'entrer dans le concept de mobilité issu des enquêtes ménage déplacement. Les enquêtes « ménage déplacement », déclinés en IDF sous la forme des enquêtes globales déplacements, sont territorialisés sous forme de secteurs, « les secteurs EGT ». Il s'agit d'un zonage de pouvoir puisqu'il se décline selon les regroupements de commune ou EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale).

La mobilité quotidienne regroupe 3 « sous-systèmes » (transport, activités et relations sociales) (BONNEL, 2002). Néanmoins, elle dépend du corps et des capacités cognitives (LE BRETON, 2008). Se déplacer, autonomise et construit une trajectoire de vie ascendante (ORFEUIL & al, 2002). L'individu, avec les moyens de transport s'affranchit de la distance et « fabrique » la représentation spatiale, de lieux (aéroport par exemple), et ses moyens de mobilité. Le permis de conduire traduit l'apprentissage cognitif de moyen spécifique (voiture), de son état physique, de la contrainte associée aux revenus, de la croissance des liens sociaux, des ressources en termes de réseaux de transport (ORFEUIL & al, 2002). Des perspectives d'emplois et de résidence s'offrent à l'être mobile. Un cercle vertueux se met en place. La « figure de l'insulaire » décrit alors les désavantages cumulatifs de l'absence de mobilité sur les aires de marché de l'emploi (ORFEUIL & al, 2002). Dans les EGT, elle se mesure selon les déplacements dont la distance n'excède pas 80 Km. Elle renvoie à un grand nombre de déplacement dans un périmètre donné. Les secteurs EGT détaillent pour la région IDF les pratiques de mobilité à une échelle plus grande que celle du département. L'autre mobilité est appelée longue distance, les déplacements excèdent les 80 KM. Elle est plus rare en termes de fréquence, mais son périmètre excède largement celui des déplacements quotidiens. Elle ne fait pas l'objet de notre étude.

Un voyage n'est pas un déplacement. Il nous faut donc rapprocher les deux sources de données : EGT, et données de consommation des transporteurs, pour continuer à approfondir la question de la performance énergétique de la mobilité des habitants d'Île de France, et vérifier s'il y a ou non convergence des consommations énergétiques des différents modes pour les habitants des différents secteurs de l'EGT. Plusieurs méthodes existent. A petite échelle, les consommations sont calculées à partir des trafics avant d'être comparées aux données de ventes de carburant pour les Comptes Transport National (CTN) (ENERDATA, 2004). D'autres études n'intègrent que les déplacements un jour de semaine, ils évacuent les week-end (CHARME & alii, 2010). Mais ces méthodes sont limitées. Aussi, une approche combinée, intégrant la mobilité et l'efficacité énergétique réticulaire semble adaptée pour les secteurs que nous étudions. Ce chapitre est structure en deux parties.

La première renvoie à la mesure de la mobilité

La seconde à la mise en œuvre d'une méthode combinée.

1) La mobilité quotidienne en IDF

1-1) Mesure de la mobilité des enquêtes EGT en IDF.

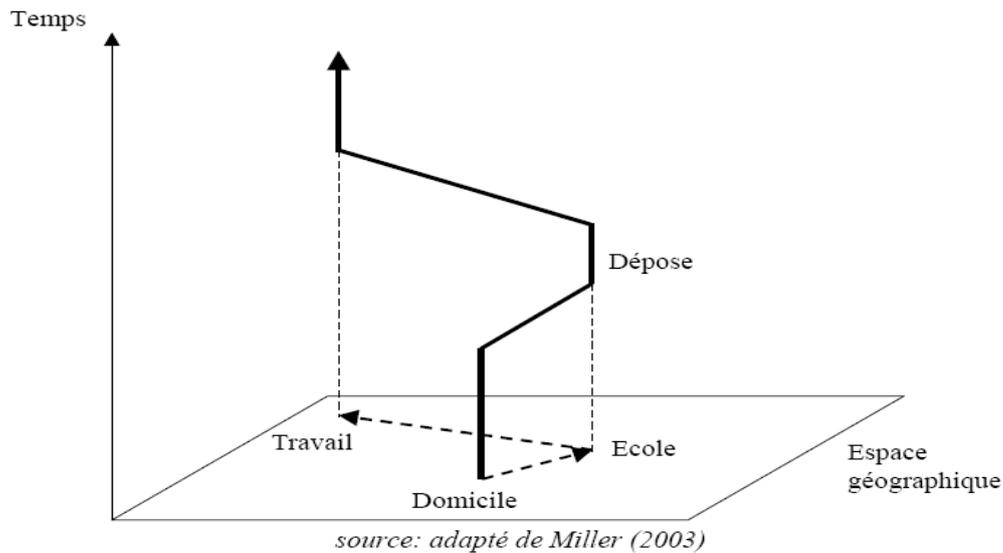
1-1-1) Mobilité et déplacement

Les mesures de la mobilité quotidienne sont multiples (MILLION, 2015). Dans les EGT, la mobilité est la quantité de déplacement. Un déplacement est caractérisé par un motif (une activité) à l'origine et un motif à la destination, quel(s) que soi(en)t le(s) mode(s) de transports utilisé(s) (EGT, 2010). Les déplacements n'ayant le domicile, ni pour origine ni pour destination, est appelé secondaire. (ORFEUIL, 1998). La mobilité est donc un ensemble de déplacements, éventuellement chaînés (sans retour au domicile), et pour des motifs multiples, combinant plusieurs modes (dont toujours la marche). Les motifs et les modes sont isolés. Pour les motifs l'activité les détermine. Il en existe cinq qui privilégient la destination et non l'origine. Ainsi, le déplacement pour achat est défini de la manière suivante : « Par convention, on appellera "déplacement pour achats" un déplacement ayant pour activité à destination une course ou un achat. Sont donc exclus les déplacements effectués pour le retour des achats vers le domicile par exemple. » (DELAPORTE & COUREL, 2006). Ensuite, les enquêtes comptabilisent un mode de transport selon le mode principal. Lorsqu'il y a plusieurs modes utilisés, celui qui est utilisé sur la plus grande distance est comptabilisé. Aussi, les séquences de marche réalisées pendant les trajets en TC ou en VP disparaissent. Les EGT 2008 ont corrigé cette minimisation en réévaluant la quantité des trajets à pied.

Néanmoins, des activités interstitielles et des détours existent (CORNINCK & MASSOT, 2007). Le temps est une ressource utilisée selon un programme d'heure ou des activités sont effectués (CONESA, 2010) dans un prisme d'espace temps. Son périmètre dépend des capacités maximales de déplacement disponible. Un programme d'activité intègre plusieurs temporalités dans une optimisation globale du temps, et non par motif, consacrée pour chacune (VALIQUETTE, 2010) (MILLION, 2015). La mobilité est un cheminement continu contraint par (ALLAIRE, 2007) (cf graphique 33)

1. Les capacités (*capacity constraints*) : restrictions non spatiales (budget monétaire et temporel), disponibilité et l'accessibilité aux modes de transport.
2. Le couplage (*coupling constraints*) : restrictions sur le couplage d'activités par la localisation des établissements et l'emploi du temps individuel.
3. Les institutions (*institutional constraints*) : restrictions d'accès aux établissements par des régulations publiques ou privées (propriété, heures d'ouverture, entrées payantes, etc.).

Graphique33: diagramme d'Hägerstrand



Source : Raux.

La notion de chaînage se substitue à l'additivité des déplacements. Le domicile est le point d'ancrage du programme.

Des modèles tentent de comprendre les interactions entre motifs de déplacement primaire (issu du domicile) et secondaires (issu du lieu d'arrivée du primaire). La notion de boucle de déplacement (MASSOT & al, 2003) implique un point d'ancrage qui peut être une activité en dehors du domicile. Néanmoins dans cette approche (MERCIER, 2008) le temps est à déterminer. Les modèles à vitesse constante pallient ce déficit. Mais les vitesses varient et déterminent le nombre d'activités accessibles et le temps que l'individu peut leur consacrer. Cette approche renvoie à la demande. Elle n'évalue pas les gagnants et les perdants d'une politique de transport. Les choix modaux dus à la compétition des réseaux sont absents. Enfin, elle peut être faite sur de grandes échelles territoriales, elle est plus difficile sur de plus petites. La définition normative par motif sera donc utilisée par la suite.

1-1-2) La mobilité des secteurs EGT.

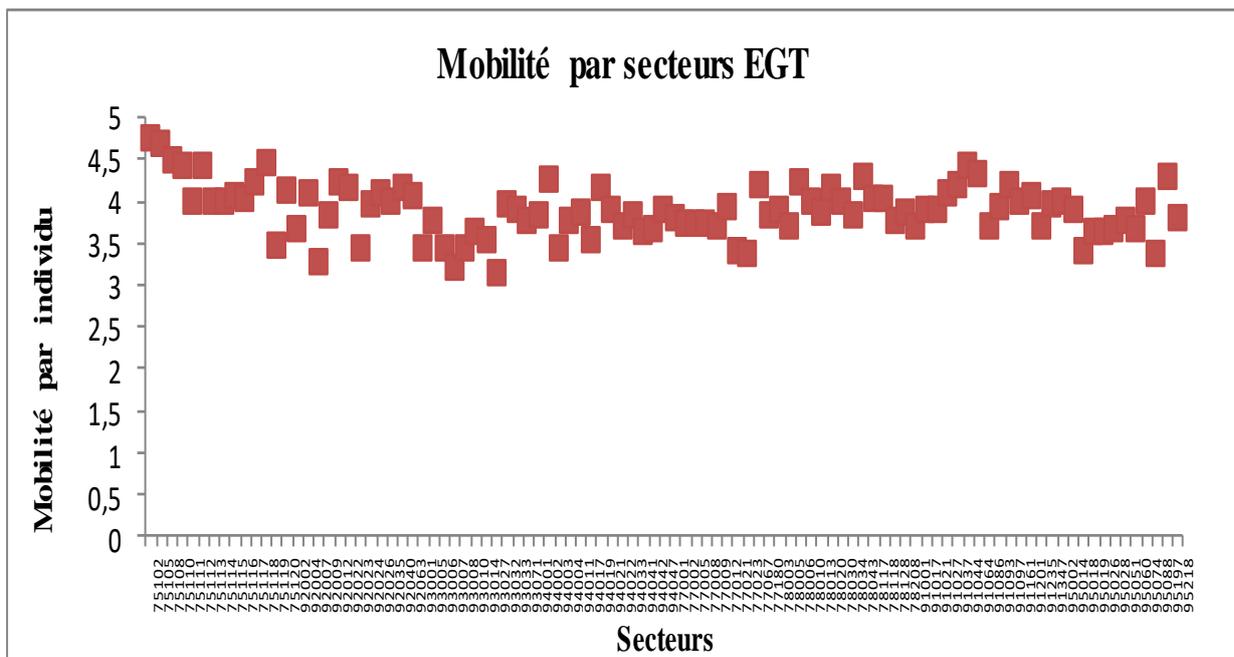
Nous rappelons la répartition des secteurs avec leur numéro 7502 noté 75102 sur les abscisses. (Cf Figure 20)



Figure 20 : cartes des secteurs.

Les minimums de mobilité sont de 3.2 déplacements, (93007) et le maximum 4.74. (Cf Graphique 34).

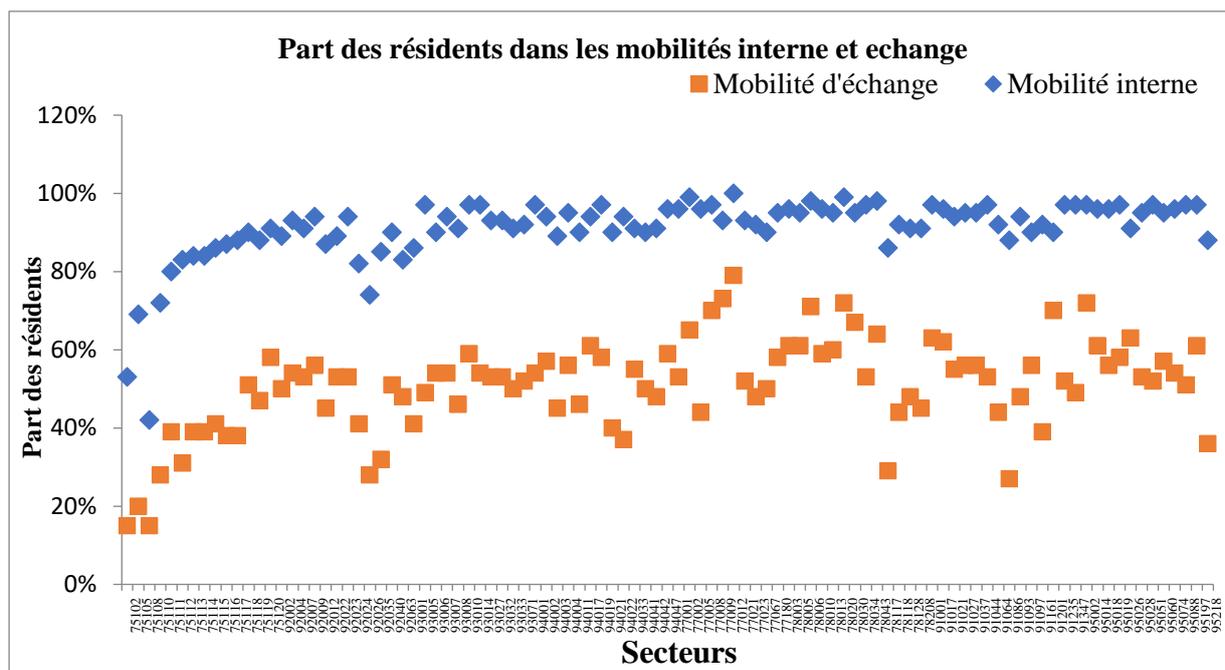
Graphique 34: mobilité des résidents par secteur EGT



Source EGT

La mobilité des résidents varie peu. Elle est en moyenne 3.7 pour les séniors (2.5 ans pour les + 81 ans), 4.2 pour les actifs et 3.4 pour les 15-25 ans. En termes de genre, elle est quasi-égale. Elle diminue les jours non ouvrables 3.33 samedi, 2.84 dimanche. La mobilité interne regroupe celle des résidents et des non-résidents à l'intérieur du secteur. (Cf Graphique 35).

Graphique 35: part de résidents dans la mobilité interne aux secteurs EGT



Source EGT

La part des résidents est très stable (80% environ) sauf deux points (75102 et 75103) parisien, un fort taux d'activité l'explique sans doute. Ces arrondissements sont peu peuplés avec beaucoup d'activités. La mobilité d'échange regroupe les personnes qui entrent et sortent du secteur. La part de résidents varie fortement entre 15% (secteur 75102) et 80% (77012) pour la mobilité d'échange. Faible dans les secteurs parisiens et d'autres secteurs (92024, 78043), elle est plus forte en banlieue.

1-1-3) Les motifs de déplacement.

Le motif de déplacement est l'élément causal du déplacement (MILLION, 2015). Il y a motif à l'origine (l'activité exercée avant le déplacement) et à l'arrivée (celle pour laquelle on se déplace) selon 5 codes (1,2,3,4,5). (Cf Tableau 94)

Tableau 94: hiérarchie des motifs EGT

Destination	Domicile	Travail	Affaires professionnelles	Enseignement	Loisirs	Autres motifs
Origine						
Domicile	-	1	2	3	4	5
Travail	1	-	2	2	2	2
Affaires prof.	2	2	-	2	2	2
Enseignement	3	2	2	-	3	3
Loisirs	4	2	2	3	-	4
Autres motifs	5	2	2	3	4	-

Source EGT

1. Domicile travail (DT) (navette) entre le domicile et le lieu de travail.
2. Affaires ou professionnel (AP). Ils regroupent des activités hors du lieu de travail fixe et concernent des catégories socio professionnelles supérieures (cadres ...).
3. Les motifs affaires (Rendez-vous symposium etc..), sont effectués lors des heures de travail. Les autres sont des livraisons à partir ou vers des lieux de production, des commerces.
4. Etudes (E) ces déplacements regroupent les déplacements scolaires et universitaires

5. Le Loisir regroupe des motifs variés (spectacle, promenade, activités sportives.)
6. Autres regroupent les déplacements d'achats (quotidien, occasionnel, exceptionnel), les personnelles (soin médicaux, service financiers, juridiques, formalités administratives).

Le nombre moyen de déplacements « obligés » (DT + AP + E) diminuent 1.87 en 1976, 1.62 en 2008. Le motif DT baisse continument les autres augmentent. La réduction du temps de travail (FOURASTIER, 1979), la croissance des loisirs (DUMAZEDIER, 1962), la démographie, (la population des plus de 60 ans croît (DE BIAISI & VIROT, 2011), le chômage (ENMV, 2020), seraient associables à ces évolutions. (Cf Tableau 95).

Tableau 95: déplacement en fonction des motifs

MOTIF	1976	1983	1991	1997	2001	2010
Domicile-travail *	0,78	0,71	0,67	0,62	0,65	0,51
Affaires professionnelles*	0,60	0,58	0,54	0,58	0,49	0,62
Enseignement	0,49	0,53	0,56	0,53	0,53	0,49
Loisirs / visites	0,41	0,48	0,54	0,63	0,56	0,81
Autres	1,21	1,17	1,18	1,36	1,26	1,46
Total	3,49	3,47	3,49	3,72	3,50	3,88

Source EGT 2010

1-2) Les parts modales

Les parts modales peuvent s'exprimer en portées ou en parts de marché. Les premières renvoient à la distance parcourue dans les modes.

$$P_i = \text{nb total de km parcourus avec le mode } i / \text{nb total de km parcourus (58)}$$

Source : auteur

L'autre renvoie à la part de marché des modes pour un motif de déplacement. C'est le rapport entre la somme des déplacements dans un mode sur la somme totale des déplacements. C'est un paramètre de choix individuel qui renvoie à un pourcentage (Cf Equation 59).

$$P_i = D_i / \Sigma D \text{ (59)}$$

Source : auteur

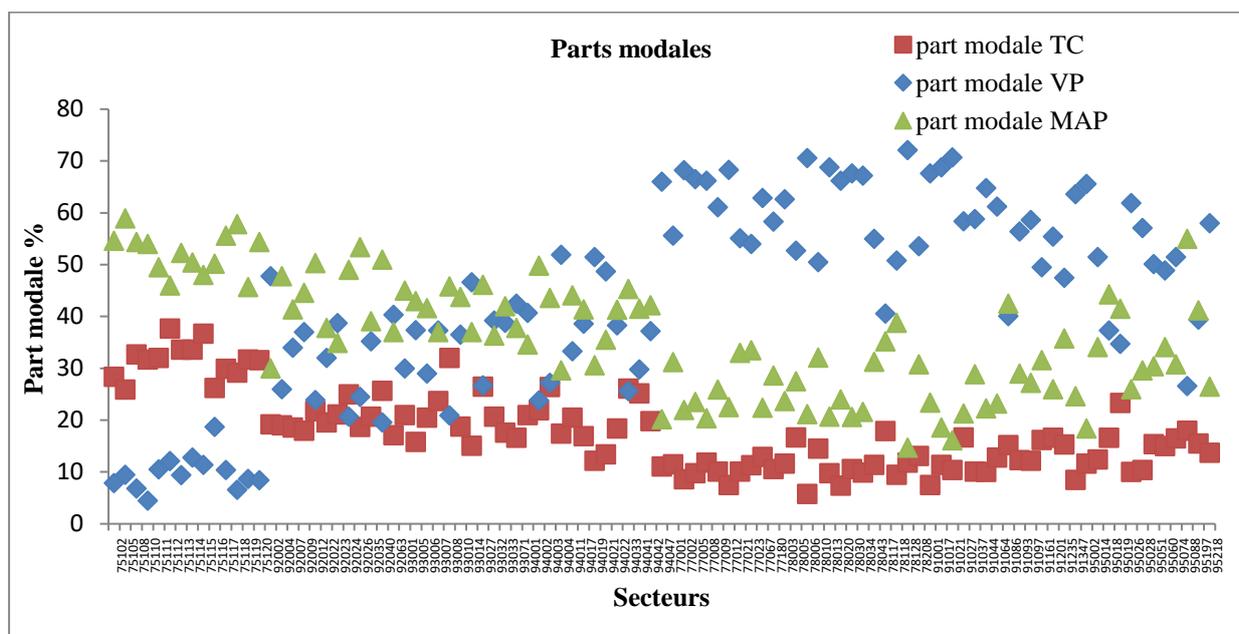
P_i = part modale du mode i D_i = déplacement du mode i ΣD = somme des déplacements des modes du territoire concerné pour le motif de déplacement. Les modes sont les suivants : VP, Voiture Particulière (dont les véhicules utilitaires légers (VUL) transportant des personnes), TC, transport collectif rassemble tous les modes de transport en commun, deux-roues motorisés ou non (Bicyclette...), autres mécanisés (Trottinette etc...), Marche. Les secteurs EGT recensent trois modes MAP TC VP pour les paramètres de choix individuel. Selon les jours les parts MAP baissent sauf à Paris. (Cf Tableau 96)

Territoires	JO	SAM	DIM
Paris	0,52	0,57	0,52
Cœur d'agglomération	0,43	0,34	0,36
Agglomération centrale	0,29	0,23	0,30
Autre territoire	0,25	0,21	0,20

Source : calcul de l'auteur

Les parts de la VP augmentent lorsque l'on s'éloigne de Paris. (Cf Graphique 36).

Graphique 36 : parts modales selon les secteurs.



Source : EGT 2010

1-3) Le TC un mode spécialisé.

1-3-1) La part modale domicile travail comme élément de spécialisation du TC.

Le TC est l'usage d'un véhicule motorisé, guidé ou non par un conducteur professionnel, d'un ou plusieurs passagers, pour un parcours commun, dont l'origine et la destination renvoient aux points d'arrêts spécifiques du réseau utilisé. Les parts de déplacements montrent une spécialisation : 67% des parts modales (PM) du TC vient des motifs obligés (DT + AP + E) (Cf Tableau 97)

Motif	Déplacement	PM
Domicile travail (DT)	0,21	0,27
Affaires professionnelles (AP)	0,15	0,19
Enseignements (E)	0,14	0,18
Loisirs	0,15	0,19
Autres	0,14	0,18
Total	0,79	1

Source : EGT

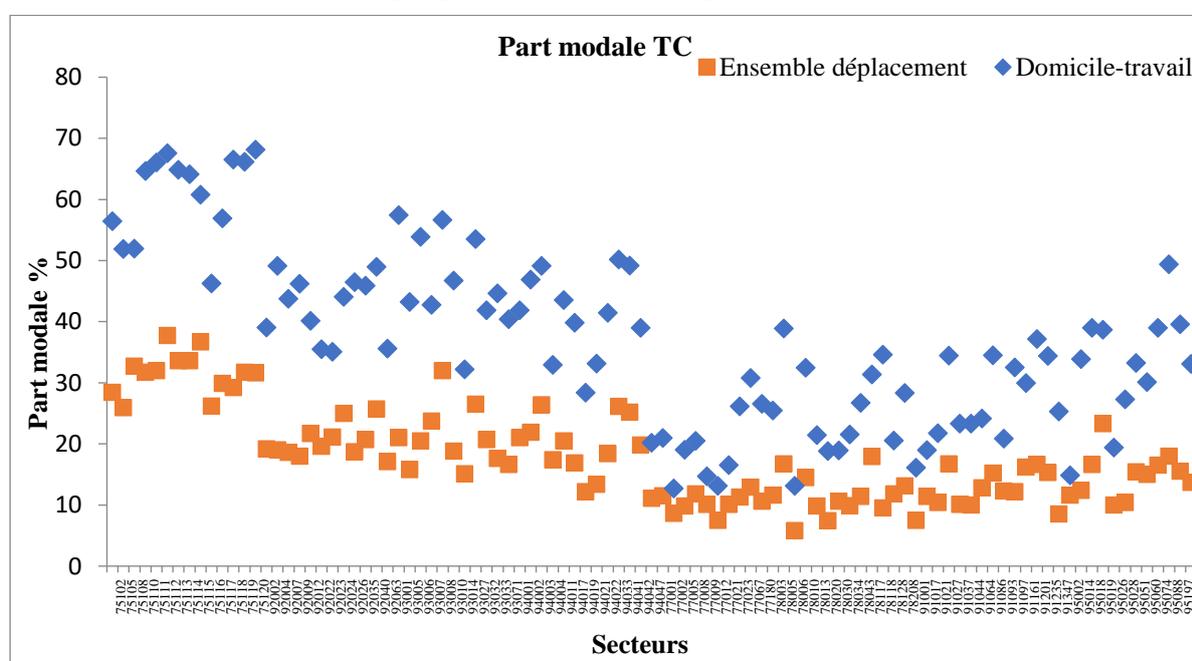
Elles baissent avec le motif DT, elles diminuent hors JO (Cf Tableau 98)

Territoires	JO	SAM	DIM
Paris	0,32	0,26	0,21
Cœur d'agglomération	0,22	0,22	0,13
Agglomération centrale	0,14	0,08	0,07
Autre territoire	0,10	0,04	0,04

Source : EGT

Elles varient selon les modalités. Avec 31% (43% avec les déplacements secondaires) des déplacements domicile travail en JO, le métro est moins spécialisé que le RER 51% (64% avec les déplacements secondaires). Sans liaison avec un autre mode, l'autobus est le moins spécialisé 16% (22% avec les déplacements secondaires). Si nous étendons au déplacement domicile étude considéré comme un déplacement domicile travail pour des non-salariés la part est de 74% (RER) 55% (métro) et 50% autobus. Dans les secteurs, les parts modales domicile travail (DT) excèdent celles de l'ensemble des déplacements (ED) (Cf Graphique 37).

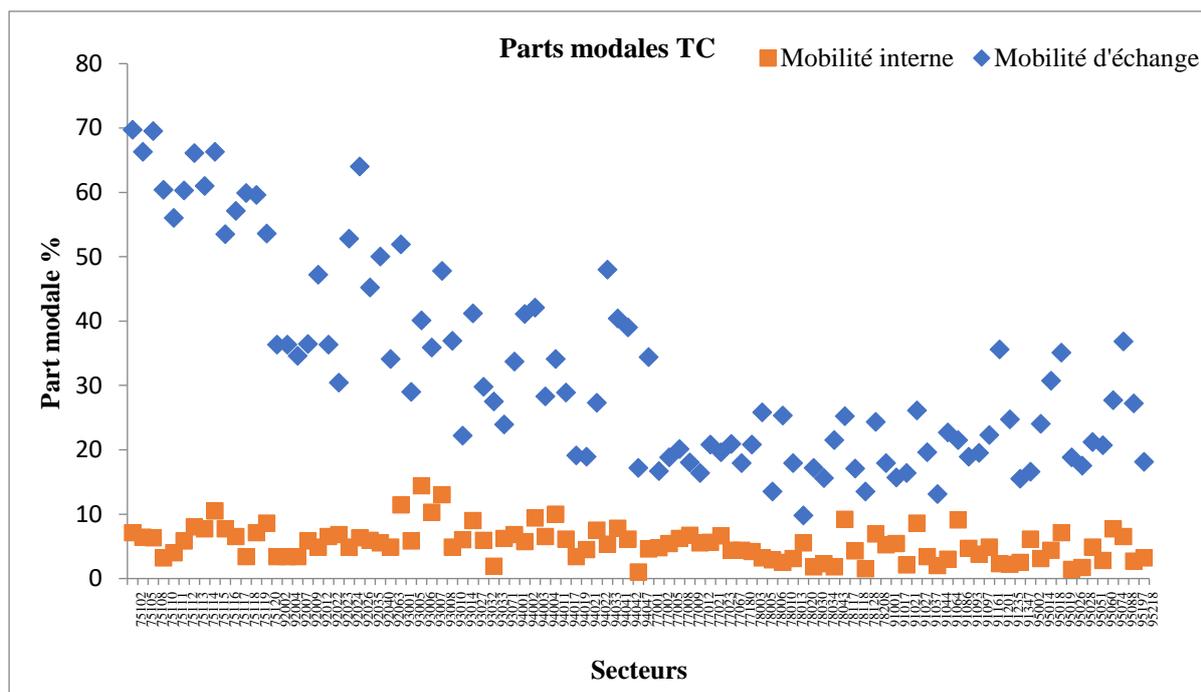
Graphique 37: variation des parts modales



Source : calcul de l'auteur

Le déplacement DT renvoie à la mobilité d'échange, il varie fortement, contrairement à la mobilité interne, diverse pour les motifs et les portées. (Cf Graphique 38)

Graphique 38 : part modale et type de mobilité

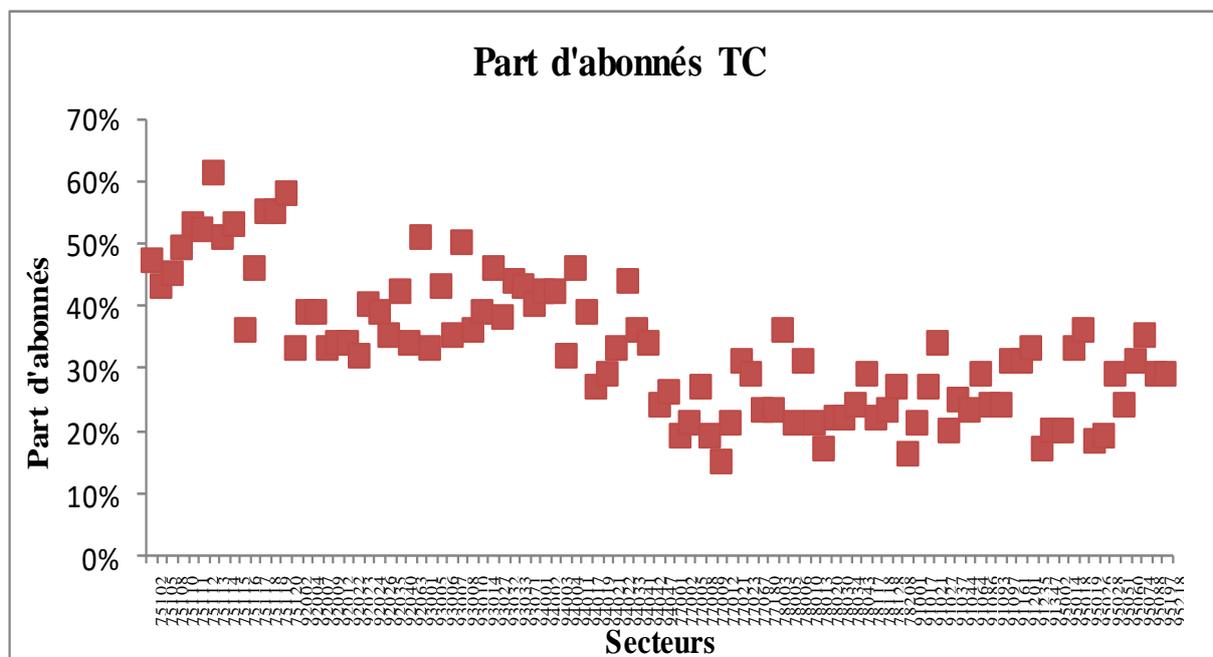


Source : calcul de l'auteur

1-3-2) Les abonnés.

L'abonnement est une tarification forfaitaire permettant d'utiliser le TC sans coûts supplémentaires par voyage (Cf partie 2). C'est donc un investissement. Les données évaluent le nombre de personnes possédant un titre. Nombreux dans Paris, ils le sont moins en grande banlieue. (Cf Graphique 39)

Graphique 39: abonnés au TC



Source EGT 2010

1-4) La VP un mode non spécialisé

1-4-1) Les parts modales de la VP.

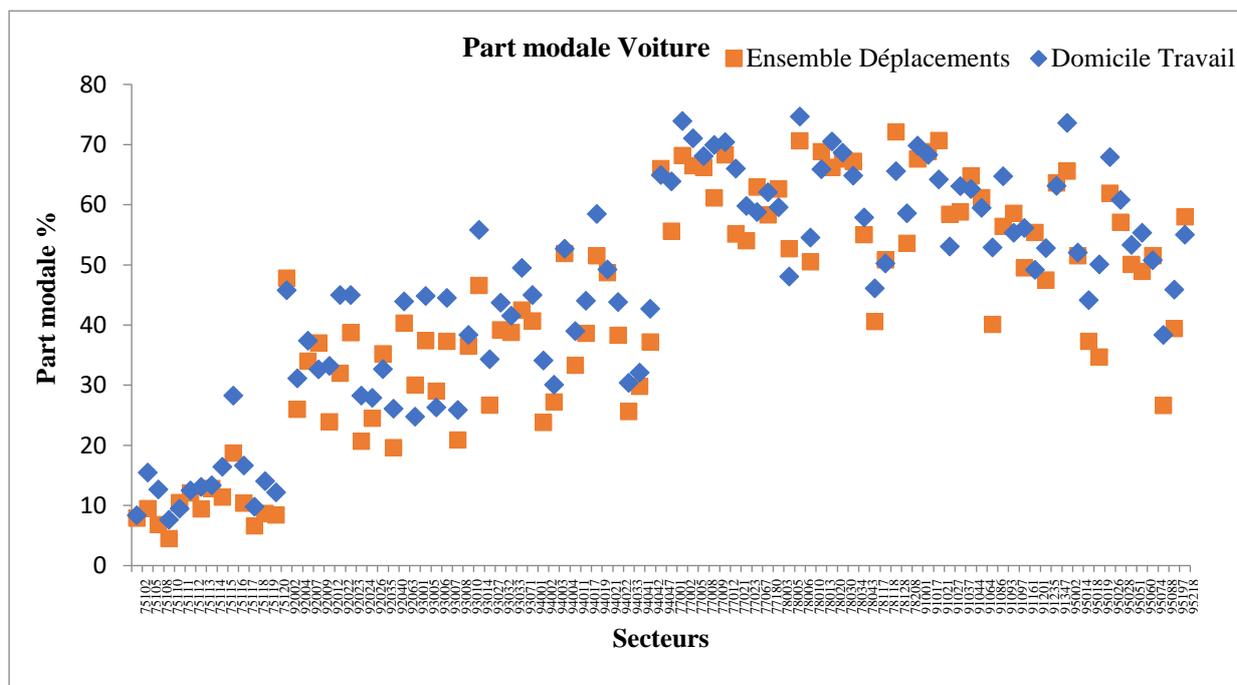
La VP est l'usage d'une voiture ou d'un utilitaire, par un conducteur pour son parcours, pouvant être accompagné ou non d'un ou plusieurs passagers dans son cheminement. La VP est multifonctionnelle impliquant son usage pour tous les motifs de déplacement (Cf Tableau 99)

Motifs	Déplacement	PM
Domicile travail	0,21	0,14
Affaires professionnelles	0,27	0,18
Enseignements	0,07	0,05
Loisirs	0,3	0,20
Autres	0,62	0,42
Total	1,47	1,00

Source EGT 2010

Les variations dans l'usage sont moins marquées que celle du TC (Cf Graphique 40).

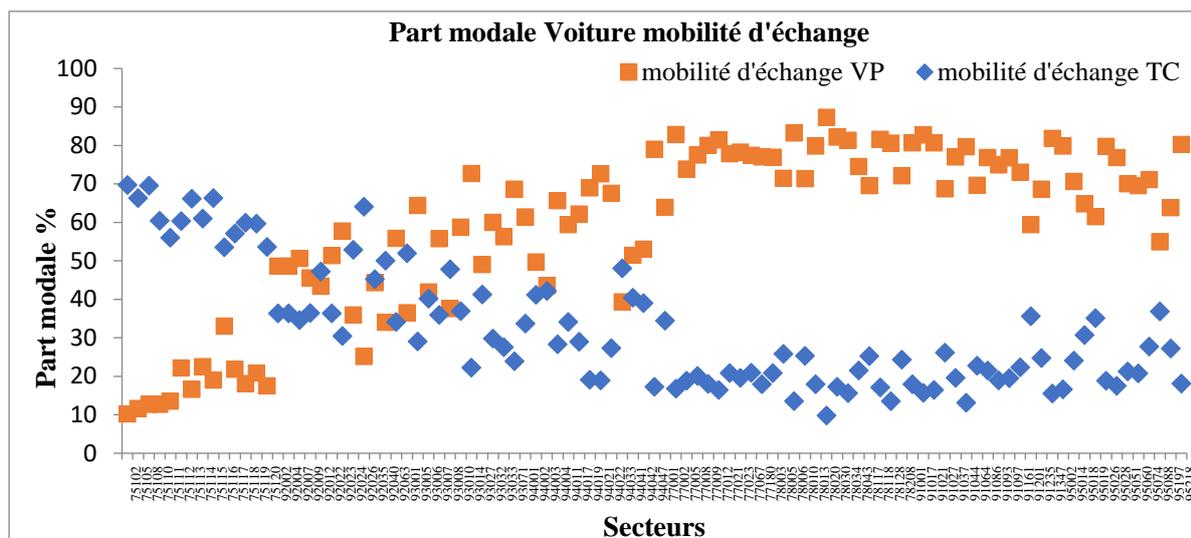
Graphique 40: variation des parts modales voitures



Source : calcul de l'auteur

Nous constatons des variations similaires entre mobilité d'échange (entre les secteurs) et interne (dans les secteurs) dans l'usage. Pour la mobilité d'échange la substitution est « VP – TC » (Cf Graphique 41)

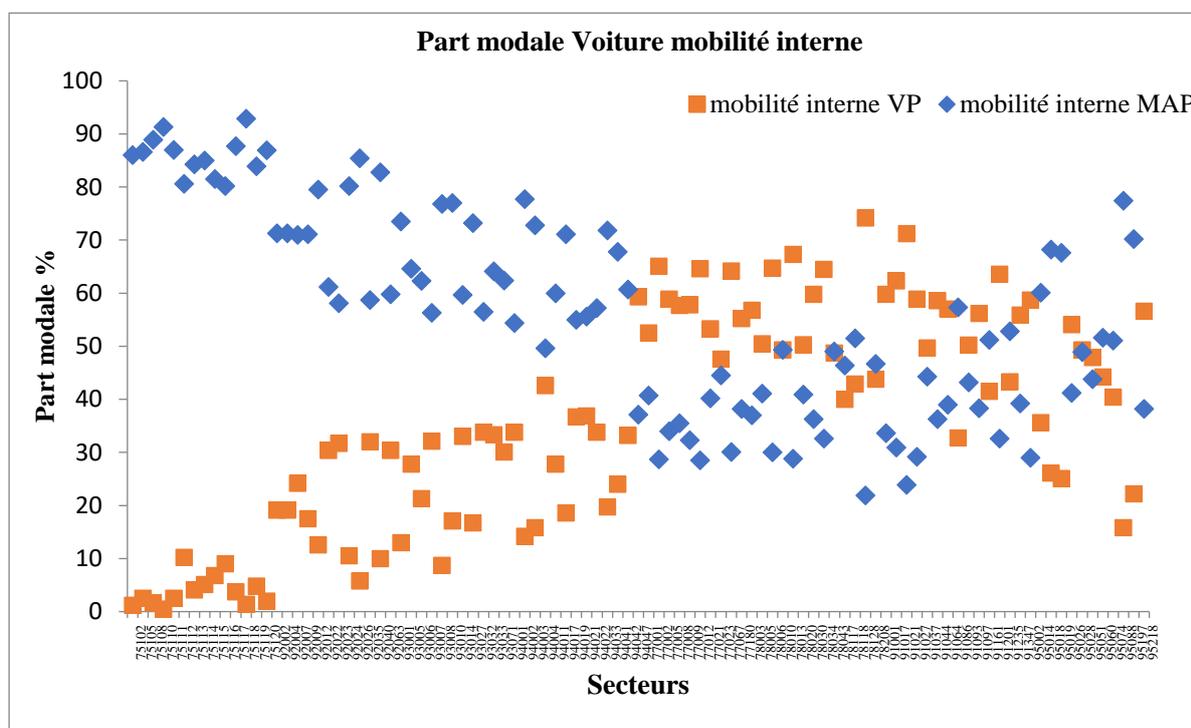
Graphique 41: VP mobilité interne et échange



Source EGT.

Dans la mobilité interne, la substitution s'effectue vis-à-vis de la MAP (Cf Graphique 42)

Graphique 42: part modale mobilité interne.



Source : EGT 2010

La variation des parts modales en jour non ouvrable (NJO) reflète l'absence de spécialisation là encore, durable, des résultats similaires apparaissent dans l'EGT de 2001 (Cf Tableau 100).

Tableau 100: part modale des résidents des voitures 2010.		
Jours	SAM	DIM
Paris	+0,02	+0,11
Cœur d'agglomération	+0,14	+0,16
Agglomération centrale	+0,10	+0,26
Autre territoire	+0,05	+0,10

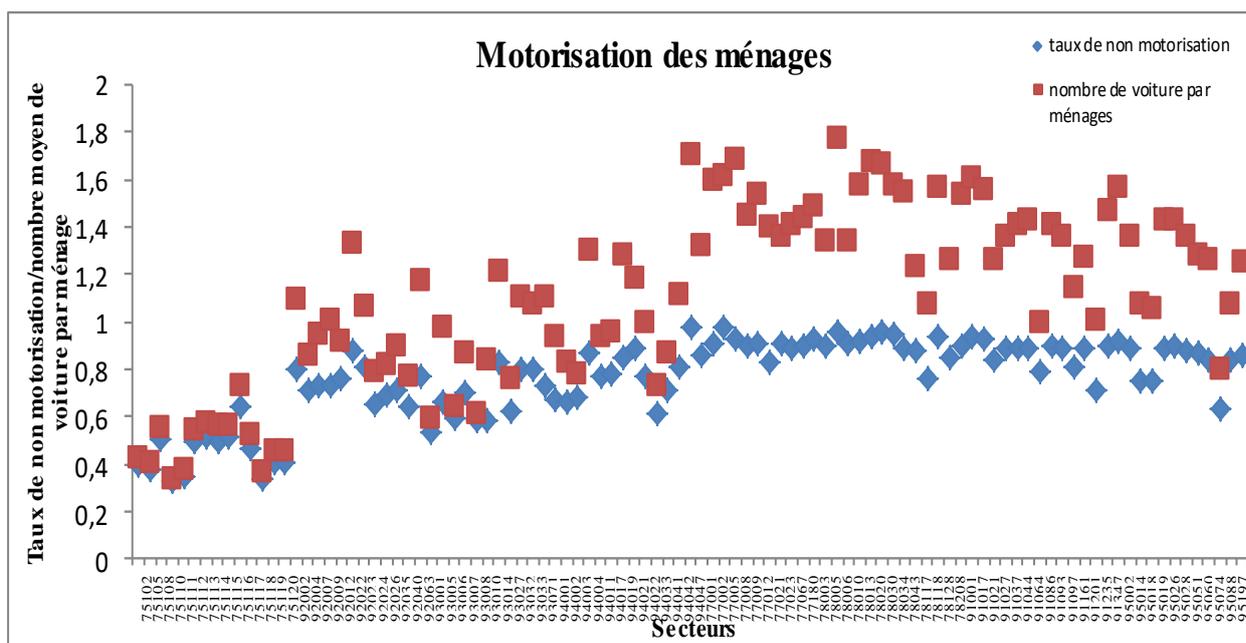
Source : calcul de l'auteur d'après EGT 2010

La concurrence de la VP sur le TC s'exerce sur le trajet domicile travail, alors que celle de la voiture sur la MAP concerne l'ensemble des autres motifs déplacements.

1-4-2) La disponibilité des véhicules.

Deux indicateurs d'équipement des ménages sont présents dans les enquêtes EGT : le pourcentage de ménages non motorisés et le nombre moyen de voiture par ménages. Ils sont répartis sur les secteurs. Le pourcentage de ménages non motorisés recense les ménages sans voiture rapportés à tous les ménages. (Cf Graphique 43).

Graphique 43 : motorisation des ménages des secteurs EGT



Source : EGT

Le nombre de moyen de voiture par ménages recense la quantité moyenne de véhicule par ménage. Sa valeur est minorée. En effet, les données de motorisation distinguent les ménages mono-motorisés et multi-motorisés. Le nombre de voiture par ménage se déduit de ces indicateurs avec une valeur par défaut de 2 pour les multi-motorisés. La répartition du nombre moyen de voiture par ménages varie fortement, il est plus faible à Paris qu'en première ou en deuxième couronne. La non-motorisation varie plus faiblement. L'abonnement TC dans Paris semble constituer une alternative à la multimotorisation (Cf Tableau 101)

Tableau 101 : nombre moyen de voiture population

	1976	1983	1991	2001	2010
Paris	0,50	0,53	0,57	0,54	0,49
Petite couronne	0,76	0,88	0,93	0,96	0,92
Grande couronne	0,98	1,13	1,24	1,32	1,35
Île-de-France	0,75	0,87	0,96	1,00	0,99

Source : EGT 2010

La motorisation varie selon les catégories de population. A Paris elle est constante, les populations non actives (retraités...) sont motorisées, ce n'est pas le cas des autres couronnes.

1-5) La distance du déplacement.

1-5-1) La portée ou la grandeur du déplacement.

Les enquêtes déplacement ne mesurent pas une distance réelle mais une distance à vol d'oiseau entre une origine et une destination. Il est donc nécessaire de faire des hypothèses pour calculer les longueurs des déplacements selon ces enquêtes. Plusieurs calculs de distance existent, moyenne dans l'agglomération Bordelaise (POUYANNE, 2004), basée sur des distances relatives (LE NECHET, 2010), les SIG (Système d'Information Géographique) sont mobilisables (CERTU, 2002). Dans le tableau nous notons des différences entre trois types de distance calculés. (Cf Tableau 102).

Source CERTU

Tableau 102 : variation des distances en fonction des modes de calcul.

MODE	Nombre	Durée en minutes	Distance « vol d'oiseau » en km	Distance parcourue avec la méthode « plus court chemin en distance » en km	Distance parcourue avec la méthode « plus court chemin en coût généralisé à vide » en km
VP conducteur et passager	1 100 793	17,6	5,8	6,7	7,4
TCU	191 215	30,1	4,8	6,2	6,2
Autres TC	17 602	29,4	6,6	7,5	7,9
Vélo	36 396	14,7	2,4	3,0	3,0
Deux-roues à moteur	21 251	15,6	5,2	6,0	6,6
Autres	12 293	25,1	7,4	8,5	9,5
Ensemble	1 588 680	18,9	5,0	5,8	6,3

Source : CERTU

1. La distance à vol d'oiseau ou portées sont les plus faibles. Elle reflète la distance moyenne entre les lieux d'intérêt qu'un individu moyen a parcouru. C'est périmètre spatial du déplacement (MILLION, 2015) (Cf équation 60).

$$\text{Distance (zone fine A à zone fine B)} = ((X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2)^{1/2} \text{ (60)}$$

2. La distance en plus court chemin. On calcule le plus court chemin d'accès aux réseaux de l'utilisateur.
3. La distance en plus court chemin en coûts généralisés. Les modèles de prévision de trafic (modèle 4 étapes) basés sur les coûts généralisés informent sur les distances et les différents temps de trajet. Le calcul intègre les hypothèses de vitesses de circulation intrinsèques aux modèles.

Des coefficients de 1.1 à 1.5, rapprochent la portée de la distance réticulaire parcourue selon les modes. Si elle est supérieure à 1 KM nous avons pour la VP (CERTU, 2002) (Cf equation 61) :

$$\mathbf{Dist}_t = \mathbf{DVO}_t \times \mathbf{1.4} \quad \mathbf{(61)}$$

Source CERTU

Pour le TC. (Cf Equation 62)

$$\mathbf{Dist}_t = \mathbf{DVO}_t \times \mathbf{1.5} \quad \mathbf{(62)}$$

Source CERTU

Si la distance est inférieure à 1km alors (Cf Equation 63) :

$$\mathbf{D} = \mathbf{(2, 2 - 0, 72D_{vo}) D_{vo}} \quad \mathbf{(63)}$$

Source Bonin Lemssougueri

Le trajet effectué pour rejoindre entre deux points en empruntant deux côtés définit la distance de Manhattan. Le rapport entre la distance euclidienne et de Manhattan au sein d'une maille carré explique le facteur de correction, de l'ordre de 1,4 (BONIN & LEMSSOUGUER, 2012). Les coefficients de correction dépendent de l'aire urbaine étudiée (CERTU, 2002) et de la méthode de mesure. Pour l'EGT, le coefficient utilisé est de 1,3. C'est le rapport existant entre les modèles et la distance cartographique.

Cette distance est rectilinéaire (NICOLAS & Al, 2001). La portée se situe entre les centroïdes des deux zones concernées. Ils représentent les barycentres des trafics reçus en plusieurs points des zones. La portée entre l'origine et la destination « réelle » du voyageur n'est donc pas calculée. Il conviendrait d'ajouter les distances de parcours entre le centroïde et le lieu de destination finale impliquant de tenir compte de la maille choisie. Trois méthodes existent :

1. Leur valeur est nulle (INSEE).
2. La valeur est fixe (MASSOT & ROY, 2004) (CERTU, 2002).
3. La valeur est calculée à partir du rayon de la commune, ce dernier étant apprécié à partir de sa surface en considérant chaque commune comme un cercle (AGUILERA & MIGNOT, Etalement urbain et mobilité., 2003).

Dans plusieurs aires urbaines françaises une relation linéaire entre la distance intra-communale et le rayon de la commune est notée (MERCIER, 2008) (Equation 64):

$$\mathbf{Distance\ intra-communale} = \mathbf{0,44 + 0,58 * rayon\ de\ la\ commune} \quad \mathbf{(64)}$$

Source : Mercier

La surface de la commune est alors un cercle accolé au coefficient 0,58 ($D = 0.44 + 0,58 \sqrt{S/\pi}$).

Nous supposons que ces erreurs n'entravent pas la tendance. Entre 1975-2008, les portées augmentent dans les couronnes de la région parisienne sauf dans la dernière période. Cette tendance concerne tous les motifs de déplacement entre 1975-2001 (Cf Tableau 103)

Tableau 103 : portées

RESIDENCE	1976	1983	1991	1997	2001*	2010
Paris	4,6	4,9	5,2	4,9	5,3	5,3
Petite Couronne	5,5	5,7	6	5,6	5,9	5,9
Grande Couronne	7,2	7,6	8,1	8,1	8,4	8,2
Ensemble	6	6,4	6,8	6,7	7,0	7,0

Source : EGT 2010

Ensuite, celle des loisirs baissent ceux des « achats » sont stables. Les portées des motifs obligés croissent. Les motifs domicile travail et affaires professionnelles ont les plus longues portées. Elles varient selon les catégories socio professionnelles. Les cadres vont plus loin que les ouvriers (BERGER, 2004) (ENMV, 2020) (Cf Tableau 104).

Tableau 104 : portée et motifs

MOTIF	1976	1983	1991	1997	2001*	2010
Domicile-travail	7,9	8,6	9,8	10,2	10,6	11,3
Affaires professionnelles	7,1	7,5	8,4	8,5	8,7	9,4
Enseignement	4,3	5	5,4	5,7	5,3	5,7
Loisirs	5,2	5,2	5,3	5,7	6,3	5,9
Autres	3,9	4,4	4,7	4	4,1	4,1
Ensemble	6	6,4	6,8	6,7	7,0	7,0

Source : EGT 2010

Entre 1975-2001, les portées des actifs augmentent dans Paris et la grande couronne (Cf Tableau 105)

Tableau 105: portées actifs VP Km				
Années	1975	1982	1990	2001
Paris	5,7	5,8	6,2	6,9
Petite Couronne	5,2	5,4	5,8	6
Grande Couronne	6,8	7	7,6	8,4

Source : Bertrand

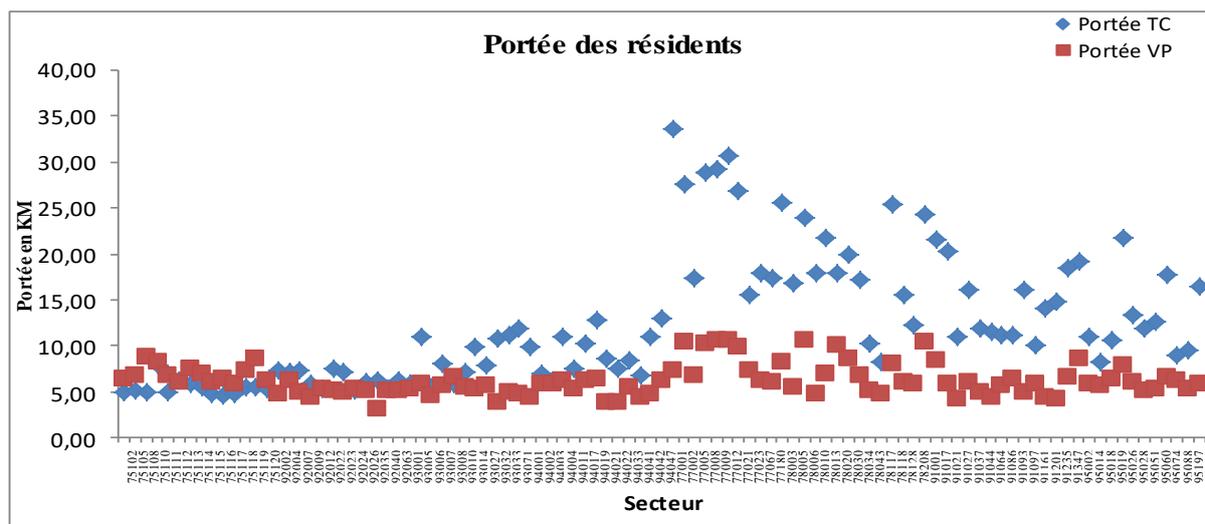
Pour les retraités nous constatons la même chose avec des portées plus réduites (Cf Tableau 106)

Tableau 106: portées retraités VP Km				
Années	1975	1982	1990	2001
Paris	5,2	6	6,3	6,4
Petite Couronne	4,3	4,3	4,9	4,1
Grande Couronne	5,4	5,2	5	5,7

Source : Bertrand

Dans les secteurs, les différences des portées du TC et de la VP, à Paris et en première couronne, sont faibles et plus fortes en seconde. Les portées VP sont stables vis-à-vis du TC (Cf Graphique 44)

Graphique 44: portées des résidents.



Source : EGT 2010

1-5-2) Les directions des déplacements.

L'origine et la destination donnent la direction du déplacement selon sept liaisons. Les TC captent les liaisons Paris-Paris, PC-PC et celle ayant pour origine ou destination Paris. La VP capte les liaisons périphériques en petite (PC-PC) et en grande couronne (GC-GC) et la liaison PC-GC. Les modes non motorisés captent les liaisons internes (Paris-Paris, PC-PC, GC-GC). (Cf Tableau 107)

Tableau 107: directions du déplacement

LIAISON	Tous modes	Total mécanisé	Transports collectifs	Voiture	Deux-roues motorisés	Vélo	Autres mécanisés	Marche
Paris <> Paris	7 995	3 172	2 195	537	144	240	55	4 823
Paris <> Petite couronne	3 007	2 914	1 963	779	112	42	19	92
Paris <> Grande couronne	1 242	1 242	901	315	22	0	5	0
PC <> PC	11 542	5 642	1 570	3 727	148	161	35	5 901
PC <> GC	2 053	2 023	595	1 358	53	14	3	30
GC <> GC	14 585	9 800	989	8 502	86	188	36	4 785
Hors Ile-de-France	254	253	57	173	5	2	15	1
Total	40 678	25 046	8 272	15 391	569	646	168	15 632

Source : EGT 2010

1-6) Les temps du déplacement.

Les temps sont les paramètres temporels du déplacement (MILLION, 2015). L'enquête les déclare sur un trajet de porte à porte arrondis sur des valeurs multiples de 5 minutes, voire 10 ou 15 minutes sur des temps plus longs (GALLEZ C. , 2000). Certaines données déclaratives sont aberrantes, ils est alors possible d'utiliser des modèles de réseaux pour calculer les budgets temps (COULOMBEL & LEURENT, 2013). Pour la VP, une matrice origine destination (DREIF) (MOTTE, 2006) les calcule à partir des vitesses de circulation relevées des réseaux. Elle renvoie des temps de trajet en heure de pointe. Néanmoins, elle est imprécise pour la grande couronne. Les valeurs des temps de trajet que ce soit par l'intermédiaire du déclaratif ou de la reconstruction par des modèles sont incertaines. (COULOMBEL & LEURENT, 2013). Pour les trajets du TC, la matrice du STIF n'est pas distribuée par commune (MOTTE, 2006).

L'exploitation sectorisée des matrices de trafic de la DREIA ou du STIF est inenvisageable pour étudier les temps des secteurs EGT. Une vérification croisée des temps avec les modèles est impossible. Les mesures de la région parisienne montrent une constante des budgets temps du transport renvoyant aux débats sur la conjecture de Zahavy développés plus loin (Cf Partie 2) (Cf Tableau 108)

Tableau 108 : temps de déplacement moyen par couronne

RESIDENCE	1976	1983	1991	1997	2001	2010
Paris	22	22	24	22	24	23
Petite Couronne	23	23	25	22	24	25
Grande Couronne	21	22	23	21	24	24
Ensemble	22	22	24	22	24	24

Source : EGT

Par motifs, les temps de déplacement aussi varient faiblement entre 1975 et 2008. Entre motifs, les temps de déplacement consacré au loisir sont les plus importants (Cf Tableau 109)

Tableau 109: budget temps par motifs.

MOTIF	1976	1983	1991	1997	2001	2010
Domicile-travail	13	12	14	13	14	14
Affaires professionnelles	10	11	11	10	11	11
Enseignement	13	12	12	12	13	12
Loisirs	17	20	21	17	20	17
Autres	11	11	12	11	12	11
Ensemble	12	12	13	12	14	12

Source : EGT

Par mode, outre la constance, la moyenne est de 31 minutes que seul le TC dépasse. (Cf Tableau 110)

Tableau 110 : budgets temps par mode

MODE	1976	1983	1991	1997	2001	2010
Transports en commun	45	43	46	44	45	48
Voiture	21	21	22	20	22	23
Deux-roues motorisés	16	17	19	19	23	22
Vélo					19	18
Autres mécanisés	48	37	34	26	30	24
Ensemble	29	28	29	27	29	31

Source : EGT 2010.

En croisant les modes et les motifs, les différences s'accroissent. La marche reste stable. (Cf Tableau 111)

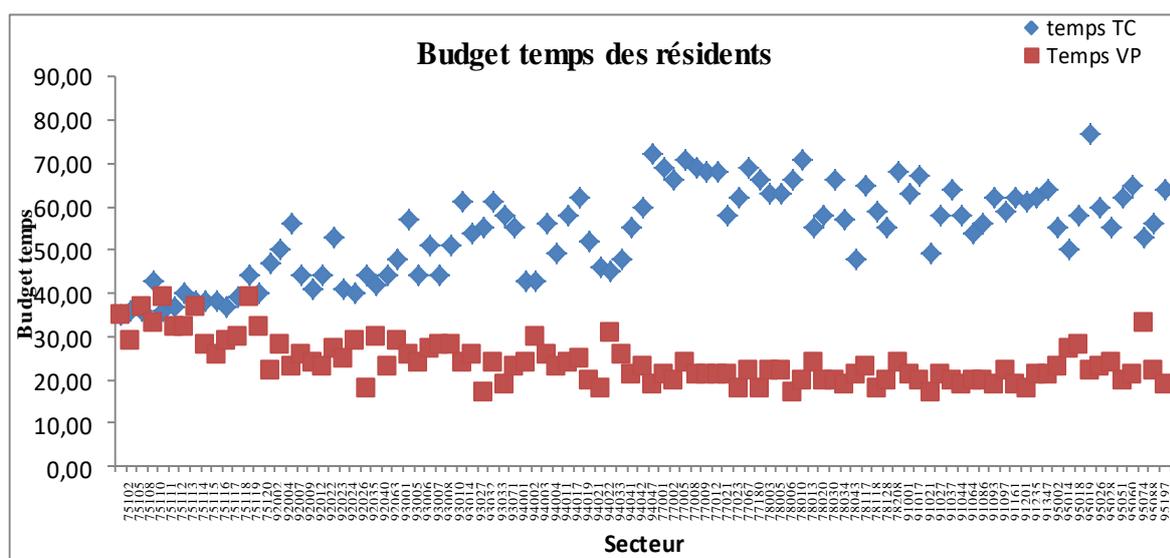
Tableau 111 : variation en fonction des motifs et des modes.

MOTIF	Tous modes	Total mécanisé	Transports collectifs	Voiture	Deux-roues motorisés	Vélo	Autres mécanisés	Marche
Domicile-Travail	40	44	58	31	25	19	32	14
Affaires professionnelles	31	40	51	35	26	20	32	11
Enseignement	22	33	42	16	20	16	29	12
Loisirs	24	29	45	22	18	22	21	17
Autres	16	20	41	16	15	13	21	11
Total	24	31	48	23	22	18	24	12

Source : EGT 2010.

Les réalités sont plus contrastées que ne le laisse supposer le découpage par couronne. Pour l'ensemble des motifs de déplacements l'avantage de la VP vis à vis du TC dépend des secteurs. Elle est plus forte en grande couronne qu'en petite ou à Paris (Cf Graphique 45)

Graphique 45: budget temps des résidents en minutes



Source : EGT 2010

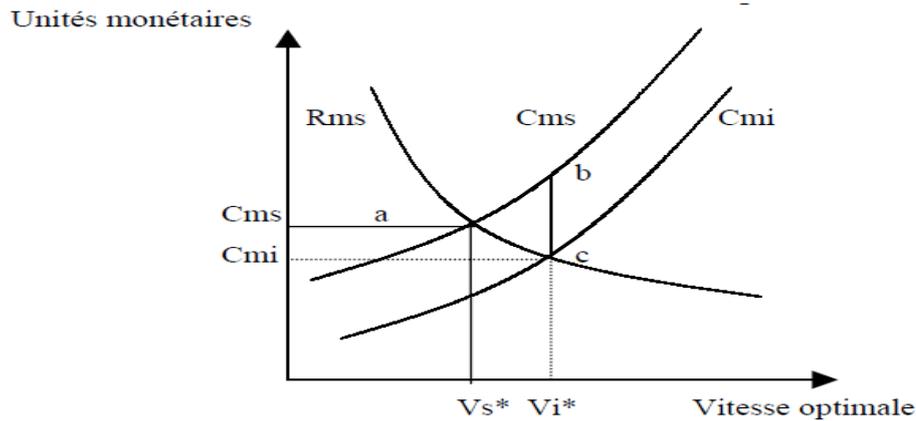
1-7) Les « pseudo-vitesses » spatiales

Les pseudo-vitesses (CGDD, 2010) sont des vitesses dérivées d'indicateurs.

1-7-1) Vitesse optimale réticulaire.

La *vitesse de circulation optimale* renvoie aux gains escomptés et aux coûts des différents types de conduite. L'égalisation du revenu marginal au coût marginal définit la vitesse optimale individuelle (V^*). Néanmoins, la conduite s'exerce dans un réseau partagé. Les interactions impliquent une distinction entre les vitesses optimales individuelle (V_i^*) et sociale (V_s^*). Des dépassements sont inévitables et impliquent des risques supplémentaires. L'usage de l'automobile produit des effets externes, pollutions sonore et atmosphérique. Entre la vitesse optimale individuelle et celle qui serait souhaitable il existe une perte, montrée par la surface des points (abc). La « vitesse souhaitable » serait celle qui les optimiserait tous. Le problème de cette approche renvoie aux hypothèses de la modélisation qui évalue un trafic constant ce qui implique un raisonnement sur les moyennes alors que l'écoulement du trafic varie ($K_s = A + BV + CV^2$). (CARNIS, 2004). (Cf Graphique 46).

Graphique 46 : vitesse optimale.



Source : Carnis.

1-7-2) Vitesse optimale sociale

La vitesse généralisée (ILLITCH, 1973) est une autre approche. Elle intègre le temps de déplacement et de travail pour créer le véhicule. Le rapport entre la distance de parcours et ce temps montre que les voitures sont moins rapides que des cyclistes et à peine plus que des piétons. Néanmoins, le temps de travail et de déplacement se substituent. Ce concept est revisité en posant que le temps généralisé (Tg) est égal au coût généralisé (Cg) sur le salaire (W) (HERAN, 2009). (Cf Tableau 112)

Tableau 112 : coûts temps et vitesse généralisé

Tableau 3 – Coût, temps et vitesse généralisé					
	Coût généralisé		Temps généralisé		Vitesse généralisée
Définition	$C_g = C_p + C_t$ $= (d \times k) + (w \times T_d)$ $= d \times (k + \frac{w}{V})$		$T_g = T_d + T_w = \frac{C_g}{w}$ $= d \times (\frac{1}{V} + \frac{k}{w})$		$V_g = \frac{d}{T_g} = \frac{d \times w}{C_g}$ $= \frac{1}{\frac{1}{V} + \frac{k}{w}}$
Conséquences	$C_g > C_p$	$C_g > C_t$	$T_g > T_d$	$T_g > T_w$	$V_g < V$
Quand d ↑	$C_g \uparrow$		$T_g \uparrow$		$V_g \rightarrow$
Quand w ↑	$C_g \uparrow$		$T_g \downarrow$		$V_g \uparrow$
Quand k ↑	$C_g \uparrow$		$T_g \uparrow$		$V_g \downarrow$
Quand V ↑	$C_g \downarrow$		$T_g \downarrow$		$V_g \uparrow$
Quand V → 0	$C_t \rightarrow \infty$	$C_g \rightarrow \infty$	$T_d \rightarrow \infty$	$T_g \rightarrow \infty$	$V_g \rightarrow 0$
Quand V → ∞	$C_t \rightarrow 0$	$C_g \rightarrow C_p$	$T_d \rightarrow 0$	$T_g \rightarrow T_w$	$V_g \rightarrow \frac{w}{k}$
avec	Cg : coût généralisé du déplacement Cp : coût privé du déplacement Ct : coût du temps de déplacement		Tg : temps généralisé du déplacement Td : temps de déplacement Tw : temps de travail pour payer le coût privé		
			Vg : vitesse généralisée		
et	V : vitesse moyenne (V = d / Td) d : distance parcourue		k : coût kilométrique w : valeur du temps ≈ salaire horaire		

Source Heran

La vitesse généralisée renvoie alors à la vitesse (V) et au rapport du coût kilométrique au salaire (K/W) Elle croît.

L'effet bénéfique de la VP dans l'accès à la vitesse n'est plus contestable (HERAN, 2009). Le coefficient K_s (fonction de coût de l'écoulement du trafic) internalise les coûts négatifs de la vitesse. La vitesse optimale sociale serait atteinte lorsque la dérivée de la vitesse généralisée est égale à zéro (Cf Equation 65).

$$V_{gs} = 1 / ((1/V) + (K_s/w)) \quad (65)$$

Source Heran

1-7-3) Vitesse de déplacement en IDF

La vitesse de déplacement est le résultat d'un ratio entre portée et temps moyen de transport (P_i = portée du parcours et T_i = Temps de parcours.) (Cf Equation 66).

$$V_i = P_i / T_i \quad (66)$$

Le temps intègre des valeurs inconnues pendant le déplacement. De plus les méthodes de calcul des portées affectent son évaluation. L'incertitude est de 6 KM/h. De plus, la dynamique du trafic conduit à l'usage de plusieurs réseaux lors du cheminement, indépendant d'une mesure cartographique ou les morphologies euclidiennes et reticulaires sont comparées (Cf Tableau 113)

Tableau 113: évaluation des distances

Mode	Nombre brut de déplacements ⁽¹⁾	Durée moyenne en minutes	Modèle		Moitié de la racine carrée de la surface de la zone		Moitié de la racine carrée de la surface bâtie de la zone	
			Longueur (km)	Vitesse (km/h)	Longueur (km)	Vitesse (km/h)	Longueur (km)	Vitesse (km/h)
Voiture	5 104	5,9	1,09	11,1	0,97	9,8	0,52	5,2
TC	63	15,3	1,04	4,1	1,04	4,0	0,53	2,1
Deux-Roues	459	7,4	1,08	8,8	1,04	8,5	0,51	4,2

Source CERTU

L'utilisateur peut faire des détours dans les réseaux et choisir un chemin plus long mais plus rapide et plus énergivore (PRUD'HOMME, 2016). Une tentative d'estimation de cette vitesse a été effectuée récemment en France (BIGO, 2020). L'heuristique de cet indicateur interroge. Sous l'hypothèse que les erreurs n'entravent pas la tendance, les vitesses augmentent avant de diminuer en 2010. Elles sont plus faibles à Paris qu'en première couronne et en deuxième. (Cf Tableau 114)

Tableau 114: vitesses individuelles par couronne					
Territoire/année	1975	1982	1991	1999	2008
Paris	6,09	7,28	7,09	7,56	6,07
1 ^{ère} couronne	8,55	9,95	10,06	10,14	8,26
2 ^{ème} couronne	14,40	16,20	17,62	18,20	15,87

Source : calcul de l'auteur

Pour les motifs de déplacement « obligés », elles sont supérieures à la moyenne (Cf Tableau 115)

Motif /Années	1975	1982	1990	1999	2008
Domicile-travail (DT)	16,9	18,2	19,5	20,8	19,5
Professionnel (P)	14,3	16,9	16,9	16,9	16,9
Enseignement (E)	7,8	10,4	10,4	10,4	10,4
Loisir (L)	10,4	10,4	10,4	14,3	11,7
Autres (A)	10,4	13	13	13	11,7

Source : calcul de l'auteur

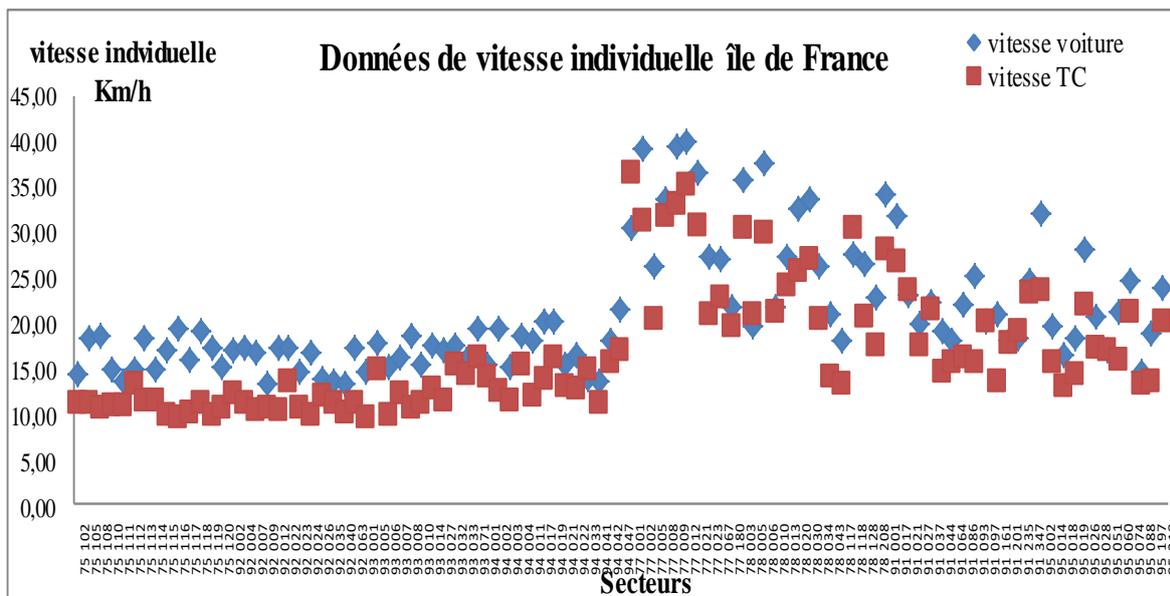
Néanmoins quelque-soit les motifs celles de la VP sont supérieures à celles du TC (Cf Tableau 116)

Mode/année	TC 2001	TC 2010	VP 2001	VP 2010
Domicile travail	17,62	18,25	25,22	25,66
Affaire professionnelles	15,29	15,25	22,14	21,17
Enseignement	13	13,2	17,68	18,04
Loisirs	12,13	12,18	24,14	20,21
Autres	10,65	11,27	19,01	19,01

Source : calcul de l'auteur

Sur les secteurs la VP est plus rapide sauf sur certains en deuxième couronne (Cf Graphique 47).

Graphique 47: données de vitesses de déplacement par secteur

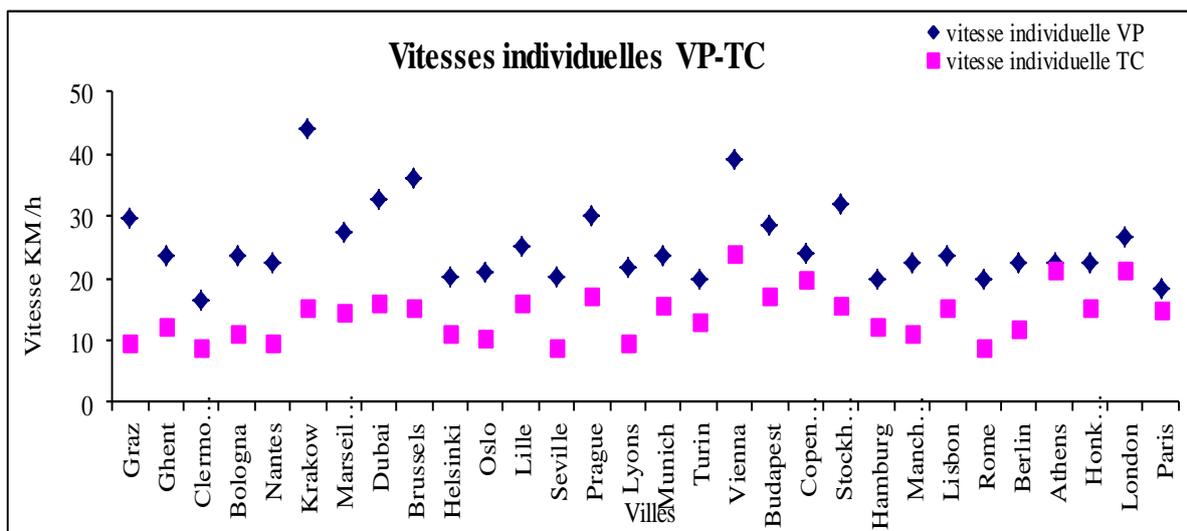


Source : calcul de l'auteur

1-8) Pseudo vitesse et vitesse de circulation où l'existence de deux espaces disjoints.

Les méthodes de l'EGT et de l'UITP calculent la vitesse de déplacement de la même manière. Celle de la VP est toujours supérieure à celle du TC. Les écarts sont forts à Cracovie, faibles à Athènes. A Paris les vitesses sont très proches (à droite). (Cf Graphique 48)

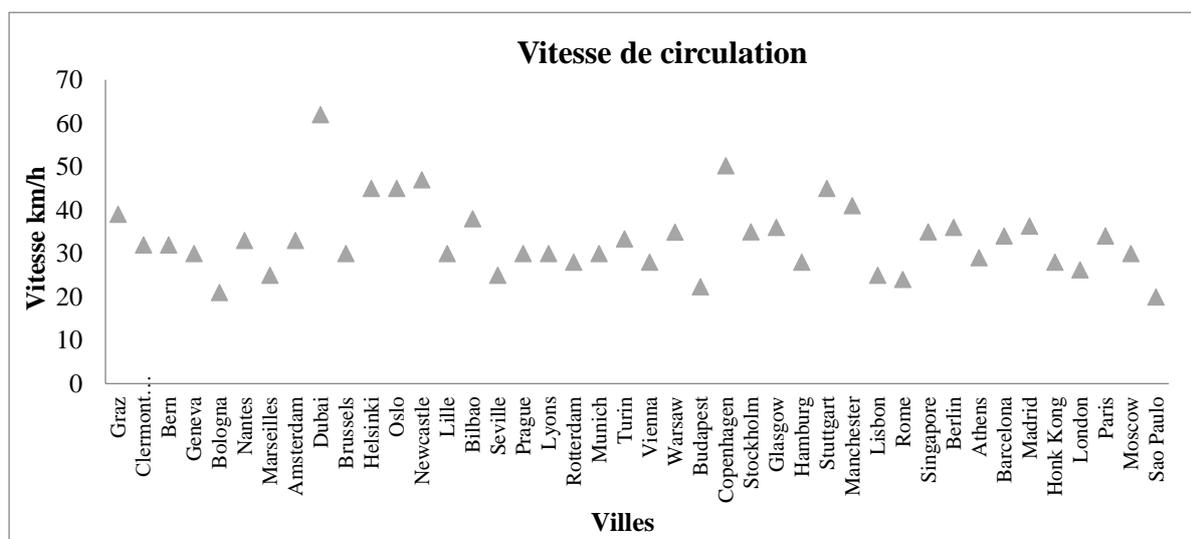
Graphique 48: vitesses de déplacement VP-TC Km/h



Source : UITP

La vitesse de circulation est la vitesse moyenne des véhicules individuels (voiture, taxi, véhicule utilitaire...) pendant l'année (24h/24, 7 jours sur 7) sur les routes mesurées. Des différences fortes apparaissent entre les métropoles malgré l'agglomération des résultats (Cf Graphique 49).

Graphique 49 : vitesse de circulation Km/h



Source : UITP

Ensuite, une autre différence plus évidente apparaît. Les vitesses dans les espaces aréolaire et réticulaire ne sont pas égales. Dans l'espace aréolaire, la quantité de déplacement mesure la mobilité d'un individu et sa portée mesure sa distance. Il habite une zone déterminée ce qui le localise spatialement. Dans l'espace réticulaire, la quantité de voyages mesure le trafic et le parcours moyen reflète la distance moyenne d'un voyage à l'intérieur d'une ligne d'un réseau. Le voyageur n'est pas localisé spatialement. Le parcours moyen n'est pas un parcours individuel, mais une distance moyenne entre deux stations selon une entrée dans une ligne ou une route.

Il ne préjuge pas des correspondances ou des détours, c'est-à-dire de la distance réalisée du voyageur à l'intérieur de l'espace réticulaire. Ces deux systèmes de mesure ne sont pas équivalents parce que les espaces ne le sont pas fonctionnellement même s'ils sont en interaction permanente. (cf Tableau 117).

Tableau 117 : mesure des flux des espaces	
Aréolaires	Réticulaires
Mobilité	Trafic
Déplacement	Voyage
Portée	Parcours moyen

Source : auteur

Ces deux espaces sont deux dimensions différentes du fonctionnement urbain qui ne peuvent être inclus l'un dans l'autre. Aussi, cette interaction permanente provoque des difficultés pour mesurer la consommation d'un habitant à grande échelle. Il existe donc une vraie difficulté à mesurer les consommations d'énergie de la mobilité urbaine d'un point de vue multiscalaire (LE NECHET, 2010). Le changement d'échelle ne provoque pas cette difficulté, c'est le fait de changer de dimension, c'est-à-dire de passer d'un espace dans un autre qui en est à l'origine.

2) La consommation par habitant comme problème.

2-1) La reconstitution des consommations par les trafics.

2-1-1) La méthode IDA.

La méthode IDA (Indice décomposition Analysis) succède à la méthode IPAT (Impact=Population× Affluence× Technology) issue des années 70 (KWON, 2005) Elle décompose en général en 5 facteurs les émissions de CO2 issues des transports. Elle ouvre à de nombreuses recherches (BIGO, 2020) non débattues ici puisque nous nous intéressons à la méthode et non à ses résultats. Néanmoins, le niveau d'agrégation des études est important (pays, région) (BIGO, 2020). La méthode ASIF évalue l'émission de gaz à effet de serre selon le secteur de transport (ALLAIRE, 2007). Les indicateurs sont désagrégés par facteur d'émission (Cf Equation 67).

$$\mathbf{G} = \mathbf{A} \times \mathbf{S}_i \times \mathbf{I}_i \times \mathbf{F}_{i,j} \quad (67)$$

Source : Allaire

G émission de gaz à effet de serre (CO2). A est l'activité de transport selon la distance parcourue des personnes ou des marchandises. S à la répartition modale (veh.km). F au carburant utilisé. L'intensité énergétique (I) des véhicules renvoie à trois facteurs (Cf Equation 68).

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{E}_i \times \mathbf{U}_i \times \mathbf{O}_i \quad (68)$$

Source : Allaire

E_i efficacité énergétique des modes i. U_i le taux de remplissage. O le coefficient opérationnel optimum issue de la qualité (vitesse) et de la quantité des infrastructures. Cette approche intègre un territoire dont on évalue la consommation et donc les émissions à partir de l'efficacité énergétique.

Néanmoins, toutes les routes ne sont pas équivalentes. Pour résoudre ce problème, l'étude d'Enerdata (ENERDATA, 2004) calcule un indice théorique de consommation spécifique issu des modèles est ajusté pour obtenir une consommation spécifique par réseaux routiers (Cf Tableau 118).

Tableau 118: consommation spécifique théorique ajustée.

l/100	ville	route	autoroute	Moyenne
essence	10,69	5,52	8,93	8,03
gazole	10,20	4,70	6,59	6,60

Source Enerdata.

La consommation unitaire est calculée à partir des taux de remplissages. La circulation routière et autoroutière est assimilée à la circulation interrégionale et régionale. Les consommations, urbaine, interrégionale et régionale sont assurées en trois étapes. Les trafics sont ventilés par aires urbaines à partir des types de réseau. Ceux de l'autoroutier et du routier, impliqués en zones urbaines sont exclus, les consommations unitaires sont les suivantes. (Cf Tableau 119)

Tableau 119: consommation unitaire par zones

gép/pkm	urbain	régional	interrégional	interurbain	moyenne
essence	54,30	16,38	25,77	19,29	33,16
gazole	50,77	15,87	21,68	18,10	31,03
total	52,52	16,14	23,49	18,69	32,09

Source Enerdata.

Il reste alors à déterminer les parcours moyens par parcs et zones (Cf Tableau 120)

Tableau 120 : circulations par parc.

Km/an/VP	Parcours moyen CCTN	Parcours moyen SOFRES	Ville SOFRES	Route SOFRES	Autoroute SOFRES
Parc essence	11400	11313	4054	5132	2127
Parc gazole	19696	18902	5062	9796	4045
Parc total	14037	13911	4395	6726	2790

Source Enerdata

Ensuite, une réallocation du trafic est mise en œuvre par aire urbaine (Cf Tableau 121)

Tableau 121 : ventilation des circulations par parc.

Gvkm	urbain	régional	interrégional	total
essence	113	59	26	198
gazole	114	54	33	200
total	227	113	59	398

Source Enerdata.

Le produit des variables (consommations unitaires x trafics x parcours moyen) permet d'obtenir le total et les consommations régionale et interrégionale. La consommation urbaine est obtenue en soustrayant le total à ces deux consommations. Pour les TC, la consommation unitaire provient des données transporteurs (SNCF RATP).

La réallocation dépend des clefs de répartition basées sur des trafics. Les calculs d'émission peuvent être alors effectués à partir des consommations (cf Tableau 122)

Tableau 122: consommation par zone

Mtep	urbain	régional	interrégional	total
essence	7,65	2,43	1,71	11,79
gazole	7,25	2,13	1,82	11,20
total	14,90	4,55	3,54	22,99

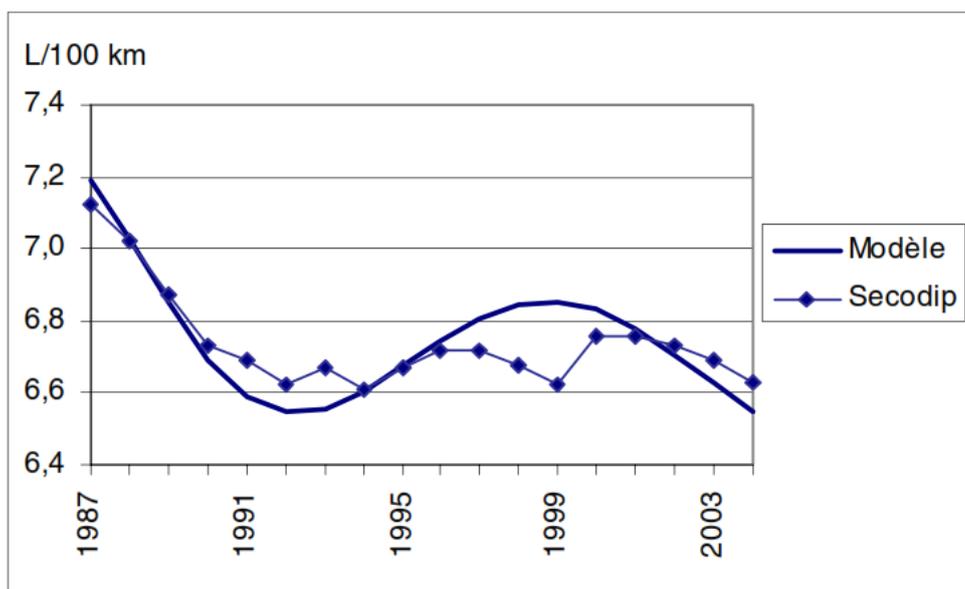
Source Enerdata.

2-1-2) Des méthodes inemployables à grande échelle

2-1-2-1) Les incertitudes de la modélisation.

Les approches exposées calculent une consommation à partir de la consommation unitaire selon des hypothèses attachées au trafic. Un ajustement est donc nécessaire pour passer d'une consommation d'énergie « par réseau » à une consommation d'énergie par unité géographique. Néanmoins, des écarts existent entre le panel SECODIP et l'évaluation des modèles (ROLIN, 2004) (Cf Graphique 50).

Graphique 50: comparaison modèle et mesures



Source Rolin 2004

De même, la RATP notait des écarts avec les travaux de l'ADEME et les consommations mesurées avec le parc auto de l'INRETS. Ils varient avec la vitesse. Il est meilleur à 25 KM/H. (Cf Tableau 123).

<i>Vitesse moyenne en km/h</i>	<i>Conso essence en kg</i>	<i>Conso essence l/100km</i>	<i>Conso essence en kep/100km</i>	<i>Conso diesel en kg</i>	<i>Conso diesel l/100km</i>	<i>Conso diesel kep/100km</i>	<i>Conso moyenne gep/km</i>	<i>Emissions moyennes en g éq CO2/km</i>	<i>Ecart par rapport à calcul ADEME</i>
15	4,1	5,32	4,21	4,08	4,69	4,17	83,80	297,92	19%
20	3,7	4,81	3,80	3,79	4,36	3,88	76,73	272,74	12%
25	3,37	4,38	3,46	3,53	4,06	3,61	70,69	251,22	4%
50	2,17	2,82	2,23	2,6	2,99	2,66	48,86	173,51	-39%

Source RATP

Les données de base des modèles sont incertaines. Dans les simulations, les écarts selon les hypothèses dans la consommation varient sur les voitures essence et diesel (ANDRE & al., 2015). Si le logiciel IMPACT donne une mesure de consommation sur l'aire choisi par l'utilisateur selon ses hypothèses de trafics réticulaires (ADEME, 2003), elle ne renvoie pas à l'efficacité énergétique. De plus les données de parcs ou de circulation (vitesse, trafic...) seraient à fournir depuis 1975 mais elles indisponibles pour les secteurs EGT. Il est compliqué d'entamer une étude sans données. Enfin 37000 tronçons situés dans des milieux urbains ou ruraux sont numérisés dans le modèle de l'IFFSTAR (ANDRE & al, 2014). Spatialement, les tronçons intègrent des zones qui correspondraient aux secteurs EGT. Néanmoins, un tronçon, c'est-à-dire une part de ligne, ne correspond pas à un secteur soit une surface qui regroupe un ensemble de tronçons.

2-1-2-2) Des espaces réticulaire et aréolaire non fongibles à grande échelle.

Le mot *échelle*, *scala* en latin, désigne un objet formé de deux montants de bois agrémentés de barreaux qui constituent autant de marches (LACOSTE, 2012). En sciences sociales, différents courants scientifiques emploient la notion d'effet d'échelle (économie architecture, physique des matériaux, sociologie etc..). Elle touche le temps (échelle annuelle, mensuelle etc..) et l'espace (micro spatial, mésospatiale etc...). Une échelle mesure le rapport entre un objet réel et sa représentation (carte géographique, maquette, etc.). Elle est exprimée par une valeur numérique qui est généralement sous forme de fraction. Couramment employée en cartographie, une échelle est petite lorsque le rapport est 1/1 et grande lorsque le rapport est 1/100. La petite échelle renvoie à des surfaces importantes. La reconstitution des consommations dans un espace aréolaire avant l'attribution aux habitants est acceptable. Les résidents et les non-résidents d'un territoire se retrouvent dans les mêmes réseaux. Dans les modèles de trafic, nous pouvons exclure le trafic des non-résidents par une estimation comme avec l'agglomération lyonnaise (NICOLAS & al, 2001). Néanmoins, il ne s'agirait que d'une estimation. De plus, il ne concernerait que les heures de pointes et donc un motif de déplacement particuliers, en l'occurrence le trafic domicile travail, alors que les autres types impliquent aussi des consommations d'énergie (CHARME & al, 2010). A grande échelle, la consommation des résidents ne se confond pas avec celle des trafics. En IDF, les consommations TC ou VP sont réticulaires.

S'ils peuvent être attribués dans la région parisienne sous l'hypothèse de reconstituer les données de consommation des TC de l'ensemble des entreprises, leur mise en œuvre sur des échelles plus grande posent des problèmes d'adéquation et d'heuristique. Dissocier par secteurs la consommation des réseaux de TC suppose une clef de répartition basée sur un indicateur. Or cette clef posera deux problèmes vis-à-vis de l'objet recherché. Le premier est que les résultats seront influencés par nos hypothèses, le second est que la dissociation des réseaux ferrés en des unités séparées de consommation n'a pas de sens vis-à-vis du réel. Techniquement, l'électricité circule sur toute la ligne et n'est pas attribué qu'aux véhicules, l'ensemble de la ligne est concerné, non une partie. Ensuite, les données CPDP (Comite des Professionnels du Pétrole) de la VP ne permettent pas non plus une telle attribution puisqu'elles sont au point de vente, mais nous ne connaissons pas la trajectoire du véhicule ni son lieu de consommation réelle. Là encore nos clefs de répartition impliqueraient nécessairement une part d'arbitraire. Ensuite, **une voiture** passant par Paris ne signifie pas que **le parisien** l'utilise. L'espace réticulaire motorisé se distingue de l'espace d'habitation (aréolaire). Plus l'échelle est grande plus cette disjonction croît parce que les deux espaces sont différents. Aussi nous allons vers la méthode combinée du BEED (Budget Energie Environnement des Déplacements)

2-2) Pertinence et limite de l'approche combinée à grande échelle

2-2-1) La méthode.

Le BEED est un modèle de l'INRETS évalue la somme de polluant et de consommation pour un habitant (GALLEZ & HIVERT, 1998). La consommation du déplacement (Cd) est le produit de la consommation unitaire et de la portée (P) ajustée d'un coefficient selon la sinuosité du réseau (Cf Equation 69)

$$\mathbf{Cd = C_u \times P (69)}$$

Source : INRETS

Les distances intra-zone sont estimées selon un réseau de routes numérisées. Les données des consommations unitaires des TC, viennent des transporteurs (SNCF et RATP). Les trafics urbain ou interurbain peuvent être multimodaux (Bus + tramway ou voiture + TC). Les coefficients de répartition distinguent la distance de déplacement de chaque mode. Pour les TC urbains, un taux de remplissage moyen révisable égal à 13 voyageurs par véhicule a été intégré. (Cf Tableau 124)

Tableau 124 : Consommation unitaire de référence gep/ Voy Km	
Mode	Consommations unitaires
Marche à pied	0
2 roues < 50 cm ³	18
2 roues >50 cm ³	35
VU	100
Autobus urbain	26
Car interurbain	22
Transport emploi scolaire	20
Tramway métro	19
Train	21
Bus + métro/tramway	22,5
VP passager + TC	14,7
VP conducteur + TC	52
TCU + TCI	22

Source : INRETS

Cette méthode utilise deux coefficients dont les méthodes de calcul divergent

1. La consommation unitaire qui renvoie aux trafics et aux charges moyennes.
2. La portée issue des enquêtes de mobilité quotidienne et aux déplacements.

Elle est utilisée pour examiner les effets de la variation de la forme urbaines sur la consommation d'énergie des transports (GALLEZ C. , 1995) (FOUCHIER, 1997) (OSORIO & al, 2017).

2-2-2) Une approche individuelle.

Une limite est l'approche qu'elle suppose. En effet, c'est un individu moyen qui consomme au travers des portées. Or la portée ne résume pas la consommation d'énergie, la part modale aussi (POUYANNE, 2004). Ce modèle ne renvoie donc pas à un ensemble d'individus d'un territoire.

2-2-3) Une confusion du voyage et du déplacement.

2-2-3-1) Les chaînages des voyages

Un voyage est égal à un déplacement pour les VP en milieu urbain ; l'individu emprunte plusieurs réseaux dans un seul véhicule : seules les portées varient. Néanmoins, dans les réseaux routiers d'un territoire, un véhicule peut être mesuré dans plusieurs réseaux, soit plusieurs voyages dans des routes différentes, pour un déplacement du conducteur. Dans le mode TC 2/3 des déplacements sont « chaînés » (EGT, 2010). L'utilisateur utilise plusieurs « modes » bus métro tramway à l'intérieur d'un même mode le TC. Dans le réseau, il existe des « nœuds » ou des points où le changement de direction est possible impliquant des interconnexions (COQUIO, 2008) (Cf Tableau 125)

Tableau 125 : typologie des interconnexions

	Changement de réseau	Changement de véhicule	Changement de réseau partiel
Intra-connexion indirecte	NON	OUI	OUI ou NON
Intra-connexion directe	NON	NON	OUI
Inter-connexion indirecte	OUI	OUI	OUI
Inter-connexion directe	OUI	NON	OUI

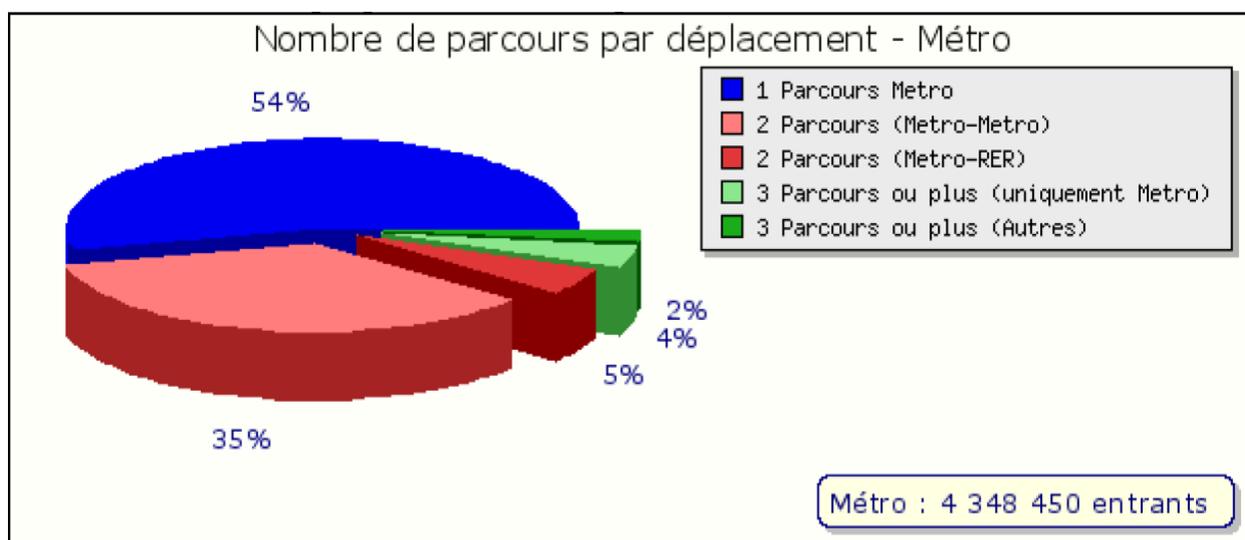
tableau 2 Typologie des connexions'

Source : Coquio d'après Chapelon.

1. L'intra-connexion directe n'implique pas de changement de véhicule.
2. L'intra-connexion indirecte implique un changement de véhicule
3. L'interconnexion directe implique un changement de réseau pas de véhicule
4. L'interconnexion indirecte implique un changement de véhicule et de réseau.

Les connexions indirectes sont liées au TC, puisque la modification de la direction implique un changement de véhicule. Deux formes les reflètent dans le trafic du métro non chaîné (1 parcours) 54% et chaîné 46% (Cf Graphique 51).

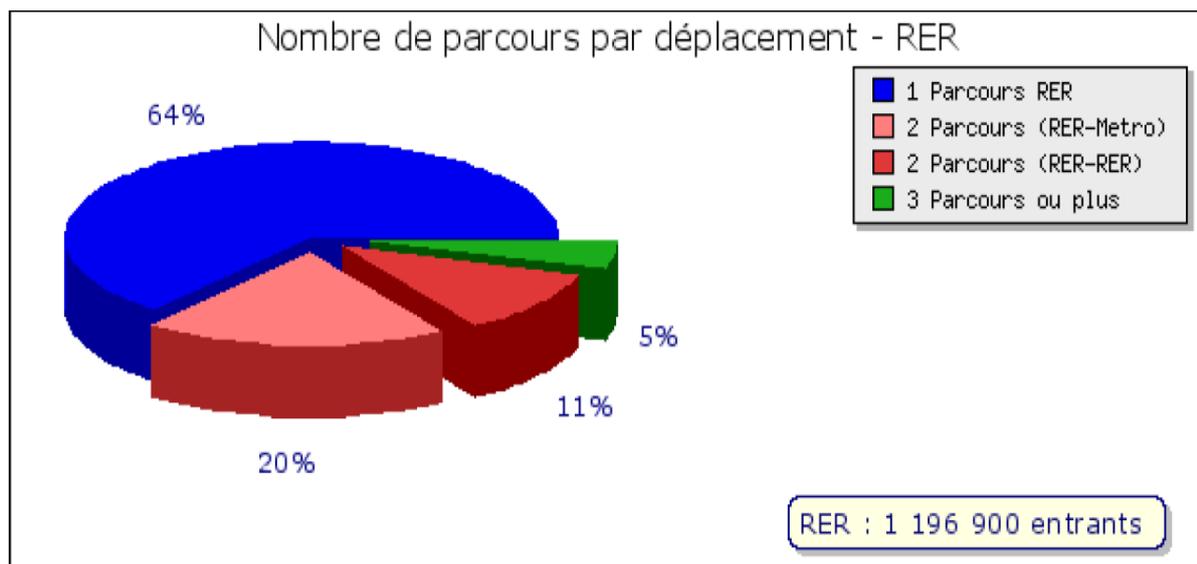
Graphique 51 : nombre de parcours dans le métro.



Source : RATP

Dans le réseau ferré, 7% du trafic du métro provient du RER. Pour le RER, le trafic non chaîné est de 64% contre 36% (Cf Graphique 52)

Graphique 52: nombre de parcours dans le RER



Source RATP : TJRF 2008

Les autres modes renvoient à des correspondances. Le correspondant est le voyageur changeant de véhicule et de direction dans un réseau. La correspondance est une « intra connexion indirecte » qui produit un trafic chaîné modal. Les voyages sont donc de 2 types, « non chaîné », un seul mode et véhicule pris, et « chaînés » avec différents chaînages

1. Modaux trafic d'un mode avec changement de véhicule (métro-métro...),
2. Intramodaux trafic d'un mode avec un changement de véhicule et de réseau : (RER- métro, bus métro...)
3. Intermodaux avec un changement de mode (voiture-métro...)

Les « déplacements chaînés » modaux et intra-modaux, n'existent pas pour la VP. En journée, dans le réseau ferré RATP, la moitié des voyageurs n'utilisent qu'une ligne (56%), 38% des voyageurs effectuent une correspondance (deux parcours) et 6% deux correspondances ou plus (Cf Tableau 126)

Mode	1 Parcours	2 Parcours	3 Parcours ou +
Entrants Métro	54%	40%	6%
Entrants RER	64%	31%	5%
Réseau Ferré	56%	38%	6%

Source RATP : TJRF 2008

Les liaisons quai à quai ou la superposition verticale des lignes minimisent les temps de rupture. Des escaliers mécaniques, des ascenseurs, des trottoirs hectométriques, les diminuent (Châtelet). Pour le réseau ferré parisien, les correspondances sont données selon les lignes. Leur part va de 50% à 73% ce qui n'est pas négligeable dans l'usage. Pour un trafic entrant, si l'utilisateur effectue une correspondance il produit deux trafics dans deux lignes différentes. Ce trafic supplémentaire vient de la morphologie réticulaire et sont comptés dans la charge moyenne. S'il existait 14 lignes de 14 entreprises différentes dans le métro faisant payer un ticket à l'entrée, la notion d'utilisateur disparaîtrait et ferait place, dans les statistiques de chaque entreprise, à un trafic entrant.

Dans le réseau, les utilisateurs des lignes seront comptés à chaque fois selon leur parcours. (Cf Tableau 127) :

Tableau 127: utilisation ligne			
Lignes	Entrants (E)	Correspondants	Utilisations (U)
1	484 900	227 150	712 050
2	269 850	196 100	465 950
3	295 800	150 850	446 650
4	441 900	236 500	678 400
5	293 000	150 650	443 650
6	285 800	261 450	547 250
7	381 300	172 900	554 200
8	295 700	143 050	438 750
9	384 800	160 500	545 300
10	136 750	74 500	211 250
11	139 650	88 250	227 900
12	275 500	105 600	381 100
13	139 150	118 650	257 800
14	239 150	118 650	257800

Source : RATP

Le rabattement est « l'interconnexion indirecte » des modes dans le déplacement. Le trafic est chaîné intra-modal et intermodal. La complémentarité intra-modale TC-TC a fait l'objet d'une tentative de modélisation (STRANSKY, 2008). Une hiérarchie des modes apparaît selon les capacités et les vitesses (Cf figure 21).

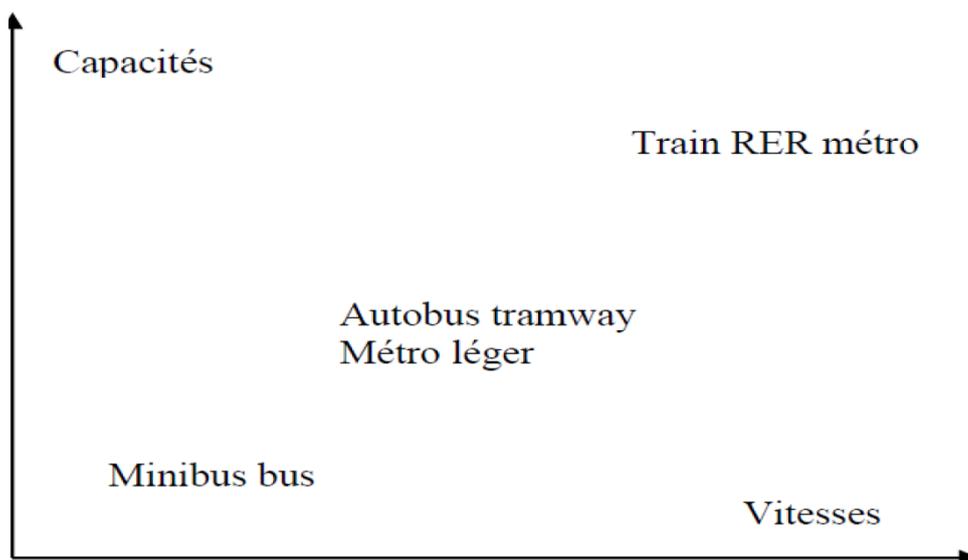


Figure 21 : Hiérarchie des modes.

Source auteur

Cette logique s'applique dans un milieu faiblement dense en IDF (DE LA MORSANGLIERE, 1982). L'offre de TC, de modes divers (Autobus, tramway métro RER), est l'épine dorsale du système de transport par les liaisons pôle à pôle. L'objectif est que les TC apparaissent comme un « substitut » à l'automobile. Six zones apparaissent. La zone 1 est dotée d'équipement collectif. Elle implique un rabattement vers les axes lourds de TC qui desservent les autres zones et des dessertes locales.

Des taxis collectifs ou des minibus exploités par la compagnie de transport urbain desservent l'intérieur de la zone. (Cf Figure 22) :

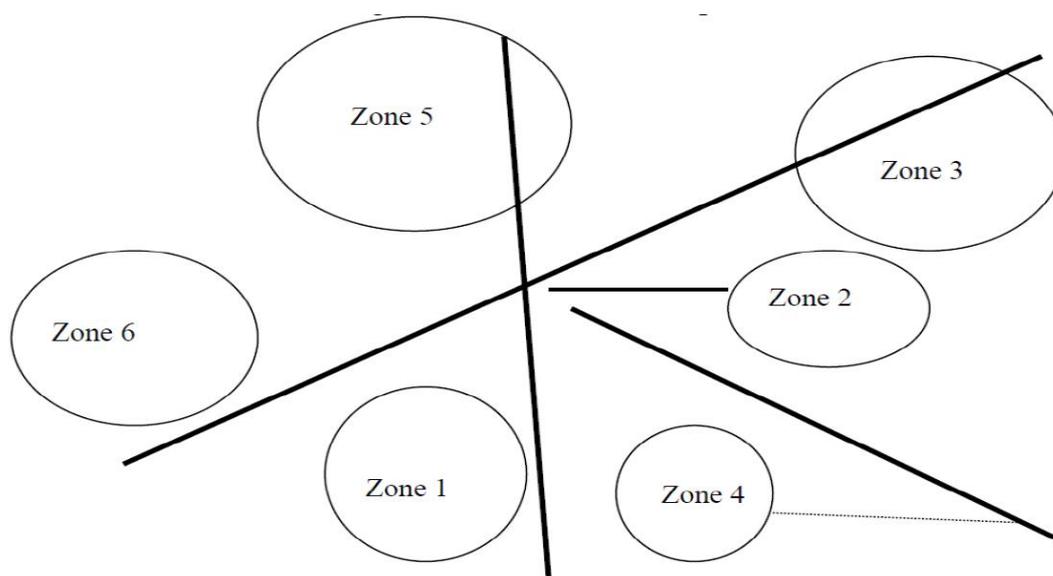


Figure 22: réseau hiérarchique.

Source de la morsanglière

Une variation des capacités des modes est prévue en heures creuses. La zone 2 implique une desserte directe en centre-ville. Cette zone est l'habitat privilégié des couches moyennes habitant déjà les résidences. Des services différenciés sont prévus. La zone 3 est constituée de petits collectifs urbains près d'anciens bourgs ruraux disposant d'équipements. Les rabattements sur les axes TC avec une desserte locale permet l'accès. La zone 4 est diffuse et dépourvue d'équipement d'où le rabattement sur les axes lourds. Les zones 5 et 6 sont des zones de densité et d'habitats hétérogènes ne disposant pas d'équipements, aussi faut-il prévoir la priorité sur les axes lourds. Ce schéma vise à compenser les éventuels manques d'équipement des villes nouvelles avec la mobilité. En effet, les zones pourvues d'une desserte locale sont celles qui sont dotées d'équipements scolaires par exemple. Le rabattement intermodal renvoie à la jonction de deux modes différents (TC et VP etc ...). Certains transporteurs voient alors une opportunité dans le développement du covoiturage afin de rabattre des voyageurs dans leur réseau ou pour compenser un manque de capacité (DELAUNAY, 2019). Néanmoins, la faiblesse des rabattements intermodaux dans les réseaux RATP 1% pour le métro et 4,5% pour le RER ne plaide pas pour cette option, outre la faiblesse actuelle du covoiturage et l'incapacité à mesurer réellement ses volumes (ADEME, 2015). L'intermodalité VP-TC tout comme le covoiturage présente de réelles difficultés de mise en œuvre.

2-2-3-2) Confusion du déplacement et du voyage dans l'évaluation de la consommation unitaire.

L'individu emprunte plusieurs modes du même mode « transport collectif ». Si nous reprenons le BEED, les consommations unitaires sont de 19gep/Km et 26 pour l'autobus. Le 22.5 est la moitié de 26+19. (Cf Tableau 128)

Tableau 128 : déplacement chaîné BEED.	
Bus + métro/tramway	22,5
VP passager + TC	14,7
VP conducteur + TC	52
TCU + TCI	22

Source RATP : BEED

Néanmoins, ce résultat ne s'obtient que si la charge moyenne du métro compense sa consommation spécifique qui est plus élevée que celle de l'autobus. De plus, un « déplacement chaîné » est unique seules les portées de chaque mode changent. En effet, nous avons (Cf Equation 70).

$$C_{ud} = 19 \times P_1 + 26 \times P_2 \quad (70)$$

Soit $P = P_1 + P_2$ ou portée des voyages des modes 1 et 2. Avec $P = 5$ on a $22,5 \times 5 = 19 \times P_1 + 26 \times P_2$ soit $19 \times P_1 + 26 \times (5 - P_1) = 22,5 \times 5$. P_1 n'a qu'une solution, la moitié, ce qui n'est pas très réaliste. Dans la réalité, l'individu prend deux modes et pas un. Avec le BEED, si l'individu fait deux parcours pour une portée moyenne de 4 kilomètres dans deux lignes avec une consommation unitaire moyenne de 2,5 Mj/Km la consommation renverra à 10 MJ. Néanmoins, s'il emprunte deux lignes avec une portée de 3 Km avec une consommation unitaire de 4 Mj/Km dans la première et de 1 Km consommation unitaire de 1 Mj/Km dans la seconde cela fera 13 et non 10 alors que les portées et les consommations unitaires moyennes sont les mêmes. Ce n'est pas le cas du TC dont 2/3 des déplacements sont « chaînés ». L'absence de disjonction des notions de voyage et de déplacement explique ce hiatus et rend la mesure parfaitement arbitraire.

Ces chaînes montrent une variation dans le cheminement individuel pour réaliser sa distance de déplacement et donc sa portée. Dans le déplacement chaîné, le premier voyage n'atteint pas la destination. S'il y a trois voyages dans le même déplacement, alors au moins un n'a ni origine ni destination. S'ils en font deux, alors il y aura deux voyages, mais un déplacement pour les EGT. Aussi le déplacement peut combiner plusieurs voyages dans un motif, en empruntant plusieurs modes. Dans le TC, par les déplacements chaînés, le nombre de voyages excède celui des déplacements.

2-3) Vers une extension de la méthode.

Le calcul du BEED repose sur le produit d'une consommation unitaire et d'une portée. La première vient aux trafics l'autre vient de la mobilité. Les mesures n'ont pas les mêmes méthodes, ni les mêmes périmètres. Néanmoins, la consommation unitaire dépend de l'ensemble des circulations des réseaux le lieu de résidence ne change rien. Elle peut être considérée comme uniforme dans l'espace réticulaire même si elle peut varier selon les espaces et les heures.

Pour les TC, les voyageurs (résidents ou non) sont dans le même véhicule, dans les réseaux routiers les circulations sont interdépendantes (ENAULT, 2003). Les consommations unitaires des résidents et des non-résidents sont égales. Elle peut alors être attribuée aux habitants voire aux territoires concernés ce qui ouvre à une approche combinée, de deux espaces différents réticulaire et aréolaire. Elle se distingue selon les motifs de déplacement sous la réserve de connaître la consommation unitaire du motif et sa portée propre. Elle est multi-échelle sous l'hypothèse de connaître les portées de l'habitant de la zone. Cette méthode qui combine deux espaces structurellement différents est donc adaptée quelque-soit les échelles pour mesurer la consommation par habitant. Néanmoins deux problèmes existent :

Ajouter ces consommations individuelles par zone ne renverrait pas à une efficacité. En effet, l'additivité des déplacements de l'ensemble des habitants d'un secteur conduit à une consommation pas à une efficacité. De même, ajouter ces déplacements pour en déduire la consommation des habitants suppose qu'un déplacement est égal à un voyage. Mais les mesures de fonctionnement de chacun des espaces le démentent, impliquant alors une différence objective des deux espaces. Aussi, accumuler les déplacements, sous l'hypothèse qu'un déplacement est égal à un voyage, conduit à une mesure en volume beaucoup plus fautive qu'une mesure individuelle. Il faut donc une mesure qui, tout en incluant l'aspect collectif d'un territoire, évite d'accroître les erreurs de mesures due à la dissociation des deux espaces tout en mesurant l'efficacité énergétique. Or, individuellement, un voyage est toujours égal à un déplacement puisque c'est la perception de l'individu qui franchit des distances. Il nous faut donc garder l'élément unitaire du déplacement et se diriger vers une moyenne selon les secteurs.

Le BEED calcule une consommation d'un déplacement individuel, avec une efficacité réticulaire donnée, en l'identifiant au voyage grâce à la portée. Aussi, le problème de méthode du BEED ne vient pas du cumul des efficacités énergétiques pour estimer ce type de déplacement mais du fait qu'il assimile un voyage à un déplacement pour le TC. Or ces déplacements sont minoritaires dans le TC puisque 2/3 des voyages sont chaînés. Il s'agit donc d'étendre la méthode pour répondre à nos problèmes de mesure tout en préservant l'heuristique de la démarche.

3) Conclusion.

Les déplacements mesurent la mobilité quotidienne des EGT. Ils ont un motif, et des déterminants temporel (les parts modales, le temps de transport) et spatiaux (les portées pseudo vitesse). Les parts modales utilisées sont les parts de marchés des modes. Une spécialisation du TC apparaît avec le motif domicile travail. Les abonnements traduisent alors une décision d'investissement dans ce mode. Au contraire, la VP n'apparaît pas spécialisé. Les portées du déplacement sont des distances euclidiennes. Elles ne mesurent pas la distance « réellement » parcourue individuellement. En reliant deux centroïdes, elle néglige les terminaisons du déplacement. En étant droite, elle néglige la morphologie du réseau parcouru et le parcours du voyageur dans la réalisation de son déplacement. Le coefficient de sinuosité est donc incertain. Les temps de déplacement mesurent le temps de parcours en porte à porte. Les temps passés dans les réseaux est inconnu. L'évolution vérifie leur stabilité mais ils varient selon les secteurs. La pseudo vitesse qui est le rapport entre la portée et le temps interroge en tant qu'indicateur et ne renvoie pas à la vitesse de circulation réticulaire. Il existe donc deux espaces séparés en interaction dissocié dans leur fonctionnement l'espace des flux et l'espace statique.

Cette séparation fonctionnelle implique des difficultés de mesure à grande échelle. Elle invalide alors les approches réticulaires c'est-à-dire l'usage de l'efficacité énergétique et du voyage pour déterminer une consommation des habitants ou des territoires. Outre les difficultés intrinsèques de la modélisation, selon les zones territoriales choisies, la part de ceux qui ne résident pas dans le territoire mais qui y passent varie. Les trafics ne renvoient pas à la mobilité des habitants. A grande échelle, évaluer la consommation des habitants ou d'un territoire à partir de trafics n'a pas de sens. Nous entrons alors dans une démarche combinée.

L'intérêt de la méthode du BEED pour mesurer la consommation des secteurs EGT est qu'elle est combinée articulant deux espaces, réticulaire et aréolaire, séparés. Son avantage est de s'intéresser à un individu (habitant ou non), mais elle est limitée. Une confusion existe entre voyage et déplacement. Pour le TC, nous montrons qu'un déplacement est égal à un voyage que s'il n'existe pas de chaînage (correspondance, intermodalité) du voyage. La mesure de l'efficacité énergétique des déplacements à voyage chaîné interroge. De plus l'approche individuelle ne renvoie pas à une approche collective des territoires ou des habitants dont les comportements varient. Aussi l'objectif est d'étendre la méthode afin d'évaluer l'efficacité énergétique d'un habitant à partir des données de mobilité selon une méthode combinée. Cette méthode étant alors applicable dans les secteurs.

Chapitre 4 Efficacité énergétique spatiale des habitants et des territoires et convergence dans les secteurs.

Introduction ;

Notre cheminement nous conduit à évaluer deux éléments.

Le premier est celui issu de notre section précédente. Nous avons montré qu'il existait une convergence plus ou moins prononcée sur les secteurs et dans les couronnes selon les efficacités énergétiques des réseaux. Néanmoins, ces efficacités concernent le voyageur et non l'habitant.

Le chapitre précédent montre que le calcul des consommations par habitant à grande échelle est un sujet à part entière. En effet, un voyageur n'est pas un habitant, un voyage n'est pas un déplacement. Le premier est intégré dans un espace réticulaire, le second dans un espace aréolaire. La mobilité et le voyage sont dérivés de l'interaction de ces deux espaces dans l'accomplissement du déplacement et du voyage. Si à petite échelle, les deux peuvent être confondus ce n'est pas le cas à grande échelle. Aussi, il nous faut déterminer un indicateur de mesure qui puisse évaluer l'efficacité énergétique à grande échelle d'un territoire ou d'un habitant.

Notre indicateur doit être comparable à d'autres sur leur échelle de référence. Or la base UITP a construit un indicateur de consommation par habitant sur une petite échelle nous pouvons donc faire cette comparaison entre notre approche et celle de la base sur son échelle de référence. Notre objectif étant de vérifier que les variations de mesure sont similaires. En effet, si l'indicateur a les mêmes variations, alors il montre les mêmes différences entre les territoires même s'il ne montre pas les mêmes valeurs. A partir de cet élément de vérification, nous pouvons alors décliner cet indicateur sur les secteurs EGT afin d'analyser les variations que nous constaterons. Aussi nous pouvons à partir de notre méthode évaluer sur la période l'effet de la variation de la compétitivité des modes au regard de l'évolution de la consommation par déplacement selon les mailles que nous avons défini lors de nos précédents travaux.

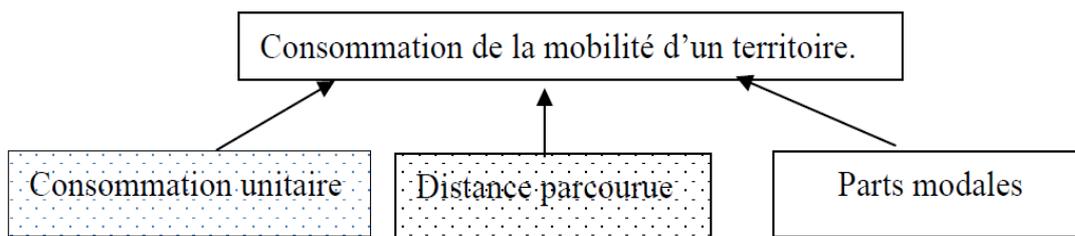
Notre chapitre est organisé en trois parties :

1. Nous définissons nos indicateurs consommation par habitants et par déplacement et le déclinons sur les secteurs EGT.
2. Nous observons la variation de l'indicateur due au chaînage pour le TC.
3. Nous déclinons nos indicateurs selon les motifs, les jours, les mobilités des secteurs et l'effet de la convergence.

1) Consommation du déplacement d'un habitant ou du territoire : une proposition

1-1) Consommation d'un habitant

En identifiant un déplacement à un voyage, le BEED passe d'une mesure réticulaire à une mesure aréolaire pour un individu (en pointillé). Néanmoins, la consommation des habitants d'une zone dépend aussi des parts modales (POUYANNE, 2004) en termes de volume. Ces parts font aussi la transition en termes d'efficacité énergétique des habitants des secteurs puisqu'elles peuvent être ramenées à l'unité. En effet, elles renvoient à un élément collectif de choix modal, elles complètent les portées qui elles renvoient à un individu moyen (Cf figure 23).



Source : Auteur + Pouyanne. La méthode du BEED est donnée en pointillée.

Figure 23: consommation de la mobilité d'un résident d'un territoire

Or, pour 2 déplacements d'un résident et d'un non-résident d'une même portée (Cf Equation 71).

$$C_u = 2 \times C_u \times P \quad (71)$$

Source : Calcul de l'auteur

C_u = consommation unitaire des deux modes. P = portée. Si les modes sont différents (Cf Equation 72).

$$C_u / 2 = 1 \times C_{utc} \times P_{m\ tc} + 1 \times C_{u\ vp} \times P_{m\ vp} / 2 \quad (72)$$

Source : Calcul de l'auteur

Nous posons alors pour l'ensemble des déplacements (Cf Equation 73).

$$C_d = \alpha_{tc} \times C_{utc} \times P_{m\ tc} + \alpha_{vp} \times C_{u\ vp} \times P_{m\ vp} + \alpha_{Dr} \times C_{udr} \times P_{m\ dr} + \alpha_m \times C_{um} \times P_{m\ m} + \dots \quad (73)$$

Source : auteur

C_d = consommation unitaire un déplacement α = part modale $P_{m\ tc}$ = Portée. L'équation traduit un flux aréolaire. Cet indicateur est multi-scalaire puisqu'il n'a qu'une dimension. Les modes non motorisés, aux consommations unitaires nulles disparaissent de l'équation. A partir de la consommation par déplacement, nous pouvons calculer celle des habitants selon la mobilité du secteur. Elle intègre le volume de mobilité comme variable séparée de la consommation d'énergie par habitant (Cf Equation 74)

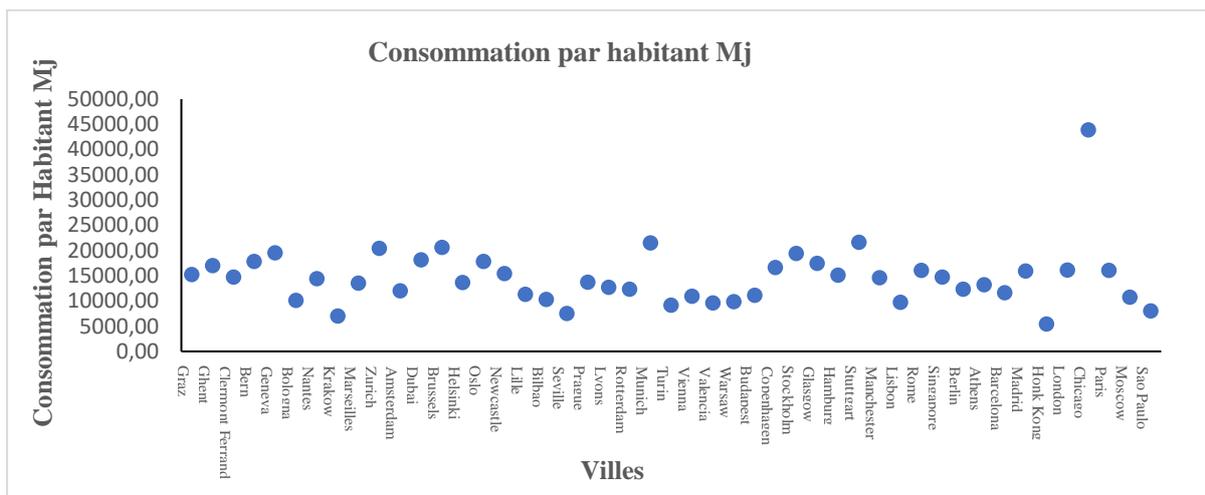
$$C_h = C_d \times N_{br} \times D_{ep} \quad (74)$$

1-2) Evaluation de l'indicateur sur la base UITP

Sans précision de notre part, les tests seront conformes à 5% c'est-à-dire H1 pour les tests T et F et H0 pour le test de white (hétéroscédasticité).

Dans la base UITP (UITP, 2001), les valeurs de consommation des habitants viennent du produit de la consommation unitaire et du nombre de passager kilomètre par habitant selon les caractéristiques territoriales de la base. Les voyageurs sont les habitants. Nous avons donc une approche à partir du réseau sur une petite échelle qui amplifie donc le nombre de variables susceptibles d'expliquer la mobilité et donc la consommation d'énergie puisque les facteurs économiques, culturels, spatiaux ou réticulaires sont différents. Deux pics extrêmes Hong Kong et Chicago apparaissent. Les autres villes sont dans l'intervalle compris entre 5000 et 25000 (Mj)/Hab. Paris avec 14600 Mj/Hab est moyenne (Cf Graphique 53).

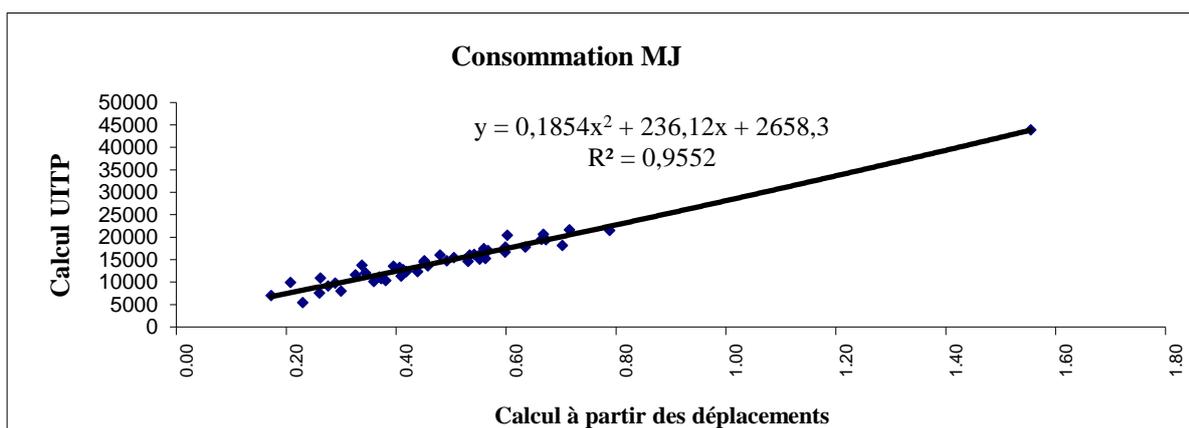
Graphique 53: les consommations unitaires/habitant



Source : UITP

La corrélation est importante entre les deux indicateurs consommations par habitant de notre approche et ceux de la base malgré la différence de méthode. Ils mesurent la même réalité. (Cf graphique 54).

Graphique 54: consommation par habitant

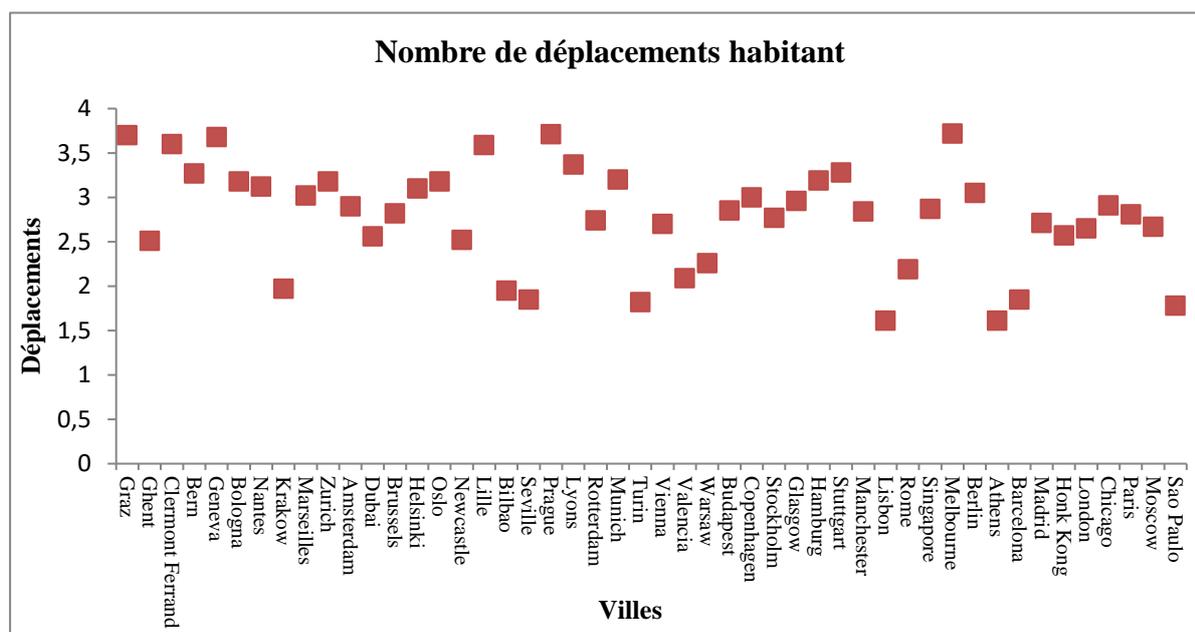


Source : UITP

Néanmoins, deux éléments composent notre indicateur, la consommation par déplacement et le volume de déplacement. La mobilité varie selon des territoires. Or les facteurs attachés à la mobilité sont différents des éléments de choix modaux et de distance. En ôtant cette variable, nous ôtons aussi les facteurs susceptibles d'intervenir dans l'explication de la consommation par habitant. Notre indicateur nous le permet.

De la consommation par habitant nous passons à la consommation par déplacement (Cf Graphique 55)

Graphique 55 : nombre de déplacements par habitant base UITP



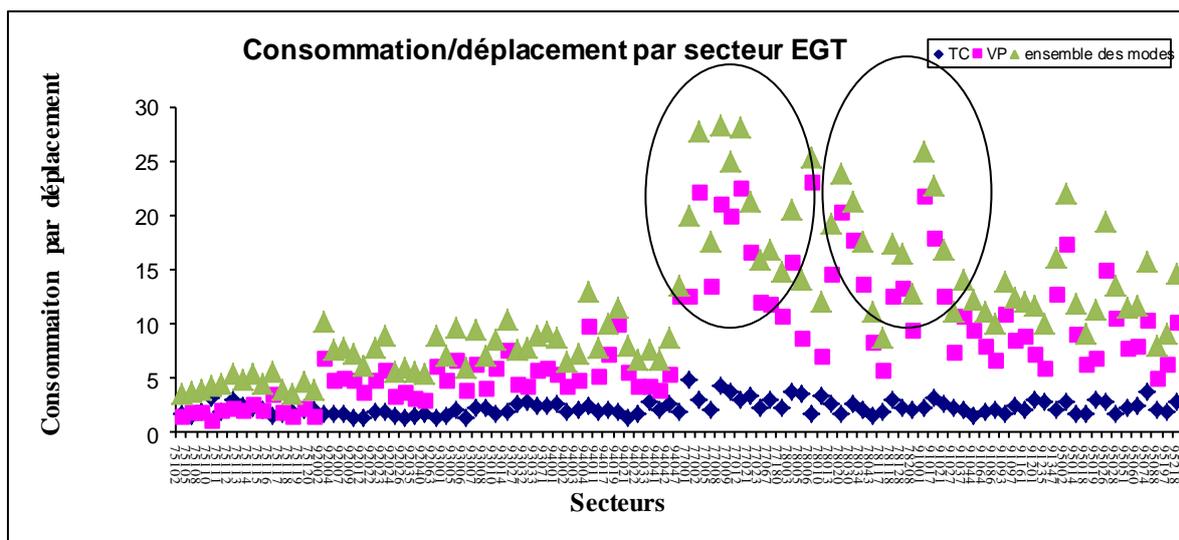
Source UITP

La relation à la consommation par habitant de la base est très forte ($R^2= 0,80$) montrant l'importance des variables, parts modales, portées, et efficacité dans la consommation par habitant. Notre indicateur ne mesure donc pas les mêmes valeurs, mais montre les mêmes variations. Notre mesure d'efficacité distingue donc les territoires de la même manière que l'autre méthode tout en y ajoutant des informations supplémentaires attachées à ses variables, nombre de déplacement, portées, parts modales, efficacité énergétique réticulaire. Ensuite cet indicateur nous permet de distinguer les modes et de nous adapter à l'échelle de référence choisie les secteurs EGT.

1-3) Consommation par déplacement sans chaînage dans les secteurs EGT.

Nous repartons des consommations spécifiques des secteurs EGT (cf. chapitre 1) en JO tant pour le TC que la VP. A partir des données de parts modales et de portées, les consommations par déplacement et par mode sont calculées (cf. ci-dessous). Nous utilisons le coefficient de 1,3 pour corriger les portées. Pour le TC, les consommations sont régulières puisqu'il existe des compensations internes. Les parts modales diminuent avec des portées qui augmentent. Aussi, le TC est plus économe et régulier que la VP par déplacement. La variation globale de l'efficacité provient donc des VP. (Cf Graphique 56)

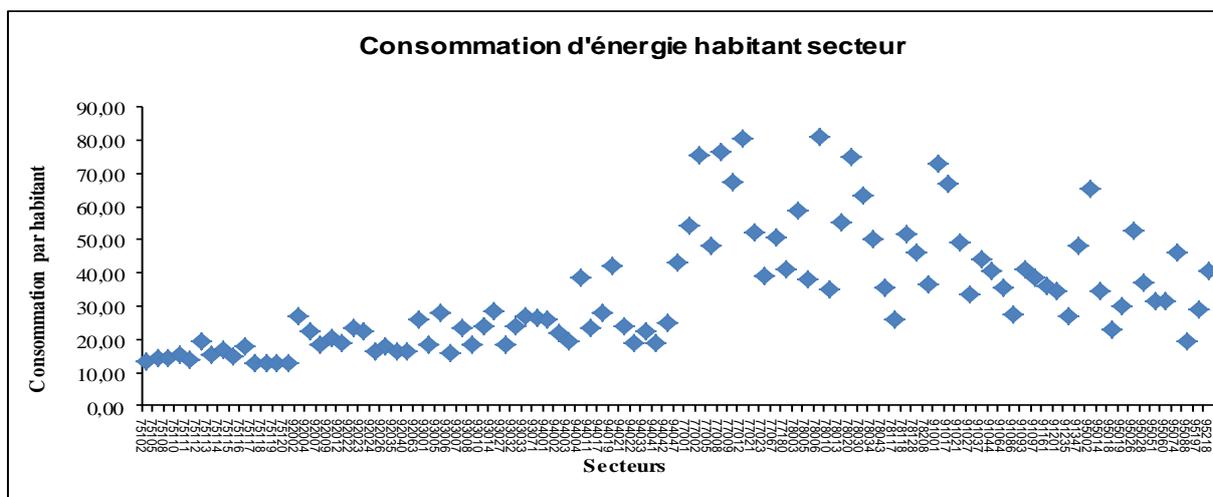
Graphique 56 : consommation/déplacement pour l'ensemble des déplacements (ED)



Source : calcul de l'auteur.

En moyenne, elle augmente de Paris à la deuxième couronne. Néanmoins, celle-ci montre des différences. Ainsi, le département 77 a des consommations par déplacement plus fortes que dans le 95. Entre les secteurs un jour ouvrable la faible variation de la mobilité fait de la consommation par déplacement l'origine des différences entre les secteurs (cf. graphique 57)

Graphique 57: consommation par habitant.



Source auteur

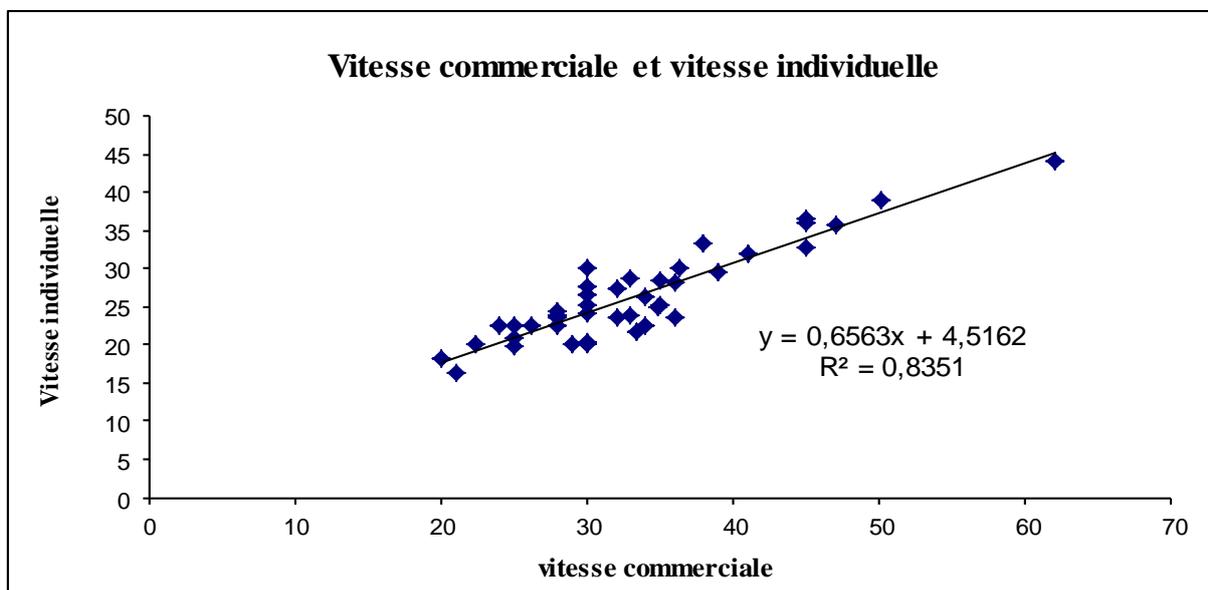
2) La question du chaînage des voyages.

2-1) Du déplacement chaîné au déplacement à voyage chaîné sur la base UITP

La pseudo-vitesse de déplacement est la vitesse de l'individu, dans un système spatial normé. Le temps représente un trajet de porte à porte contrairement à la portée rectiligne qui aboutit à un centroïde. Or des détours existent hors des corrections usuelles entre les représentations réticulaires et cartographiques et le temps évalué n'est pas celui passé dans les réseaux. Néanmoins, le déplacement est dynamique.

On suppose donc qu'une relation existe entre la pseudo-vitesse et la vitesse réticulaire sur la base UITP. Les deux vitesses ont une régression significative. La vitesse de circulation (réticulaire moyenne) explique celle du déplacement des modes. (Cf Graphique 58)

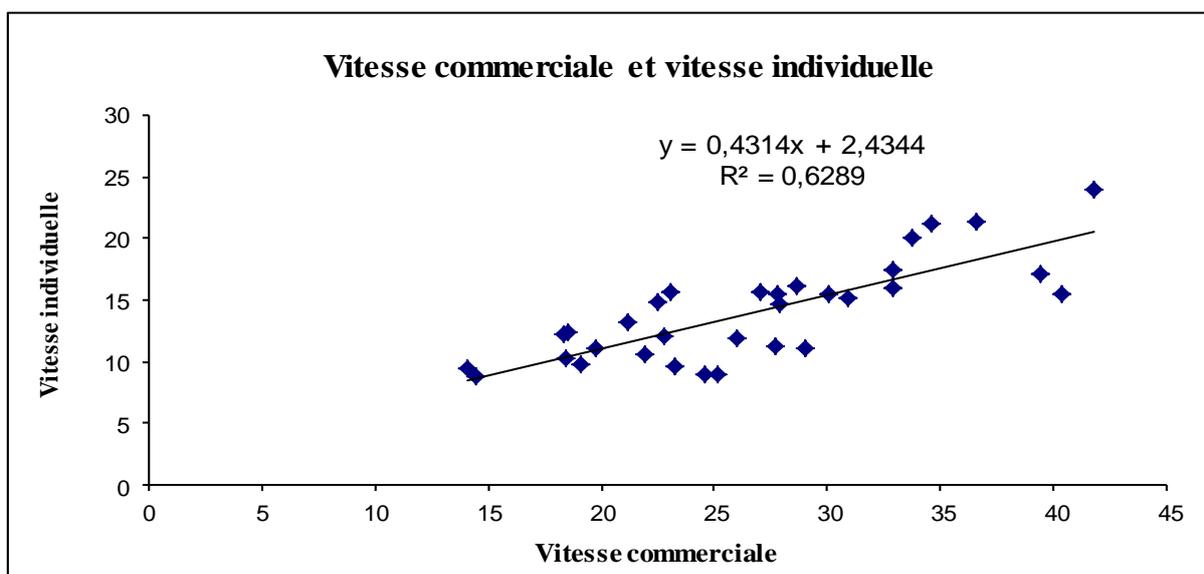
Graphique 58: relation entre vitesse de circulation et de déplacement voiture Km/h UITP



Source : calcul de l'auteur

Elle est plus précise pour la VP ($R^2=0.83$) que pour le TC ($R^2= 0.62$). Pour le TC, vitesse de circulation provient du ratio entre le nombre de véhicule kilomètre et le nombre d'heures de conduite effectuées lors de l'exploitation (sans temps morts). Avec plusieurs opérateurs, la vitesse moyenne est le résultat du ratio entre la somme des véhicules kilomètre et la somme des heures de conduite. Avec plusieurs modes, un ratio des vitesses est effectué avec le nombre de passager kilomètre. La construction des données TC de la base peut expliquer cette variation. Une autre hypothèse, serait que le chaînage des voyages dans le déplacement l'expliquerait. (Cf Graphique 59)

Graphique 59: relation entre vitesse de circulation et vitesse de déplacement TC Km/h UITP



Source : calcul de l'auteur

Néanmoins, ces relations montrent que l'individu franchit deux dimensions différentes dans son déplacement : le territoire et le réseau. La pseudo-vitesse de déplacement dépend de la vitesse de circulation. Le déplacement est le contenant du voyage. Le déplacement est alors « à voyage non chaîné » ou « à voyage chaîné » selon trois types de chaînage : modal, intra-modal, intermodal. Dans cette approche, l'espace réticulaire est donc un sous espace non fongible fonctionnellement de l'espace aréolaire.

2-2) Estimation de la consommation du chaînage d'un TC en IDF

Pour les TC 2/3 du trafic est chaîné. Théoriquement, ces voyages s'intègrent facilement avec la part de chaque consommation unitaire des deux modes. Les consommations par déplacement peuvent intégrer les trafics chaînés (Cf Equation 75).

$$C_d = O_1 C_{dte} + (1 - O_1) \times C_{dstc} \quad (75)$$

Source : auteur

O_1 = part de trafic chaîné C_{dstc} = consommation unitaire du trafic non chaîné.

Pour la part de trafic chaîné nous avons (Cf Equation 76).

$$C_d = \alpha_{tc} \times (C_{u1} \times P_1 + C_{u2} \times P_2) \quad (76)$$

Source : auteur

α_{tc} = part modale des déplacements avec trafic chaîné C_{u1} = consommation unitaire du mode 1 (ou 2)
 P = portée du mode 1 (ou 2). Néanmoins, les parts modales des déplacements à trafic chaîné des modes TC ou les moyennes de leurs portées sont indisponibles dans les données. Le trafic chaîné modal n'est pas compté. Il est traité comme un déplacement non chaîné avec la consommation unitaire moyenne du réseau puisque nous ne connaissons l'usage des lignes des habitants. En effet, à l'intérieur du réseau métro, l'origine des correspondants par ligne de chaque utilisateur est inconnue. Néanmoins, la moyenne et la médiane des consommations unitaires sont similaires. Nous faisons l'hypothèse d'une compensation des écarts pour ces trafics. Ensuite, les trafics chaînés ont des scénarios différents selon les territoires et les réseaux. A Paris, le scénario le plus probable selon les rabattements est le chaînage -métro-RER pour les habitants. En effet, le pourcentage d'entrants pour le métro issu des autobus (6%) ne renvoie pas nécessairement à des habitants parisiens puisqu'un grand nombre de stations de rabattement se situe en dehors de Paris. L'autre composante la SNCF (9,5%), issue des gares, implique une origine hors de Paris. Le trafic intra-modal métro-RER est de 5%. Pour la première et la deuxième couronne, plusieurs chaînages sont possibles. Nous retiendrons les plus courants, à deux parcours, ce qui représente + de 90% des voyages. Pour la première couronne, la correspondance métro + bus est négligée du fait du faible trafic intra-modal. (Cf Tableau 129).

Tableau 129 : type de chaînage d'un déplacement			
Chaînages	Paris	1ière couronne	2ième couronne
Chaînage 1	Métro + RER	Train + métro	RER + Train
Chaînage 2	Nd	RER + bus	Train + bus
Chaînage 3	Nd	Métro + RER	Nd

Source : calcul de l'auteur

Nous n'avons pas les données de parts modales par couronne dans chaque liaison, il nous faut donc les reconstituer à partir données RATP qui représente 80% du trafic dans la région IDF. Nous estimons quelle part de trafic représente la liaison selon la couronne que nous appellerons Δ . Le coefficient de 0,05 correspond au parcours métro RER. Le coefficient 0,10 renvoie au trafic intra-modal de la SNCF dans les trafics métro RATP, la part de 0,14 renvoie à celui du bus dans le trafic RER, et la coefficient 0,20 à celui du RER dans le métro. Le coefficient de 0,25 est celui de la SNCF dans le RER le coefficient 0,32 vient d'une évaluation de la part du trafic bus en deuxième couronne. (Cf Tableau 130) :

Chaînages	Paris	1ière couronne	2ième couronne
Chaînage 1	0,05	0,10	0,25
Chainage 2		0,14	0,32
Chainage 3		0,20	

Source : calcul de l'auteur

Ensuite, vient le problème des portées. En effet, la consommation par déplacement suppose l'évaluation des portées qu'il reste à partitionner dans les modes. Or le cheminement des habitants est inconnu et leurs portées réticulaires avec. Le parcours moyen ne renvoie à rien d'individuel, néanmoins, nous supposons que la distance réellement parcourue intègre des parcours moyens puisqu'il traduit une utilisation. Aussi, pour le trafic chaîné, nous supposons que les portées sont dépendantes des parcours moyens de chaque mode. Aussi leurs parts renvoient aux parts de portée des modes. Nous prenons les parcours moyens agrégés (Cf Equation 77)

$$\beta_{\text{m\u00e9tro}} = P_{\text{m\u00e9tro}} / (P_{\text{m\u00e9tro}} + P_{\text{m\u00e9ro}}) = 5 / (5 + 10) \quad (77)$$

Source : calcul de l'auteur

Aussi un déplacement avec trafic chaîné donne (CF Equation 78)

$$C_{ud} = \alpha_s \times ((\beta_1 \times P \times C_{u1}) + (\beta_2 \times P \times C_{u2})) \quad (78)$$

Source : calcul de l'auteur

α_s = part modale du TC du secteur β = part de portée du véhicule (1,2..) P = portée du mode avec coefficient de correction C_u = consommation unitaire du véhicule.

Nous avons donc pour la consommation du déplacement avec trafic chaîné (Equation 79)

$$C_{ud} = ((\beta_1 \times P \times C_{u1}) + (\beta_2 \times P \times C_{u1})) \times \Delta_1 + \dots + ((\beta_5 \times P \times C_{u3}) + (\beta_6 \times P \times C_{u3})) \times \Delta_3 \quad (79)$$

β = part de portée du véhicule (1,2..) P = portée du mode du secteur C_u = consommation unitaire du véhicule Δ = part de trafic chaîné.

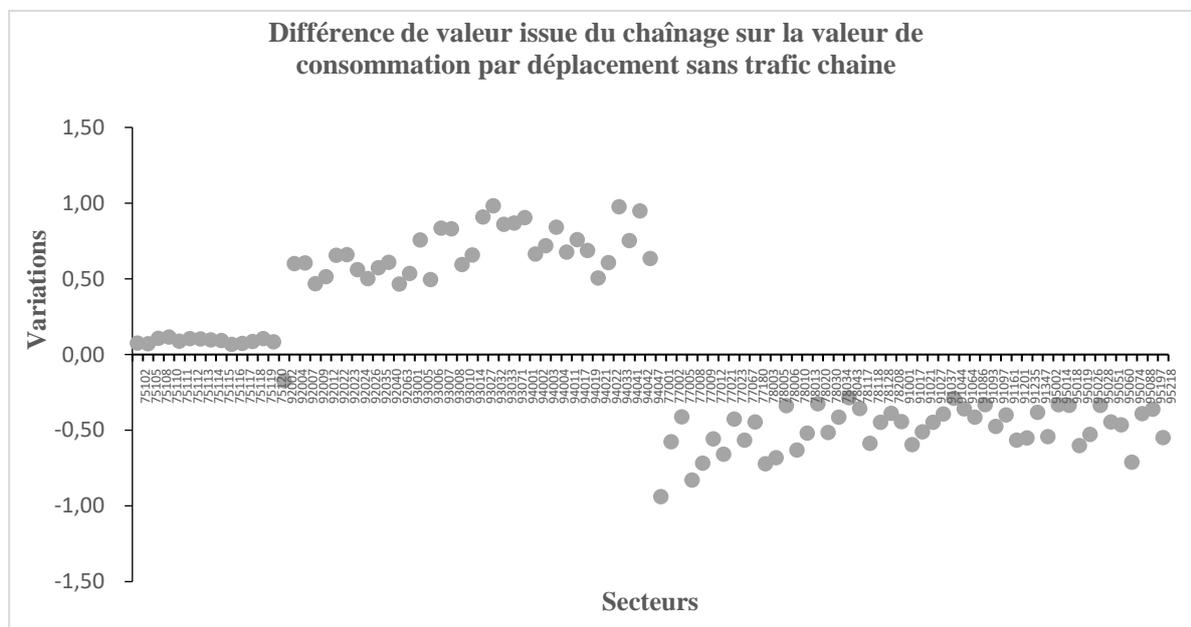
Les équations de chaînage pour chaque couronne sont données ci-dessous. (Cf Tableau 131)

Chaînage	Paris	1ière couronne	2ième couronne
Chaînage 1	$5/15 \times 1,04 \times P_s$ $+ 10/15 \times 0,837 \times P_s$	$5/22 \times 1,04 \times P_s + 17/22 \times 1,19 \times P_s$	$10/27 \times 0,837 \times P_s + 17/27 \times 1,19 \times P_s$
Chainage 2		$10/17 \times 0,84 \times P_s + 2/10 \times 1,23 \times P_s$	$5/22 \times 1,196 \times P_s + 17/22 \times 1,19 \times P_s$
Chainage 3		$5/15 \times 1,04 \times P_s + 10/15 \times 0,84 \times P_s$	

Source : calcul de l'auteur.

Nous estimons la différence entre des consommations par déplacement à trafic chaîné et non chaîné. La valeur est parfois négative. La consommation par déplacement sans chaînage ne sous-estime pas toujours la consommation par rapport au chaînage. Dans l'estimation de la consommation par déplacement sans trafic chaîné nous avons agrégé la valeur de l'efficacité énergétique, alors qu'ici nous les avons décomposés. (Cf Graphique 60)

Graphique 60: effet des trafics chaînés sur la valeur de la consommation par déplacement



Source : calcul de l'auteur.

Aussi l'efficacité énergétique d'un déplacement peut être supérieure ou inférieure de 1 Mj selon les modes utilisés à une moyenne agrégée effectuée selon des réseaux. Néanmoins, ces estimations, si elles montrent que les voyages chaînés influencent l'efficacité énergétique du déplacement en TC, sont invérifiables. Elles modifient faiblement les différences entre les valeurs de la voiture et du TC. Ensuite, le trafic chaîné est négligeable pour les VP. Cela ne change donc guère la variation des consommations par déplacement selon les secteurs et les couronnes. Nous utiliserons donc la consommation par déplacement sans trafic chaîné.

3) *Variation de la consommation par déplacement*

3-1) **Consommation domicile travail.**

Les exploitations complémentaires du recensement comptent un nombre de « navettes » ou déplacements domicile travail. Il s'agit des actifs de plus de 15 ans ayant un emploi. Les modes des exploitations complémentaires diffèrent des EGT : Marche Pas de déplacement. Deux-roues, VP, TC. Pour les deux roues aucun compte motorisé n'apparaît. L'absence de déplacement ne figure pas dans les EGT.

En cumulant les deux roues des EGT et en considérant la part modale pas de déplacement, comme un déplacement en MAP de distance nulle, la différence entre les parts modales (0.03) des deux enquêtes est faible. Elles sont équivalentes, un jour ouvrable (Cf Tableau 132).

Modes	Marche	Deux roues	Voiture	TC
Recensement	0,07	0,05	0,43	0,44
EGT (2010)	0,1	0,06	0,41	0,43

Source : calcul de l'auteur

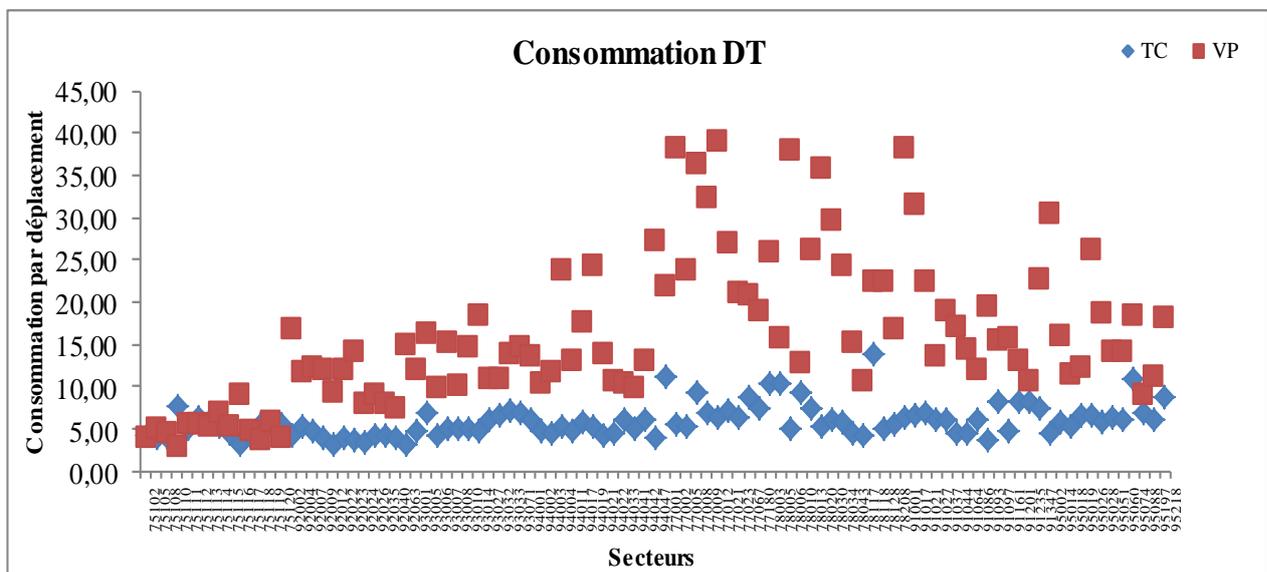
Nous sectorisons ces parts avec le programme VBA (Visual Basic). Nous choisissons des indicateurs agrégés et moyens comparables aux indicateurs de mobilité des secteurs EGT (Cf Equation 80) :

$$\text{Part modale d'un mode par secteur} = \frac{\Sigma \text{déplacement d'un mode des communes d'un secteur}}{\Sigma \text{déplacement ensemble des modes des communes du secteur.}} \quad (80)$$

Source : calcul de l'auteur

La consommation unitaire du trajet domicile travail (DT) renvoie aux heures de pointe. Les portées sont plus importantes que la moyenne de l'ensemble des déplacements. Nous les corrigeons (Coefficients de correction TC=13,1/9 VP = 10,2/6,2). Les consommations par déplacement du TC sont deux fois plus élevées. La baisse de la consommation unitaire du TC ne compense pas l'augmentation des distances et des parts modales dans l'efficacité par déplacement (Cf Graphique 61).

Graphique 61: consommation déplacement Domicile Travail



Source : calcul de l'auteur.

3-2) En fonction des jours 2008

Nous calculons les consommations par déplacement selon les modes et les jours. Le samedi les consommations du déplacement de la VP baissent par rapport à un jour ouvrable ce n'est pas le cas du dimanche. Pour le TC urbain, la baisse importante des portées et des parts modales compense la hausse des consommations unitaires, expliquant sa plus faible consommation par déplacement.

Si son efficacité réticulaire baisse sa consommation par déplacement baisse aussi avec les parts modales et les portées. (Cf Tableau 133).

Tableau 133 : consommation par déplacements selon les jours Mj									
Voiture					Transport en commun urbain				
	C _U	Part modales	Portées	C _{ud}	C _U	Part modales	Portées	C _{ud}	Total
JO	2,61	0,38	7,969	7,92	1,11	0,2	11,57	2,57	10,49
SAM	2,00	0,41	9,23	7,59	1,40	0,15	9,88	2,08	9,66
DIM	2,07	0,47	9,75	9,50	1,85	0,12	10,92	2,43	11,93

Source : calcul de l'auteur.

Nous multiplions des consommations par déplacement par la mobilité. Entre les jours, la consommation par déplacement augmente mais la mobilité est plus faible. Avec les habitudes sociales, la consommation par habitant baisse. (Cf Tableau 134)

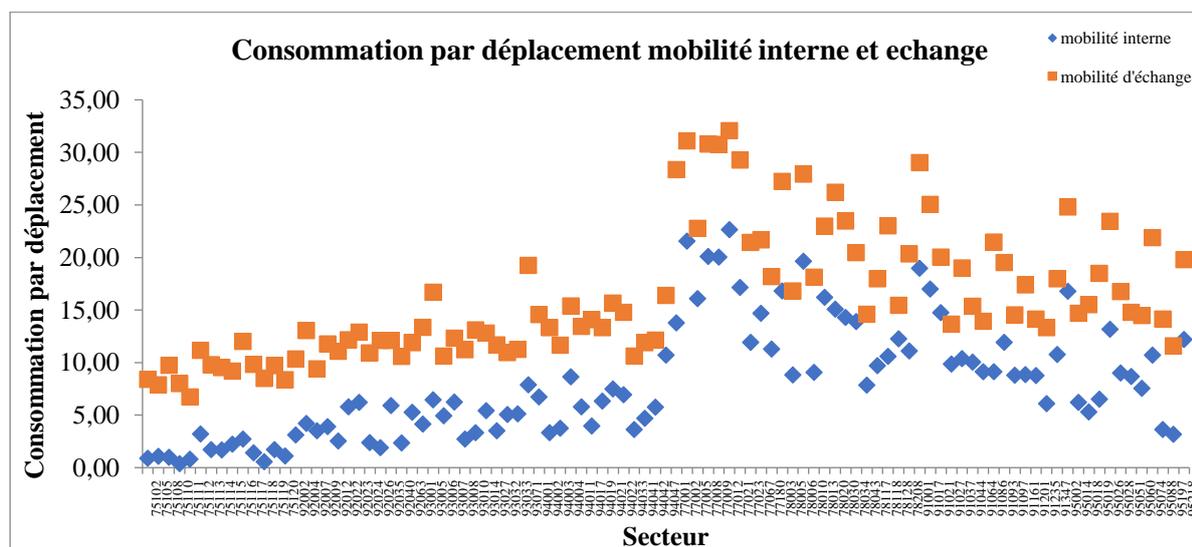
Tableau 134 : variation de consommation par habitant Mj			
Jours	Total	Mobilité	C _{uh}
JO		11,18	43,59
SAM		10,34	34,42
DIM		12,78	30,79

Source : calcul de l'auteur.

3-3) Consommation par déplacement des secteurs.

Les données permettent d'évaluer la consommation par déplacement de la mobilité des secteurs. Les portées entre les deux mobilités (échange et interne) ne sont pas distinguées. Seules les parts modales varient. Les efficacités énergétiques des déplacements moyens de la mobilité interne Mj sont plus fortes que celle de leurs habitants. Elle est très forte dans les secteurs parisiens du fait de la forte proportion de MAP dans la mobilité interne. (Cf Graphique 62).

Graphique 62: efficacité énergétique du déplacement échange/interne



Source : calcul de l'auteur.

La mobilité d'échange a une consommation par déplacement plus forte (Cf Graphique). Elle est inférieure à celle des habitants. La variation des parts modales l'explique

3-4) Convergence et consommation par déplacement selon les couronnes en jour ouvrable

Nous ne disposons pas des données de portées par couronne du TC. Nous les calculons à partir des données connues les portées régionales et par couronnes (2001-2008). Nous estimons par couronne la moyenne des ratios entre la portée IDF et par couronne en 2001 ($P_{ci2001}/P_{idf2001}$) et 2008 ($P_{ci2008}/P_{idf2008}$) ; Nous calculons les moyennes des deux ratios (R_{ci}) (Cf équation 81).

$$R_{ci} = (P_{ci2001}/P_{idf2001} + P_{ci2008}/P_{idf2008}) / 2 \quad (81)$$

Calcul de l'auteur

Avec les portées régionales (P_{ajid}) nous les reconstruisons par an et couronnes (P_{ciaj}) (Cf équation 82)

$$P_{ciaj} = P_{ajidf} \times R_{ci} \quad (82)$$

Calcul de l'auteur

La consommation par déplacement du TC augmente dans les couronnes. Paris est la plus efficace, la seconde là moins. L'efficacité énergétique du déplacement de la VP monte à Paris et en petite couronne depuis 1982 et baisse en seconde avant une légère hausse. L'addition des deux modes montre leur évolution. La mobilité étant similaire entre les secteurs, la variation de la consommation par habitant renvoie à celle du déplacement (Cf Tableau 135).

Tableau 135 : consommation par déplacement en JO					
	1976	1982	1990	2001	2008
IDF	7,33	7,87	8,09	8,81	7,38
Indice de convergence IDF	0,31	0,34	0,37	0,46	0,42
Paris	6,02	6,05	6,00	5,31	4,64
Indice de convergence Paris	0,27	0,28	0,31	0,37	0,35
PC	6,80	7,43	7,34	6,56	5,99
Indice de convergence PC	0,26	0,28	0,31	0,37	0,34
GC	10,42	10,42	11,03	12,07	11,78
Indice de convergence GC	0,33	0,35	0,38	0,46	0,43

Source : Auteur

En IDF nous constatons une hausse puis une baisse de la consommation par déplacement. L'indice de convergence en JO à la même tendance. Plus les VP ont amélioré leur efficacité énergétique plus la consommation par déplacement s'est dégradée avant une amélioration dans la dernière période. L'augmentation de la compétitivité énergétique de la VP ne garantit pas l'efficacité énergétique des habitants. La baisse des consommations unitaires des modes TC et VP non plus. Ensuite, nous avons une variation assez importante de la consommation par déplacement selon les couronnes qui baissent de manière continue jusqu'en 2008 à Paris. Dans le même temps, l'indice de convergence varie la encore en faveur de la VP sur la période 1975-2008 malgré des variations en faveur du TC dans la dernière période 2001-2008. Nous avons la même tendance en PC mais pas en GC. L'indicateur se dégrade malgré la baisse continue des consommations unitaires de la VP. Nous constatons le même effet en région IDF. Aussi des éléments spécifiques de consommations semblent concerner la GC mais pas les autres. Aussi plus l'efficacité énergétique du voyage VP augmente plus celle du résident baisse.

Contrairement à ce nous aurions pu penser, la croissance de l'efficacité énergétique des voitures ne conduit pas à une croissance de l'efficacité énergétique pour les habitants en particulier en GC. Or cette variation ne vient pas non plus d'une augmentation significative des consommations unitaires du TC. C'est donc l'usage qui se traduit au travers des parts modales et des portées dans notre indicateur qui modifie la consommation par déplacement. Nous pouvons supposer qu'il existe en effet rebond dans cette couronne.

Ensuite, un autre élément apparaît. Une variation des consommations par déplacement selon les couronnes. Il est moins fort à Paris et en PC qu'en GC. Cette tendance est similaire pour les consommations par déplacement du principalement à l'augmentation de l'usage tant du point de vue des parts modales que des portées pour les modes.

3-5) discussion des résultats.

Si le progrès technique modifie les compétitivités énergétiques, nous constatons que la diffusion de la voiture en particulier en Grande Couronne (GC) pénalise l'efficacité énergétique des habitants. L'usage compense largement l'efficacité ce qui induit un effet rebond qui, certes, pourrait permettre une acquisition plus rapide du progrès technique, mais aussi une consommation par déplacement supérieure à ce qu'on aurait pu espérer. Cet effet rebond se manifeste principalement en GC mais pas dans les autres couronnes selon l'évolution de notre indicateur. L'aménagement du territoire est différent entre les couronnes ce qui interroge alors l'interaction entre les réseaux et les territoires dans le cadre de la mobilité urbaine.

4) Conclusion :

Nous élaborons un indicateur la consommation par déplacement. Nous vérifions l'heuristique de l'indicateur sur la base UTIP et l'utilisons selon les territoires de l'IDF. Nous calculons les déplacements à voyage non chaîné selon les secteurs. La stabilité des consommations des TC est due à la compensation des variables spatiales de la consommation par déplacement. La part modale augmente pendant que la portée baisse. Nous estimons des variations due au chaînage. Les consommations des déplacements des TC sont plus fortes à Paris, en petite couronne et moins fortes en grande. Néanmoins, leurs stabilités n'est pas remise en cause ce qui nous invite à ne pas utiliser le chaînage dans la suite de l'étude. Nous étudions les variations dues au motif de déplacement, aux jours et aux secteurs avant de mesurer celles habitants. Le motif domicile travail apparaît plus consommateur, la consommation par habitant en jour non ouvrable baisse à cause d'une plus faible mobilité. Nous calculons alors les consommations par déplacement du territoire et observons une divergence forte entre mobilité interne et la mobilité d'échange entre les secteurs EGT.

Nous examinons les effets de la convergence sur la consommation par déplacement. Nous constatons une variation importante des consommations par déplacement selon les territoires. Nous observons une croissance de l'efficacité TC due à la baisse des consommations unitaires de la VP à Paris et en petite couronne mais pas dans la grande où l'efficacité se dégrade. La variation des parts modales et les portées compense l'amélioration technique. Le même phénomène se retrouve entre les deux efficacités la compétitivité énergétique plus forte à Paris et en PC qu'en GC ainsi qu'une augmentation de la consommation par déplacement en grande couronne (GC). Plusieurs éléments sont à retenir.

- La construction d'un indicateur d'efficacité énergétique combiné multi-échelle permettant la mesure de l'efficacité énergétique d'un déplacement, d'un habitant ou d'un territoire.
- Une variation différente selon les modes et les motifs de cette efficacité.
- Une consommation par déplacement faible de la mobilité interne vis-à-vis de la mobilité d'échange.
- Une augmentation de la grande couronne (GC) à Paris de cette efficacité qui rejoint la variation des efficacités énergétique réticulaires sur qui suppose une augmentation des parts modales et du trafic. Ensuite nous constatons une augmentation des consommations par déplacement en GC avant une stagnation en 2008 laissant supposer l'existence d'un effet rebond.

Conclusion section 2

Comment la convergence constatée en section 1 modifie les consommations des habitants ?

Les données de mobilité de la mobilité quotidienne sont exposées, l'heuristique de certains indicateurs portée, temps et vitesse interrogent. Néanmoins, malgré les incertitudes de mesure, la relation entre la pseudo-vitesse de déplacement et la vitesse réticulaire dans la base UITP, montrent une relation entre deux espaces réticulaires et aréolaire. Nous montrons que si le déplacement est unique pour les TC les voyages ne le sont pas forcément puisque la majorité sont « chaînés ». Nous distinguons 3 types de chaînage : modal, intra-modal (articulant des modes réticulaires à l'intérieur d'un mode) et inter-modal articulant deux modes. Nous constatons la grande difficulté pour distribuer les consommations d'énergie des résidents sur les secteurs puisque le voyageur n'est forcément un habitant des territoires à grande échelle. La méthode combinée du BEED semble alors la plus apte pour atteindre l'objectif. Nous étudions la notion la chaîne du déplacement et articulons les notions de voyage et de déplacement avec les données de la RATP. Nous proposons à partir d'un déplacement non chaîné un indicateur de mesure du déplacement puis des habitants. Nous vérifions notre mesure en la comparant à la consommation par habitant calculée à partir de la méthode UITP avec une régression significative. Nous calculons alors les consommations des habitants selon les secteurs tout d'abord en spatialisant les consommations unitaires TC et VP. Ensuite nous calculons les consommations par déplacement des secteurs à partir d'un déplacement à voyage non chaîné. Si les consommations de la VP varient celles du TC sont stables. Nous évaluons les effets du chaînage pour examiner l'opportunité de rester sur une méthode de déplacement à voyage non chaîné. Nous restons sur une proposition simplifiée et nous calculons les variations des consommations par déplacement dans l'espace et le temps à partir d'un déplacement non chaîné. Nous nous montrons des variations des consommations des déplacements et des habitants selon :

1. Les motifs de déplacement
2. Les jours

Nous calculons alors la consommation par déplacement d'un territoire et constatons une consommation interne bien plus faible que la mobilité d'échange. Enfin nous montrons une croissance de la consommation par déplacement en particulier en grande couronne (GC) alors qu'il existe des variations similaires entre compétitivité énergétique et consommation par déplacement selon les couronnes. Plusieurs éléments sont alors à retenir de cette première étude :

1. La notion de convergence traduit la variation des compétitivités énergétiques à l'énergie primaire des modes selon la diffusion des technologies. L'efficacité énergétique de la VP croît plus vite que celle du TC en IDF. Elle se distingue néanmoins selon les couronnes.

2. La relation entre déplacement et voyage montre deux espaces, réticulaire et aréolaire, non fongibles l'un dans l'autre. Un nouveau concept le déplacement à voyage chaîné ou non permet alors d'interroger la notion de consommation par habitant.
3. L'indicateur de la consommation par déplacement calcule l'efficacité énergétique des habitants sur plusieurs échelles tout en différenciant les variables de la mobilité portée et parts modales ce qui permet alors de différencier cette mesure selon les motifs, le jour les type de mobilité interne ou d'échange.
4. Une convergence qui se différencie tout comme la consommation par déplacement. Elle laisse supposer une interaction spatiale-réticulaire basée sur les parts modales et donc les trafics. L'évolution interne des couronnes montre alors une croissance de l'indice similaire à celle de la consommation par déplacement laissant supposer l'existence d'un effet rebond en particulier en GC.

Conclusion partie 1: Vers une relation efficacité énergétique spatialisée et densités des habitants des secteurs EGT

Outre l'effet technique, deux éléments se superposent dans l'évolution des efficacités énergétique du voyage et du déplacement.

Le premier renvoie à une variation des effets de l'espace sur les consommations unitaires du réseau routier tant pour les TC que pour la banlieue. Cet effet de l'espace sur les réseaux, autrement dit du « milieu », se traduit par une surconsommation de la VP ce qui renvoie alors à une variation des consommations spécifiques qui affecte aussi les TC routiers. La baisse des vitesses serait le dénominateur de cette variation des consommation spécifiques pour les voitures et le réseau de TC routier RATP. Pour les réseaux ferrés, cette influence de l'espace se traduit en particulier par un taux de remplissage plus fort en milieu très urbanisé que dans les autres. Il se traduit de manière transversale selon les couronnes par une variation conséquente de l'indice de convergence. Le progrès technique permet une croissance de l'efficacité énergétique, quelque-soit les couronnes, puisque l'augmentation de l'indice traduit son augmentation pour la voiture. L'apparition de nouvelles technologies pourrait remettre en cause la compétitivité énergétique des TC. De plus, des effets différenciés de l'espace sur les variables de l'efficacité taux de remplissage et consommation spécifique sur les modes existent. Ainsi l'autobus voit ses taux stagner pendant que le réseau ferré voit les siens augmenter. Les modes routiers voient leur vitesse, et donc leurs consommations spécifiques, augmenter selon les espaces ce qui n'est pas le cas des modes ferrés. Il apparaît néanmoins que cette compétitivité est plus forte à Paris et en première couronne ce qui renvoie alors au taux de remplissage et à sa relation à l'aménagement du territoire.

Le second élément se déduit par l'intermédiaire de notre indicateur de la consommation par déplacement ; Par construction, il renvoie à une interaction entre deux dimensions non fongibles fonctionnellement du territoire. L'espace des résidents et celui des voyageurs. Nous constatons une variation des consommations par déplacement selon les couronnes avec une augmentation des consommations par déplacement en GC en jour ouvrable. Elle suit une augmentation des efficacités énergétique ce qui est alors parfaitement compatible avec l'effet rebond. Pour les autres couronnes où nous observons une stabilité des valeurs. Or les formes urbaines ne sont pas équivalentes entre ces couronnes. En effet le milieu est fortement dense Paris 19057 hab/Km² qu'en PC 5704 hab/km² ou en GC 323hab/Km².

Il existe donc une influence du milieu urbain ou non sur l'efficacité énergétique sur un double plan :
Le plan des voyageurs puisque des consommations du TC et de la VP varient selon les consommations spécifiques et les taux de remplissage.

Le plan des résidents puisque les usages se modifient selon les couronnes et modifie les consommations par déplacement.

Cette différenciation selon les couronnes renvoie alors aux densités tant pour les consommations unitaires que pour les consommations par déplacement. Nous posons donc deux questions dans la deuxième partie.

1. Existe-t-il une modification de l'efficacité énergétique des déplacements selon les densités à l'échelle régionale ?
2. Quelle densification efficace énergétiquement de l'espace à proximité de stations du réseau ferré parisien ?

Partie 2: Densification des territoires milieu urbain et efficacité énergétique des lignes du réseau ferre de TC : une proposition.

Introduction

Nous venons de distinguer deux efficacités énergétiques. L'efficacité énergétique du voyageur et celle de l'habitant. Comment la densité modifie-t-elle ces deux efficacités ? En effet, nous venons de montrer une augmentation de la compétitivité énergétique du TC selon les couronnes. Le taux de remplissage augmente pour les réseaux ferrés. Or la couronne ou le TC est le plus compétitif est aussi la plus dense. La densité en renforçant le trafic du transport en commun (TC) baisserait-il les consommations d'énergie des voyageurs ? Ce mode plus efficace que la voiture augmenterait-il alors l'efficacité énergétique des habitants d'un territoire densifié ?

Une augmentation de l'efficacité par déplacement existe entre les couronnes en jour ouvrable. Là encore, l'efficacité des habitants augmente tout comme les densités. Elle modifie alors outre le trafic, les variables temporelles (part modale) et spatiale (portée) à efficacité énergétique du voyage donnée. Or la part modale modifie le trafic. Existe-t-il alors un lien entre densité part modale et trafic ? L'interdépendance entre les deux indicateurs viendrait-elle de ce lien que la densité semble modifier, tant du point de vue du voyageur, avec le taux de remplissage, que du point de vue de l'habitant avec les parts modales et les portées ?

La distinction effectuée entre l'habitant et le voyageur permet de s'interroger sur l'origine de la relation entre densité et efficacité énergétique des habitants et celle qu'il y aurait entre densité et efficacité énergétique des voyageurs. Elle permet alors d'envisager un modèle de densification à proximité des gares ou des stations de réseaux ferrés à partir des relations qu'ont les habitants avec le taux de remplissage au travers des voyageurs.

Nous effectuons deux étapes que traduisent les sections nécessaires à notre objectif de modélisation.

La première est la clarification de la relation entre densité et efficacité énergétique des habitants à l'échelle régionale.

La seconde est la relation entre trafic et habitant, ce qui nous permet alors de construire un modèle de densification efficace énergétiquement à proximité des stations.

Partie 2: Densification des territoires milieu urbain et efficacité énergétique des lignes du réseau fer de TC : une proposition.	176
Introduction	176
Section 1 : La densité est-elle en relation avec les consommations d'énergie par habitant liées au transport ?	181
Introduction	181
Chapitre 5 : L'organisation spatiale de l'Ile-de-France explique-t-elle la relation entre densité de population et efficacité énergétique ?..	183
Introduction : Une relation débattue.....	183
1) Forme urbaine monocentrique et efficacité énergétique	185
1-1) Formes urbaines et flux	185
1-2) Modèles monocentrique et polycentrique.....	186
1-3) Relation avec les variables de l'efficacité énergétique.	194
1-4) Quelles relations entre espace aréolaire et réticulaire ?	200
1-5) Conclusion : une relation discutable.....	206
2) Une forme mono-polycentrique en IDF.....	206
2-1) Une forme « mono-polycentrique » en IDF.....	206
2-2) L'interaction réticulo-spatiale.....	217
2-3) Conclusion de la revue de littérature	226
3) Relation densité efficacité énergétique dans une forme mono-polycentrique en IDF.	226
3-1) Une causalité densité consommation par habitant remise en cause : la base UITP.....	226
3-2) Forme monocentrique et effet rebond en IDF.....	227
3-3) Densité et consommation du déplacement un phénomène reproduit en IDF.	231
4) Conclusion : des résultats qui interrogent.	236
Chapitre 6 : La densité entraîne-t-elle une modification des parts modales TC ? Une approche par les coûts généralisés du modèle GLOBAL.....	238
Introduction.....	238
1) Élément de méthode : les coûts généralisés du modèle GLOBAL	239
1-1) Les modèles 4 étapes.....	239
1-2) Les coûts généralisés utilisés.....	245
1-3) Conclusion :	251
2) Parts modales et différence de coûts généralisés dans les secteurs EGT.....	252
2-1) Méthode de transposition des coûts généralisés dans les secteurs EGT.....	252
2-2) Calcul de la valeur du temps	252
2-3) Calcul des coûts du temps par secteur.	255
2-4) Les coûts d'usage VP	256
2-5) Calcul des coûts d'usage du TC par secteur.	259
2-6) Les hypothèses vérifiées dans les secteurs.....	263
3) Effet induit et direct des concentrations d'activité sur les variables du temps.	265
3-1) La relation densité part modale comme problème théorique	265
3-2) Les facteurs réticulaires du temps.....	269
3-3) Taux de motorisation et écart de temps.	278
3-4) L'effet d'échelle et interaction spatiale-réticulaire.	280
3-5) L'effet du maillage sur la spécialisation du TC	282
4) Conclusion : la relation concentration d'activité choix modal comme interaction spatiale-réticulaire.....	286
Conclusion section 1 : quel effet de la densification sur le trafic ?.....	288
Section 2 : Quel impact d'une densification sur le système de TC ? Réciproquement, quel impact de l'offre TC sur une possible densification, à proximité des stations, efficace énergétiquement ?	290
Introduction :	290
Chapitre 7 : Les TC comme outil d'aménagement de l'espace : accessibilité et développement territorial selon l'offre de transport.....	292
Introduction ;	292
1) L'aménagement local comme problème complexe.	294
1-1) Le TOD.....	294
1-2) Le projet d'aménagement en IDF : un exemple du TOD ?	296
1-3) La méthode node place.....	298

2) La marche à pied comme marque de la proximité spatiale à l'échelle réticulaire	302
2-1) La proximité du réseau comme point de convergence des projets d'aménagement en IDF.	302
2-2) L'accessibilité.	302
2-3) Accessibilité et chaîne de déplacement.	303
2-4) La marche à pied comme effet de la proximité dans le réseau	306
3) La question de l'offre	307
3-1) Trafic et offre.	307
3-2) La question de la saturation	309
3-3) Le taux minimum de remplissage des modèles énergétiques.....	313
3-4) Spécificités du réseau ferré.....	314
4) Conclusion de l'état de l'art.....	316
Chapitre 8 : Effet des densités d'habitants sur le trafic autour des stations : une étude à Paris.....	318
Introduction	318
1) Méthode.....	320
1-1) L'hypothèse de recherche.....	320
1-2) Un mode le réseau ferré parisien RATP.	321
1-3) Un motif spécifique le trajet domicile travail.	321
1-4) Les données.....	321
2) Vérification de l'hypothèse.....	322
2-1) La matrice de répartition.	322
2-2) Les parts de trafic à pied dans les stations.	322
2-3) La variation des parts de marche à l'entrée des stations pour le motif domicile travail.	323
2-4) La variation des motifs de trafic	324
2-5) Répartition des correspondances par station dans la matrice de répartition	324
2-6) Des hypothèses vérifiées	325
3) Maillage et densité d'une ligne du réseau ferré parisien.	327
3-1) Station et accessibilité réticulaire.	327
3-2) La densité d'une ligne.	329
3-3) Effet de l'accessibilité sur la densité d'une ligne.....	331
4) Conclusion : Densité et trafic.....	332
Chapitre 9 : Existe-t-il des limites de densité autour des stations pour lesquelles le TC présente un avantage énergétique par rapport aux autres modes ?	333
Introduction.	333
1) Offre et taux de remplissage du réseau ferré RATP : une approche empirique.....	335
1-1) Effet de la hausse du taux de remplissage dans un véhicule : l'effet cumulatif.....	335
1-2) Baisse du taux de remplissage à offre constante dans une ligne	337
1-3) Variation de l'offre à trafic constant.....	339
1-4) Baisse de l'offre et du trafic à taux de remplissage constant	340
1-5) Compétitivité énergétique et taux de remplissage dans le cadre d'une densification.....	342
2) Densité et efficacité énergétique : l'exemple du réseau ferré parisien.....	342
2-1) Evaluation d'un taux de remplissage à partir du trafic entrant des lignes à offre constante	342
2-2) Du taux de remplissage aux densités à offre donnée.	344
2-3) Potentiel de densité à partir des taux de remplissage actuels.	345
2-4) Offre et potentiel de densité	346
2-5) Variation du potentiel de densité avec intégration des correspondances.....	346
3) Conclusion du chapitre : Intérêts et limites du modèle.	348
Conclusion section 2:.....	350
Conclusion partie 2.....	352
Conclusion générale : Territoires et sobriété énergétique à l'heure des pandémies en perspective	355
Densité et efficacité énergétique : une relation complexe multiscalaire	355
Quelles conséquences pratiques ?	355
Quelles recherches supplémentaires ?.....	357

Section 1 : La densité est-elle en relation avec les consommations d'énergie par habitant liées au transport ?

Introduction

Comment des agglomérations d'habitants modifient les efficacités énergétiques des voyageurs et des habitants ? La ville se distingue par une concentration d'habitants. Historiquement, la « forme urbaine » s'est définie à partir des densités (CLARCK, 1952). Plusieurs types existent monocentrique ou polycentrique. De nombreux travaux montrent une variation des consommations par habitants selon les densités en IDF (FOUCHIER, 1997) (LE NECHET, 2010). Elles seraient dues à une forme urbaine spécifique la forme urbaine monocentrique. La « réciproque de la conjecture de Morigridge » (POUYANNE, 2004) l'expliquerait. Néanmoins, la relation reste débattue.

Or des pics de densités apparaissent en IDF. Les flux (BERTAUD, 2003) montrent une transition vers une forme « mono-polycentrique ». La croissance des vitesses des réseaux pourrait l'expliquer. Les TC (métro, tramways en Banlieue) accompagnent l'extension de l'agglomération dès le début du 20^{ième} siècle. Ils sont un outil de planification de la forme urbaine (BOURILLON, 1995). Ils précèdent parfois ou non des densifications. La diffusion de l'automobile et son rôle dans la « deuxième transition urbaine » (WIEL, 1999) est largement présentée comme le facteur principal de la densification diffuse. La frontière rural-urbain s'estompe, la disjonction de l'activité et de la résidence spatiale crée des flux de déplacement et des polarisations. L'énergie se transforme en vitesse (ILLITCH, 1973). La hausse des consommations des carburants serait donc un signe de la modification des vitesses issu du « système automobile » dont la « dépendance » (DUPUY, 1999) empêcherait le développement du TC. Aussi la densité modifie-t-elle l'efficacité énergétique des déplacements des modes urbains TC VP en IDF ?

Ensuite, même dans une forme monocentrique, si la distribution des densités modifie l'efficacité énergétique du déplacement au travers des parts modales, alors elle modifie les préférences des individus. Aussi, comment les densités modifient les préférences des individus ? En théorie économique des transports, ces préférences dépendent des coûts généralisés (QUINET, 1995) même s'il existe d'autres approches (KAUFMANN, 2000) (BONNEL, 2002) (ROCCI, 2007), (VINCENT, 2010), (MUNAFO, 2017) (DELAUNAY, 2019). Nous supposons donc que si les densités modifient les parts modales, alors elles modifient les coûts généralisés. Plusieurs approches, agrégées, désagrégées existent.

Nous choisissons la fonction d'utilité du modèle GLOBAL qui est un modèle de déplacement avec des coûts généralisés qui ont déjà fait l'objet d'une étude sur la région IDF (GUEGUEN-AGENAIS, 2008). Cette démarche est cohérente avec notre méthode puisque nous utilisons les déplacements et la consommation par déplacement comme indicateur d'efficacité.

Elle est aussi cohérente avec notre sujet puisque le modèle GLOBAL a été utilisé pour les évaluations de trafic du Grand Paris (section 2).

Chapitre 5 : L'organisation spatiale de l'Ile-de-France permet-elle d'expliquer la relation entre densité de population et efficacité énergétique ?

Chapitre 6 : La densité entraîne-t-elle une modification des parts modales TC ? Une approche par les coûts généralisés du modèle global.

Chapitre 5 : L'organisation spatiale de l'Ile-de-France explique-t-elle la relation entre densité de population et efficacité énergétique ?

Introduction : Une relation débattue.

Divers travaux montrent que la densité d'habitants modifierait leur consommation d'énergie. En raisonnant selon les gradients de densité, ces relations viendraient d'une « forme urbaine » particulière : la forme monocentrique (POUYANNE, 2004). Aussi les densités d'habitants modifient-elles les consommations par déplacement en IDF ?

La notion de forme urbaine est polysémique (LE NECHET, 2010) (PELE, 2018). Historiquement, les premiers modèles de « forme urbaine » sont issus des gradients de densité. Plusieurs types d'approches, monocentrique, polycentrique, sont développés et rendent compte des variations de l'occupation des sols. La forme urbaine monocentrique (POUYANNE, 2004) expliquerait la modification des efficacités énergétiques. Plusieurs travaux ultérieurs vont dans ce sens (LE NECHET, 2010) (PELE, 2018). De nombreuses études montrent la relation entre les densités et les variables temporelles (part modale) et spatiales (portées) dans cette forme monocentrique. Il existerait, selon les densités, une réciproque à la conjecture de Morigridge. La vitesse de la VP diminuerait, renforçant l'attractivité du TC (ENAULT, 2003) (POUYANNE, 2004). Ensuite, une variation de forme urbaine modifierait la relation entre densité et efficacité énergétique (LE NECHET, 2010). Pourtant, les problèmes de méthode (zonage effet d'échelles...) interrogent la relation.

La région IDF renverrait à une organisation mono-polycentrique. Une dispersion des activités et des habitats est en œuvre. Des polarisations à petite et grande échelle apparaissent. Elles dépendent des formes réticulaires. L'augmentation des vitesses ouvre à la dispersion des activités et des habitats que l'effet rebond pourrait traduire. Aussi, les densités modifient-t-elles l'efficacité énergétique en IDF à l'échelle régionale ?

Par « échelle régionale » nous entendons **un périmètre régional selon plusieurs maillages**. Selon les différentes villes de la base UITP, la relation entre la densité et l'efficacité énergétique des habitants est faible voire inexistante. Néanmoins, elle se retrouve en IDF, l'existence de l'effet de rebond explique la modification des consommations par habitant en grande couronne mais des résultats surprennent du point de vue des portées. Il existe toujours une relation entre densité et efficacités énergétiques à l'échelle des secteurs.

Néanmoins, elle se distingue selon les modes dans leur rapport aux variables spatiales (portées) et de choix modaux (parts modales). Si les densités modifient les parts modales, dans le sens de l'efficacité, ce n'est pas le cas des portées de la VP.

Deux revues de littérature précèdent l'étude.

Nous examinons la notion de forme urbaine et interrogeons la relation entre densité et efficacité énergétique dans une forme monocentrique.

Nous montrons ensuite que la forme urbaine en IDF est mono-polycentrique c'est à dire regroupant du point de vue des flux à la fois des caractères de la forme monocentrique mais aussi polycentrique.

Ensuite, nous étudierons alors la relation densité efficacité énergétique en IDF à partir des secteurs EGT.

1) Forme urbaine monocentrique et efficacité énergétique

1-1) Formes urbaines et flux

Les définitions de la « forme urbaine » varient selon les travaux : elle est « la structure spatiale des activités humaines » (LE NECHET, 2010), « le système de localisation des ménages et des activités décrit par ses caractéristiques morphologiques et fonctionnelles » (PELE, 2018). Elle est d'abord issue des répartitions de densité au travers des modèles monocentrique et polycentrique (ENAULT, 2003) (POUYANNE, 2004). Elle renvoie aussi à une qualification par les flux de la forme urbaine (BERTAUD, 2003) où « polycentrisme relationnel » (SCHNEE, 2014) est complémentaire du polycentrisme morphologique que les répartitions de densités définissent. (Cf Figure 24).

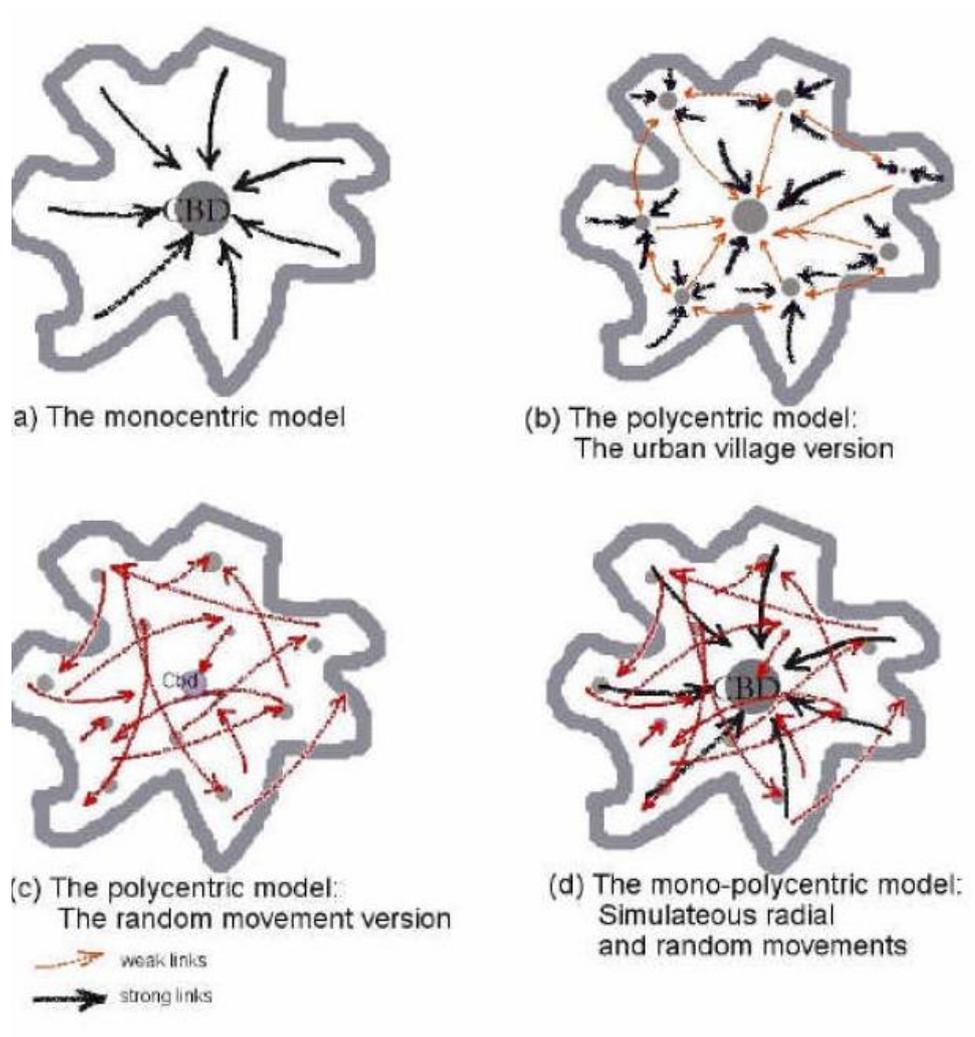


Figure 24: modèle de répartition des flux.

Source : Bertaud

Les modèles monocentriques dépendent d'une polarisation centrée des activités (CBD) et d'un réseau radioconcentrique (distance au centre). Cette centralisation conduit à des flux de transport convergents. The urban village version renvoie à une polarisation selon des centres déconcentrés comme la création des villes nouvelles programmées par l'Etat (CHALINE, 1985).

The random movement version à une diffusion des flux sur la zone. Elle suppose alors une dispersion des densités ou le modèle polycentrique « non planifié » des « edges cities » (GARREAU, 1991).

Le modèle mono-polycentrique conjugue les formes monocentrique et polycentrique dont les modèles sont construits à partir des densités brutes.

1-2) Modèles monocentrique et polycentrique.

1-2-1) L'indicateur densité.

Venant du latin *densitas*, « épaisseur », la densité est un concept employé dans plusieurs sciences, physiques et sociales. En physique, elle exprime un rapport entre une masse volumique, gazeuse, liquide, ou solide et celle d'un corps de référence (l'eau pour les liquides et les solides et l'air pour les gaz). Elle est utilisée couramment en thermodynamique (au travers des transformations de phase) ou en mécanique des fluides. En sciences sociales, elle exprime un rapport théorique entre une quantité ou un indicateur (nombres d'hab, d'emploi, d'entreprises, de mètre carré de plancher etc...) et l'espace occupé (surface de terrain ou autre indicateur géographique à différente échelle).

L'Anglais G Scrope l'a utilisé dès 1833 (NOIN, 1994). C'est le ratio entre population résidentielle totale (P) et la surface spatiale qu'elle occupe S ou densité brute (Cf Equation 83).

$$\mathbf{D = P/S (83)}$$

Source C Enault

Sa pertinence dépend de l'échelle utilisée, du lieu, voire de la temporalité. Les densités diurnes et nocturnes s'opposent (RONCAYOLO, 1997). Le contenu (numérateur) et le contenant (dénominateur) la composent (FOUCHIER, 1997). La densité d'activité humaine cumule les habitants et les emplois au Lieu de Travail (LT) des zones (FOUCHIER, 1995)(Cf Equation 84)

$$\mathbf{D_n (N+E) = P/S_n + E/S_n = P+E/S_n (84)}$$

Source Enault

Où P est la population, E le nombre d'emplois et S_n la surface nette. La DAH (densité d'activité Humaine) évite les « cratères de densité » des modèles monocentriques. En effet, les hyper centres ont une faible densité résidentielle. Néanmoins, le cumul des habitants et des emplois fait double compte dans une agglomération (FOUCHIER, 1997). Une personne travaillant à domicile ou dans sa commune sera comptée deux fois. Plus l'échelle est petite, plus les doubles comptes augmentent. De plus, des mécanismes internes touchant la mobilité (substitution d'un résident à un emploi par exemple) apparaissent au cours du temps sans modifier la mesure. Enfin, les répartitions d'emplois et d'habitants ont des logiques spatiales différentes. Les emplois dépendent de la localisation des entreprises (BRUEKNER & al, 2002) et les résidents de leur arbitrage individuels (CAVAILHES & al, 2002). La désindustrialisation et l'éclatement des CBD (Central Business District) (SASSEN, 1991) modifient les répartitions spatiales des emplois et des employés et donc les mobilités. La densité d'emploi peut entraîner la densité résidentielle et réciproquement (GIILI, 2004).

Ph.Deryck (1999) note l'existence d'une formule intégrant la notion de circulation à la densité (ENault, 2003).

Les densités mouvantes, définies selon la circulation observée dans la journée s'y ajoutent (BORDUEIL, 1995), (MILLE, 2000). Cette approche ajoute la densité de circulation à la DAH posant le problème de sa signification. Plusieurs phénomènes différents, agrégés, ne clarifient pas les interactions existantes entre elles. D'autres mesures excluent les surfaces viaires comme les densités résidentielles nettes (Cf Equation 85).

$$Dn = P / (Sr) \text{ (85)}$$

Source Enault

Elles excèdent les densités résidentielles brutes. La relation entre les deux, la plus souvent observée, est de la forme Population = Densité x (Surface)^{2/3} (MATTEI & PUMAIN, 1998). L'INSEE a découpé certaines communes en îlots (découpage le plus fin qui soit disponible) et en IRIS (îlots regroupés selon des indicateurs statistiques) (CERTU, 2002). L'îlot INSEE résulte d'un découpage assimilé à des pâtés de maisons. Il regroupe un ensemble de parcelles attenantes expurgées de la voirie et des îlots vides à la périphérie d'espace bâti. Les communes de plus de 10 000 habitants, et certaines comprises dans les agglomérations de plus de 50 000 habitants, font l'objet d'un découpage en îlots. Le découpage en IRIS-2000 correspond au découpage de la commune en quartiers dont la population se situe entre 1 800 et 5 000 habitants. Ils sont formés, le cas échéant, en regroupant plusieurs îlots. La mesure de la densité au quartier est évaluée au 1/25000, elle est retranscrite au 1/100000 soit une division par 4. Cet agrandissement de l'échelle prend en compte partiellement la forme du bâti. En effet, des tours agglomérés ont plus de population que les pavillons. Elle extrait les surfaces supérieures à 16 Hectares attachées aux zones industrielles. La densité est aussi une distance moyenne entre les individus. En effet, s'ils se répartissent aléatoirement selon une moyenne globale de d individus par unité de surface circulaire, ils sont théoriquement séparés par $1/2\sqrt{d}$ unités de longueur (CANARD & POINSOT, 2004). Cette méthode « du plus proche voisin » passe de la densité à une distance moyenne entre ses contenus. Ce passage ne préjuge pas de la réalité de la distribution dans la surface envisagée ni de sa forme posée comme circulaire, d est le rayon du cercle. Il suppose une répartition uniforme des habitants dans la surface circulaire.

Sur son échelle de référence (S) la densité est un indicateur de concentration spatiale répartie uniformément. Entre répartition et concentration, l'indicateur est ambigu. Dans les modèles monocentriques, l'indicateur densité renvoie à l'habitat c'est donc la densité brute.

1-2-2) L'intervention de l'Etat : les Villes nouvelles en IDF

1-2-2-1) Les villes nouvelles

La mainmise du pouvoir royal sur la ville de Paris conduit à la première définition d'un réseau radioconcentrique. Les fortifications successives de la ville ont parfois donné naissance à des voies de circulation (APUR, 2011).

Le percement de radiales (grandes routes du roi) polarise l'agglomération. Plus tard, les aménagements du Baron Haussmann utilisent le chemin de fer qui s'adressaient aux classes favorisées. Le week-end à la campagne devient la mode. Au travers des résidences secondaires, une première expansion urbaine vers l'ouest de Paris s'ensuit. Après la première guerre, les problèmes du logement s'aggravent, le développement désordonné de la banlieue (LARROQUE & Al 2002) étouffe Paris. L'accroissement de la population des années 20 s'accompagne de l'apparition massive des migrations pendulaires quotidiennes domicile-travail. Ils progressent au cours du temps (90000 en 1901, 247000 en 1921, 3430000 en 1926, 447000 1931). Le conseil général coordonne l'extension des TC avec l'aménagement méthodique des espaces libres pour structurer rationnellement la banlieue. Le peuplement de la zone suburbaine proche apparaît suffisamment dense pour justifier les prolongements de métro extra-muros. Francois Latour expose un vaste programme combinant aménagement urbain et transport portant sur 15000 ha de terrains libres en banlieue pour 1.5 millions d'habitants. Mais dès 1924, le Sénat ampute le projet et l'asphyxie financièrement. Des dispositions de droit commun, qui ne conviennent pas à des opérations d'aménagement de grande envergure, l'entravent. La colère grandit trouvant un écho politique. Le plan Jayot 1929 spécifie les prolongements et la complémentarité des divers réseaux dans un contexte défavorable au tramway. Les 15 prolongements représentent un total de 33 Km et privilégient l'autobus. Les communistes veulent une extension du métro ce qui ajourne le projet. Pour le Front Populaire, les politiques de logement et de transport doivent se coordonner. Seuls 7 des 15 prolongements prévus sont achevés en 1938 dont 4 en banlieue ouest. Tous desservent des communes à caractère résidentiel. Les villes industrielles ont été négligées. Les déséquilibres se creusent, de nouvelles lignes ont été mises en fonction à l'intérieur de Paris pourtant déjà bien pourvu. En 1939, le réseau atteint 160 Km dont seulement 18 en banlieue. Le plan Jayot acquiert force de loi la même année après la création du comité des transports Parisiens en 1938 qui constitue l'embryon d'une politique de coordination. La libération entraîne une vague de nationalisation dont la RATP avec un monopôle limité à sa zone d'action. S'y ajoute la création de l'ORTP (office régional des Transport Parisien) qui définit un plan de transport en 1949. Des transversales est-ouest et nord-sud, futures lignes de RER, idée qui avait germé dès les années 20, apparaissent. Néanmoins, le plan est revu à la baisse, le prolongement à la défense est ajourné malgré de nouvelle construction (Palais des expositions futur CNIT et HLM), les lignes de RER ne sont pas réalisées. Un seul prolongement du métro intervient en 1950 et le renouvellement du matériel roulant est faible. Seules les lignes 11 et 13 en bénéficient. Les équilibres financiers font débat, l'Etat avance l'insuffisance des économies de personnel, alors que les effectifs ont décréu 42000 en 1938 contre 33833 en 1949, la gauche propose de faire payer les entreprises, quand la droite veut faire payer les usagers. Néanmoins, la crise du logement est importante et des bidonvilles existent aux portes de Paris. Le gouvernement Gaulle lance le chantier des villes nouvelles. Ce projet renoue avec les utopies urbanistes (CHOAY, 1969) pour résoudre des problèmes sociaux et économiques.

Leurs créations touchent d'autres pays, en URSS avec 1200 villes bâties (CHALINE, 1985) avec des modèles différents.

Leur objectif était de redistribuer spatialement la croissance économique et répondre au désordre du développement urbain, et à l'étalement, visible dès 1965 (RONCAYOLO, 2001). Elles projettent à la fois une densité d'habitant, d'emploi et de nouvelles centralités.

Aussi, la densification est envisagée avec les économies d'échelle qu'elles procurent dans le logement. A Paris les « pôles restructurateurs » fissionnent la centralité de la capitale. Ils connaissent des fortunes diverses. Certains accueillent de nouvelles préfectures (Nanterre, Créteil et Bobigny) ou reçoivent des équipements (Palais de justice, centres hospitaliers universités nouvelles, centre commerciaux régionaux...). Les autres développent des fonctions centrales partielles soit par un centre commercial (Rosny, Velizy, Belle épine) soit par de nouvelles universités (Villetaneuse pour les pôles Saint Denis par exemple, Orly et Rungis restent à part du fait de l'aéroport et du Marché d'Intérêt National). A la fin des années 1980, l'agglomération parisienne a une structure qui combine une polarisation parisienne principale et des pôles secondaires en périphérie. Le polycentrisme voulu par les concepteurs du SDAU devient une réalité. La centralité parisienne se conserve et avec elle une forte activité issue de l'emploi tertiaire qui compense la désindustrialisation. Si une diffusion de l'emploi est notable, elle reste sélective puisque les fonctions de contrôle restent dans Paris (VIRE, 1998) ce qui était un des objectifs du maintien de cette centralité par la sélection des activités « nobles » (STEINBERG, 1981). Des oppositions fortes ont contraint le projet qui impliquait aussi une restructuration des zones administratives modifiant les pouvoirs locaux. De plus, la croissance démographique était inférieure aux projections, la crise économique a limité l'implantation d'entreprises. Enfin, elles ont fourni un support (RONCAYOLO, 2001) à la dissémination urbaine. Si le bilan est mitigé, le polycentrisme est planifié en IDF. Il n'était pas une donnée des marchés fonciers.

1-2-2-2) Des modes assujettis aux sols à l'échelle régionale.

La planification des années 60 en IDF a porté sur les modes avec la complémentarité de la voiture et du TC selon les territoires. Ainsi, « Pour les liaisons à l'intérieur de Paris et dans la proche banlieue densément peuplée, la priorité doit être donnée aux transports collectifs. Le confort, la fréquence et la vitesse moyenne du métro et des bus doivent y être nettement améliorés. De même, les liaisons entre Paris et le reste de la région urbaine doivent être assurées préférentiellement par des transports en commun. ». De plus « l'extension de l'agglomération ne devant pas s'accompagner d'un allongement des temps de transport, il est prévu de développer un Réseau Express Régional, nouveau réseau ferré de banlieue à haute vitesse (vitesse moyenne 40 à 50 km/h au lieu de 25 pour le métro) et à fréquence élevée, dont les lignes traverseront Paris de part en part, en ayant 4 ou 5 points de correspondance avec le métropolitain. Ce réseau comportera une ligne Est-Ouest, deux lignes Nord-Sud et deux tangentiels, une au Nord et une au Sud. » (MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2010).

Aussi, « les zones d'urbanisation nouvelles seront conçues pour une utilisation dominante de l'automobile mais des possibilités de transports en commun seront également offertes, par fer le long de l'axe urbain principal ou par route (autobus) pour les autres dessertes internes. »

Enfin, « les échanges interurbains de banlieue à banlieue étant très souvent impossibles à assurer de façon efficace par des transports en commun vu la dispersion de la population concernée, ils seront effectués de façon dominante par voie routière, sauf pour quelques liaisons tangentielles importantes qui induiront un trafic suffisant pour justifier une liaison ferrée. Un réseau routier maillé, sur lequel sera organisé un système de transports collectifs, devra assurer ces échanges. » La voiture est donc privilégiée dans les zones de faibles densités. Le besoin de « densité pour le TC » l'exclut « mécaniquement » de territoires dont l'urbanisation ne permettrait pas le déploiement. Des tâches différenciées sont attribuées à chaque réseau. Le TC se voit assigner une mission de desserte régionale à larges mailles, avec des capacités et des vitesses commerciales élevées ainsi qu'un minimum de rupture de charge, d'où le choix, de lignes transversales. Le RER dessert des pôles tels que la défense ou l'aéroport d'Orly. Le métro et l'autobus à plus petite maille desservent les zones denses.

Néanmoins, les infrastructures routières sont les principales gagnantes de ce projet. En effet, l'équipement routier assure l'équipement interne et externe des villes nouvelles. Toutes sont desservies par des autoroutes ou des voies rapides d'intérêt régional ou national. Le plan comporte l'ouverture de 1140 km de voies nouvelles, l'élargissement et l'aménagement de 2500 km de routes nationales et de chemins départementaux existants. Trois types de réseau sont conçus, primaire, constitués de voies rapides, dont les dessertes sont espacées de 2 à 6 Km, secondaire reliant les villes et irriguant le réseau primaire et le réseau local qui dessert la ville. Pourtant, des restrictions budgétaires amputent ce réseau des radiales et des percements prévus de la ville de Paris (MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2010). Même s'il existe des rocade de contournement, le réseau routier, comme le réseau de TC, est radioconcentrique sur son réseau primaire. Aujourd'hui, ces effets se retrouvent dans la mobilité. Les navettes des villes nouvelles vers Paris restent importantes même si elles se réduisent (BERROIR & Al 2004). Le réseau routier et l'automobile sont les dénominateurs communs des développements en zone non dense, puisqu'ils permettent le déplacement des marchandises et de la main d'œuvre. Il est résilient et adaptable. Il est moins coûteux, voire bénéficiaire en France, en termes de ressource publique, puisque la fiscalité sur les transports individuels compense les dépenses d'investissement (MERLIN, 1991) ce qui n'est pas le cas des TC.

1-2-3) La production des densités par le marché : modèles monocentrique et polycentrique.

H.Bleicher (1892) fut le premier à observer un lien entre la distance et densité de population. L'expansion urbaine est modélisée à partir des densités par la relation (CLARCK, 1952). La formule peut être « linéarisée » par un logarithme népérien. (Cf Equation 86)

$$D(u) = D e^{-\gamma u} \quad (86)$$

Source C Enault

La relation $D(u)$ est la densité à une distance u du centre, γ le gradient de densité, u la distance radiale au centre de l'agglomération et D la densité au centre de la ville. Le gradient de densité est le coefficient de régression. Les modèles monocentriques prennent en compte diverses formes urbaines. Tanner (1961) et Sherratt (1960), préconisent plutôt l'usage d'une fonction de densité du carré de la distance (ENAUULT, 2003). Newling (1969) propose trois formes (Cf figure 25, 26, 27) qui renvoient alors au paramètre a (négatif nul ou positif). (Cf Equation 87) :

$$D(u) = D e^{au-bu^2} \quad (87)$$

Source C Enault

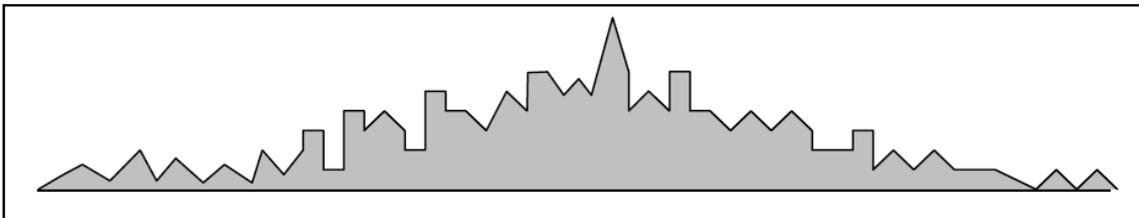


Figure 25: forme urbaine a négatif

Source C Enault

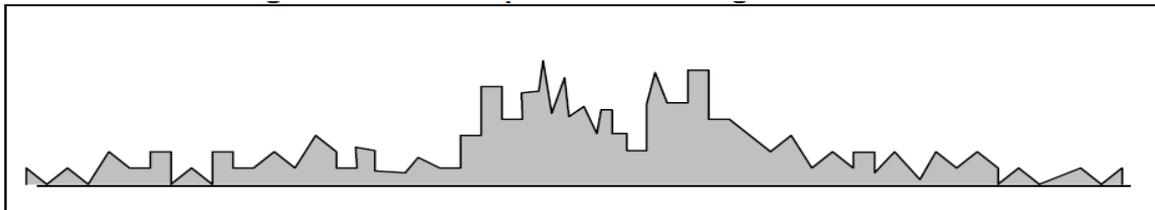


Figure 26 : forme urbaine a nul

Source C Enault

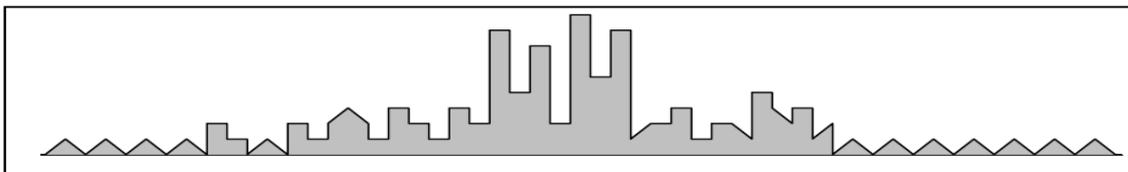


Figure 27: forme urbaine a positif

Source C Enault

A ce modèle de décroissance des densités est alors associé un gradient de rente pour décrire la répartition des habitants par rapport à un centre d'activité ou central business district (CBD). Les noms d'Alonzo (1964) Muth (1969) et Mills (1972) sont associés aux modèles monocentriques (POUYANNE, 2004) que des mailles concentriques spécifient. Les flèches représentent la répartition des habitants selon la distance de parcourt pour faire l'activité. (Cf figure 28).

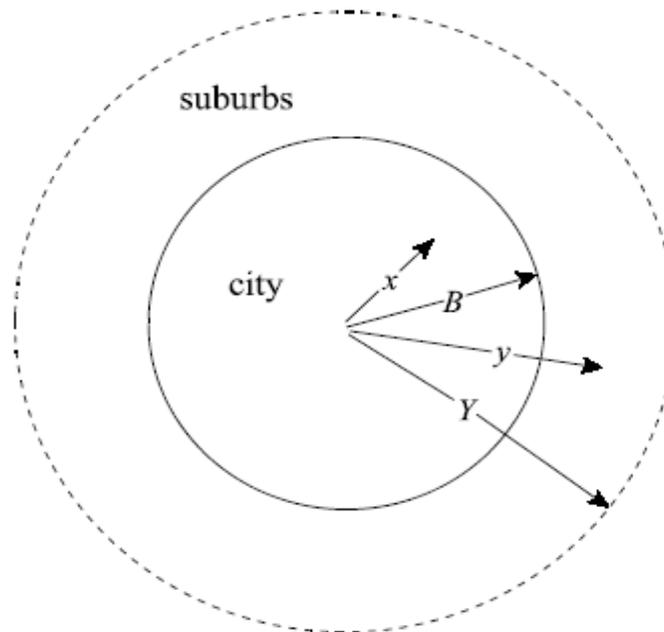


Figure 28: morphologie du modèle

Source : Poyanne

Les hypothèses associées aux modèles monocentrique :

1. La concentration des emplois dans le centre de la ville (CBD)
2. L'homogénéité spatiale : la surface des logements et l'espace sont uniformes.
3. La continuité spatiale, la localisation résidentielle est possible en tous points. Les facteurs sont parfaitement mobiles, ce qui revient à dire qu'il n'y a ni coûts ni délais de réaffectation de l'espace.
4. L'isotropie spatiale qui suppose « un coût de transport indépendant de la direction empruntée », les temps d'accès sont identiques quelle que soit la direction. Il n'existe qu'une seule catégorie d'agents, les ménages, dont les goûts sont homogènes et les revenus identiques.
5. Pour se localiser, les ménages arbitrent entre une force qui les attire vers le CBD (les coûts de transport, croissant avec la distance), et une force qui les repousse (le coût du logement, déterminé par la rente d'accessibilité).
6. L'équilibre est atteint par le biais d'un mécanisme d'enchères, suivant le principe de concurrence pour l'usage des sols, selon lequel la terre va au plus offrant.

C'est un modèle d'interaction entre deux éléments disjoints, l'activité et l'habitat particulièrement adapté au motif domicile travail. Selon la distance au centre (CBD (Central Business District)), les habitants paient une rente décroissante et des coûts de transport croissants (GUDORF & al, 2007). Le marché du foncier fonctionne en concurrence pure et parfaite, les enchères sont permanentes. Le gradient de rente dépend alors du gradient de densité Y qui est une constante et représente le taux de décroissance d'habitants selon la distance au centre (POUYANNE, 2004) (Cf Equation 88).

$$Y = E R(x)^{a(1+b)} \quad (88)$$

Avec a = distance au centre b = élasticité prix de la demande de logement. Avec le gradient, la densité explique la rente dans l'espace urbain.

Il représente le montant maximum qu'un résident est prêt à déboursier pour obtenir une unité de sol à une distance x du centre et pour une utilité U (POUYANNE, 2004). Le rôle de l'accessibilité au centre (où par hypothèse sont regroupés les emplois) dans les décisions de localisation des ménages y est montré : Le loyer et les coûts de transport sont deux termes complémentaires. Aussi les prix de l'immobilier intègreraient au moins partiellement les coûts de transport (COULOMBEL & LEURENT, 2013). Néanmoins pour l'IDF, les deux dépenses rente foncière et coûts de transport seraient indépendantes (COULOMBEL & LEURENT, 2013). D'autres éléments interviennent dans les décisions. Nous ne citons que quelques auteurs. Les aménités sont les avantages d'une localisation spécifique d'une entreprise ou d'un ménage (BRUEKNER & al, 2002). Elles sont sociales, naturelles ou modernes. Les aménités historiques viennent des monuments, et d'infrastructures héritées appréciées des habitants actuels de la ville, les aménités naturelles du site et de l'environnement offert, les aménités modernes de l'environnement économique et social. Pour les aménités historiques ou naturelles, deux cas se présentent :

1. Une décroissance rapide des aménités du centre vers la périphérie, ce qui renverse les facteurs, rente et coût de transport. Si le centre a un fort niveau d'aménités historiques ou naturelles alors les riches se localisent au centre.
2. Si le niveau décroît faiblement ou stable une localisation des riches à la périphérie.

Ainsi, la valorisation patrimoniale de Paris vis-à-vis de Détroit justifierait la différence de localisation des ménages. Ensuite vient la division sociale, les riches restent entre eux (PINCON, 2004), l'appropriation de certains secteurs de la ville par des classes sociales définies (gentrification), parfois encouragée par les pouvoirs publics, (BIDOU ZACHARIASEN, 2003), la « fuite de la rouille », euphémisme évoquant la désindustrialisation (la rouille des industries) (SASSEN, 1991) ou le critère racial (Le noir devenu chômeur avec la désindustrialisation) (ROSE-ACKERMAN, 1975). Les mécanismes du marché fonciers encouragent la ségrégation. En effet, la rente urbaine produit la division économique et sociale de l'espace excluant certains quartiers des populations pauvres par le revenu (LIPIETZ, 1974) (TOPALOV, 1977).

La baisse des gradients de densité montrerait l'étalement urbain (POUYANNE, 2004). La densification diffuse (urban sprawl) renvoie alors à « l'extension d'un corps sur une surface » (RITCHOT & al, 1994). Trois éléments la traduisent (REDOR, 2007):

1. L'aspect nouveau de la croissance des villes issue des USA qui contamine l'Europe.
2. Des zones résidentielles discontinues, dispersées, à l'intérieur des zones à finalités agricoles situées autour et à proximité des villes (mitage) apparaissent.
3. Une sorte d'occupation irrationnelle de l'espace non planifiée, ni anticipée.

Cet urbanisme est très critiqué, autour de 4 approches (WIEL, 2010).

1. Par la construction du paysage. La préservation de zones naturelles qui deviennent inconstructibles limite la diffusion de l'urbanisation.
2. Selon l'équité sociale. Une ville étalée est ségréguée. La mixité sociale serait alors préférable dans le cadre d'un développement raisonné.
3. A partir des arguments économiques et financiers.
4. A partir des arguments environnementaux. La densification serait efficace énergétiquement, la baisse des vitesses relocaliserait les activités et les résidences.

Les modèles de densité polycentriques décrivent alors la dispersion des activités et des habitants et tentent d'expliquer (STEINNES, 1982) (ENALUT, 2003) l'apparition de « pics des densités » sur un territoire en dehors du CBD, par exemple en IDF au travers des activités (GASHET, 2001).

1-3) Relation avec les variables de l'efficacité énergétique.

Comment et par quels éléments une forme monocentrique modifierait les efficacités énergétiques ?

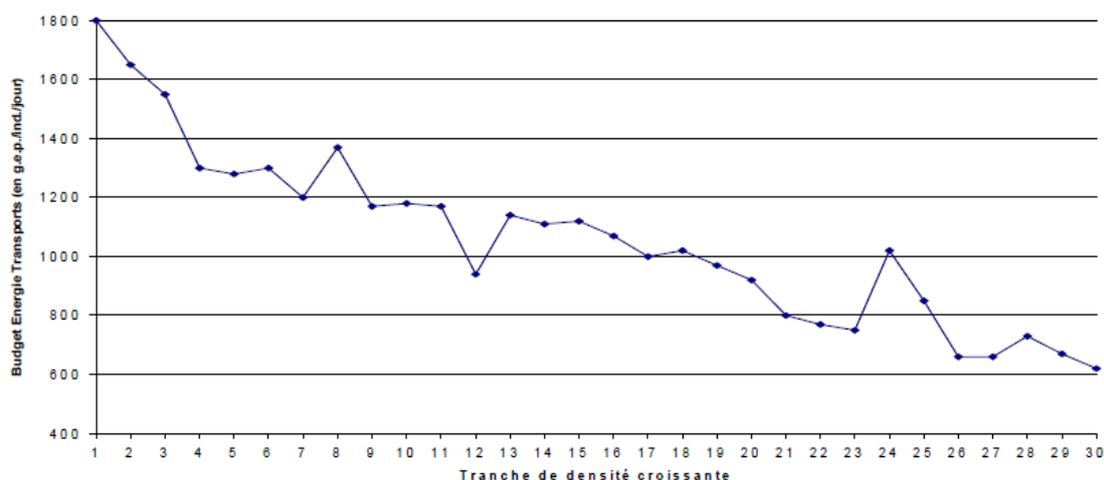
1-3-1) Densité et efficacité énergétique.

Plusieurs études internationales montrent la relation entre efficacité énergétique des habitants et densité. L'analyse de Newman et Kenworthy actualisée en 1998 (POUYANNE, 2004) porte sur 46 villes et non plus sur 36. Le coefficient de régression est important $R^2 = 0.85$. Une étude chronologique sur le même échantillon de villes confirme les résultats sur la possession et l'usage des véhicules (CAMERON, 2010). Avec un zonage concentrique de New-York, Newman et Kenworthy observent un écart de 1 à 5 dans les consommations d'énergie. La hausse de la densité de 25 hab/Hec à 50 hab/hect les diviserait par quatre. En IDF, plusieurs études relient densité et efficacité énergétique (GALLEZ, 1995, 2000) (FOUCHIER, 1997) (LE NECHET, 2010) à partir du BEED. Les zones de faibles densités consomment 3 fois plus que les autres (FOUCHIER, 1997). Néanmoins, une dispersion très hétérogène avec une surreprésentation de communes de faibles densités peut caractériser les densités résidentielles en IDF.

L'analyse par classes de densité, lisse leur distribution à l'origine de biais dans les résultats issus de techniques linéaires. Cette technique stratifie l'effectif global en classes d'égale amplitude. L'influence de la densité serait :

1. Négative sur les distances parcourues par personne ou par déplacement
2. Négative sur la part modale de la VP et positive sur celle des TC et de la MAP. (Cf Graphique 63)

Graphique 63: densité et budget énergie domicile travail IDF

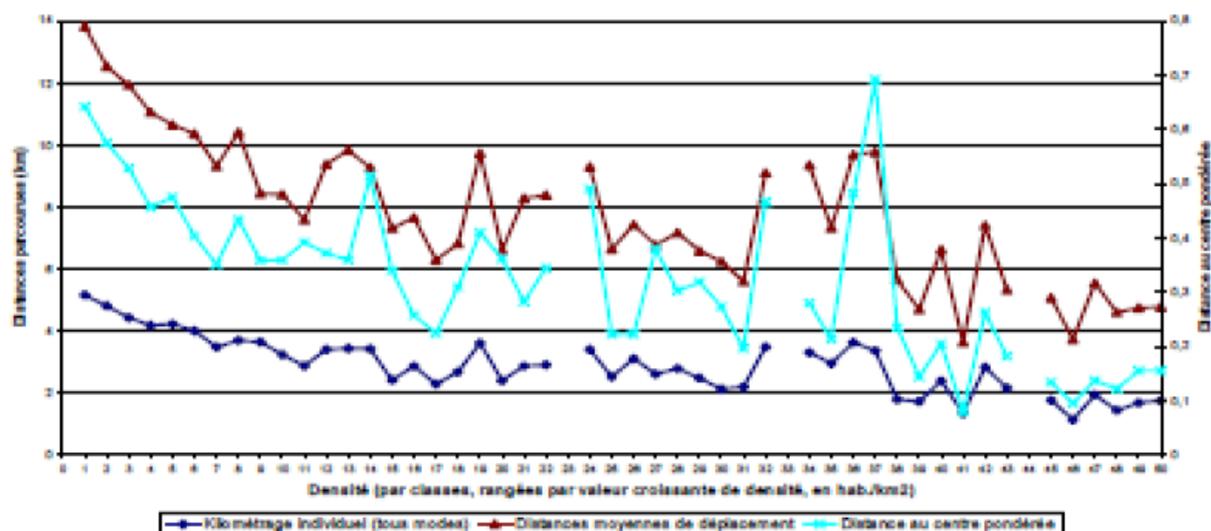


Source : Fouchier IDF

1-3-2) Variation des distances.

Selon ces classes, les distances parcourues en France et en IDF diminuent avec les densités (GALLEZ, 1995) (FOUCHIER, 1995) (POUYANNE, 2004) (LE NECHET, 2010) (Cf graphique 64)

Graphique 64 : distance au centre par classe de densité



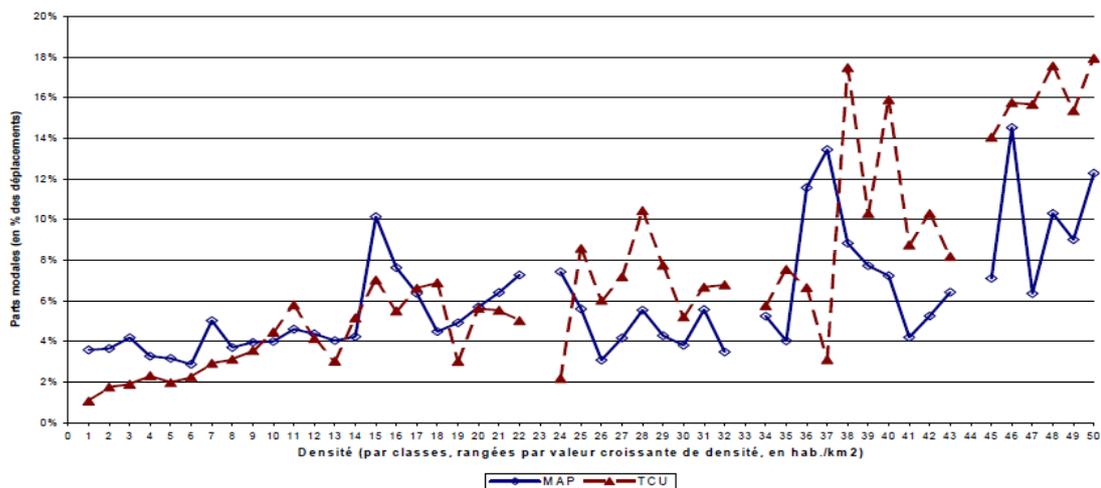
Source : Pouyanne

Néanmoins, le polycentrisme peut réduire les portées et d'économiser du carburant avec la colocalisation des habitats et des emplois (GORDON & RICHARDSON, (1997) (ALLAIRE, 2007). Ces organisations augmenteraient l'efficacité énergétique avec le rapprochement des centres d'intérêts (AGUILERA & PROUHAC, 2006). Néanmoins, les études effectuées sont peu probantes en termes synchroniques et diachroniques en IDF (AGUILERA & MIGNOT, 2004) (AGUILERA & PROUHAC, 2006) ou une croissance des distances à l'emploi est constatée ce qui rejoint alors des études à l'étranger (ALLAIRE, 2007) (LE NECHET, 2010).

1-3-3) Influence sur les parts modales.

Plusieurs études internationales et nationales spécifient une relation entre densité et parts modales, à la baisse pour les VP (POUYANNE, 2004), (LE NECHET, 2010) à la hausse pour le TC, (BARTER, 2000) (BONNAFOUS, 1996) (APEREC, 2007) pour les villes asiatiques, américaines et européennes. Plus les densités augmentent plus les parts modales des modes alternatifs à la VP augmentent (VIVIER & alii 2000). Le seuil au-delà duquel la part modale des TC se substitue à celle des VP serait de 30 hab/hec. Aussi, la densité modifierait les comportements de mobilité et favoriserait l'efficacité énergétique (NEWMAN & KENWORTHY, 1990). L'étude des six aires urbaines françaises confirme cette approche (POUYANNE, 2004) avec une analyse par classe de densités. Leur augmentation favorise les parts modales du TC et de la MAP. Néanmoins, pour le TC, si la variation entre les faibles classes (1 à 22) et les fortes classes semblent acquises (47 à 50) c'est moins le cas pour les classes intermédiaires (24 à 43). Pour la MAP, nous remarquons que des classes faibles (1 à 22) ont des parts aussi fortes que des classes moyennes (24 à 43) ou fortes. (Cf Graphique 65)

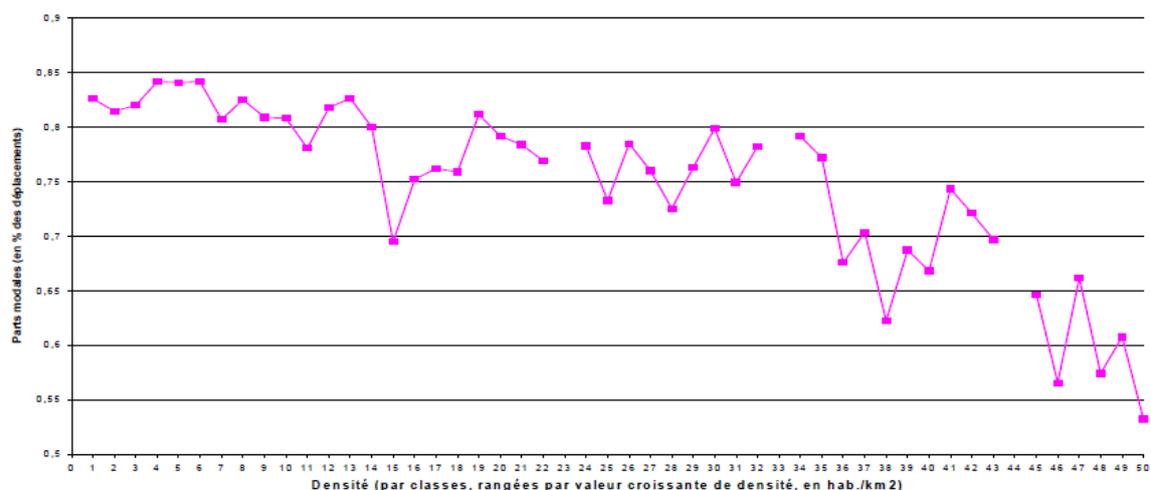
Graphique 65: parts modales des TC et MAP



Source : Pouyanne

Pour la VP, les relations suivantes sont obtenues (POUYANNE, 2004). (Cf Graphique 66)

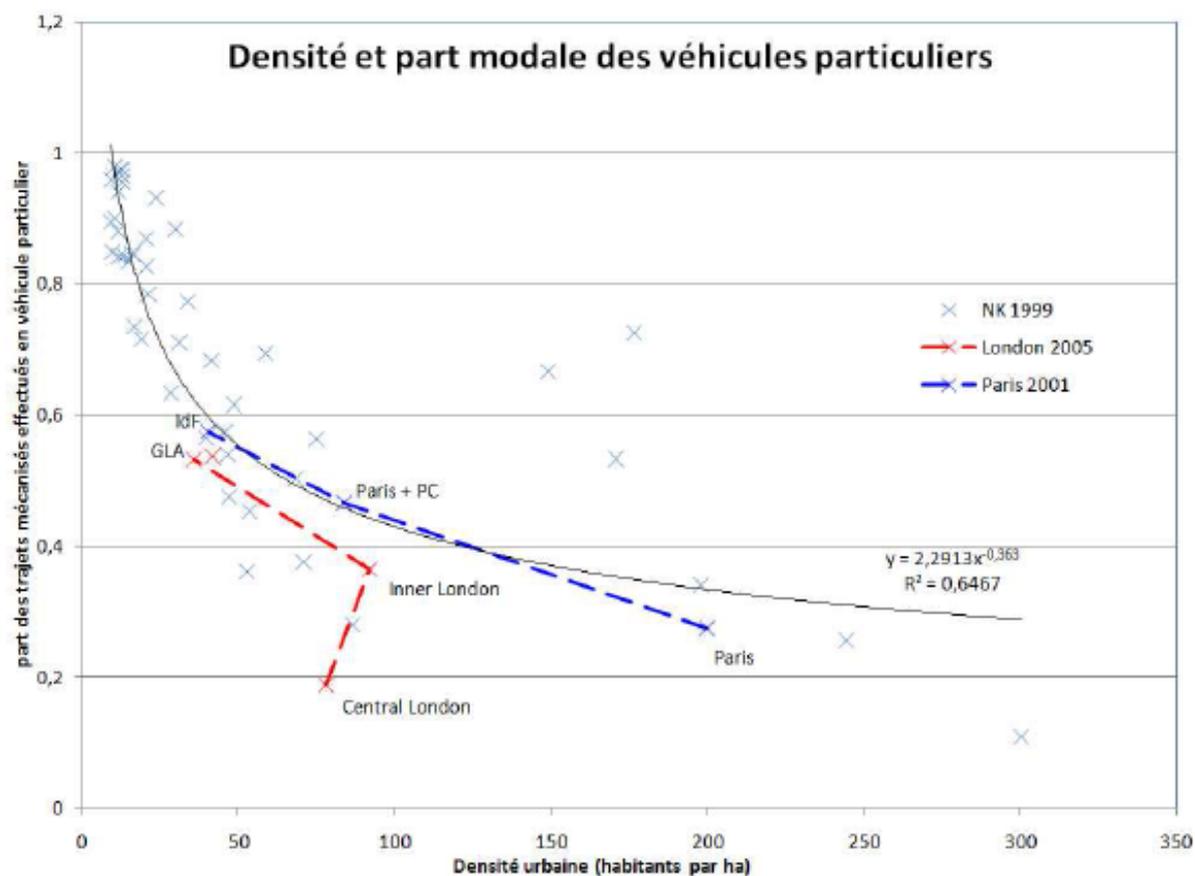
Graphique 66 : classe de densité et part modale VP



Source : Pouyanne

En IDF, le taux de motorisation augmente (FOUCHIER, 1995) avec la baisse des densités traduisant des comportements d'investissement différents des ménages des milieux denses ou non. La densité a un effet négatif sur les parts de la VP et positif sur celles du TC (LE NECHET, 2010). (Cf Graphique 67) :

Graphique 67: relation densité part modale VP



Source : Le Néchet 2010.

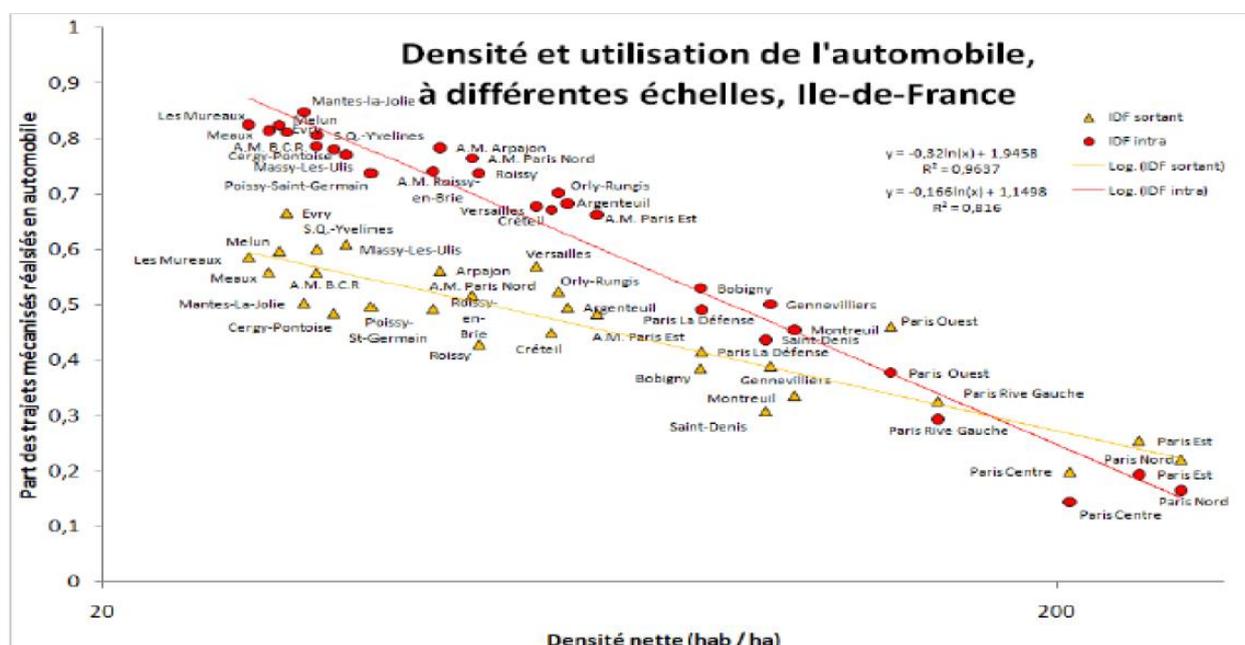
La densité brute est un marché potentiel pour le trafic du TC (PASSALACQUA, 2011). Avec l'insuffisance des densités, l'offre est absente. La dépendance serait spatiale et non réticulaire. Les faibles densités seraient donc inefficaces énergétiquement (NEWMAN & KENWORTHY, 1990).

1-3-4) Formes urbaine à l'échelle des communes.

1-3-4-1) Densité et usage à plus grande échelle

A plus grande échelle les relations obtenues entre densité et usage de la VP se retrouve (LE NECHET, 2010). Une forte interaction entre densité et trajet interne ($R^2 = 0.96$) ou externe ($R^2 = 0.81$) aux zones étudiées existe. Les résultats classiques en IDF, où le taux de motorisation (FOUCHIER, 1995) et l'usage de la voiture semblent fortement liés à la densité, se retrouvent (Cf Graphique 68)

Graphique 68: densité et usage de l'automobile

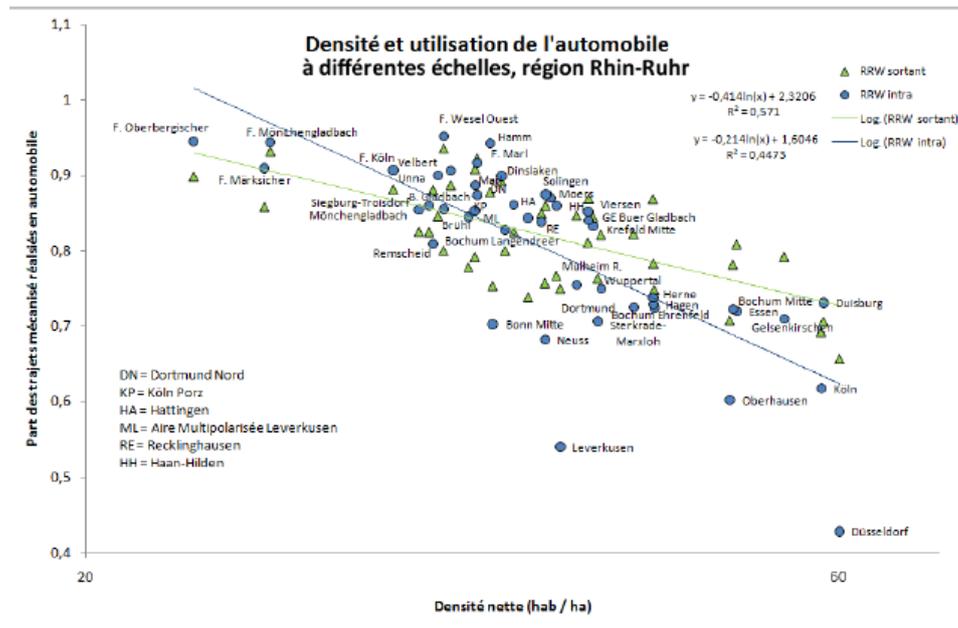


Source : Le Néchet

La comparaison avec la région Rhin-Ruhr, dont la forme urbaine est différente montre alors des résultats différents entre densité et usage de la voiture. La relation est moins pertinente l'usage de l'automobile et la densité sont moins corrélés ($R^2 = 0.52$) pour les trajets internes et ($R^2 = 0.44$) pour les trajets externes (Cf Graphique 69). Cela rejoint d'autres résultats antérieurs (POUYANNE, 2004), ou postérieurs, au travers de l'étude de l'agglomération de Lyon.

Les résultats des simulations effectuées montrent une plus forte croissance des taux de motorisation et des parts modales en faveur de la voiture dans les scénarios polycentriques et étalés que dans la ville monocentrique (PELE, 2018).

Graphique 69: densité et utilisation de l'automobile région Rhin-Ruhr



Source : Le Néchet

Aussi, la forme monocentrique impliquerait une croissance de l'efficacité énergétique et, selon les formes urbaines, la relation peut disparaître à plus grande échelle (LE NECHET, 2010).

1-3-4-2) L'hypothèse de complémentarité.

Les formes locale et globale interagissent de concert dans le cadre monocentrique. « L'hypothèse de complémentarité » (LE NECHET, 2010), (MIKALIS & al 2015) (PELE, 2018) les dissocie. Pour certains motifs de déplacement, le domicile travail, les déterminants sont régionaux (localisation des emplois) tandis que pour les autres motifs, les déterminants sont locaux (achats). Les déplacements locaux étant soumis à l'aménagement local tandis que les déplacements régionaux renvoient à une forme globale régionale (MIKALIS & al 2015). A partir des véhicules kilomètre effectués, l'analyse se centre alors sur une réflexion autour des budgets mobilités tant en termes de coûts du temps que monétaire. Si les déplacements obligés répondent bien au modèle, l'hypothèse n'est pas confirmée pour les loisirs (MIKALIS & al 2015).

1-3-5) Forme monocentrique et vitesse : la réciproque de la conjecture de Mogridge.

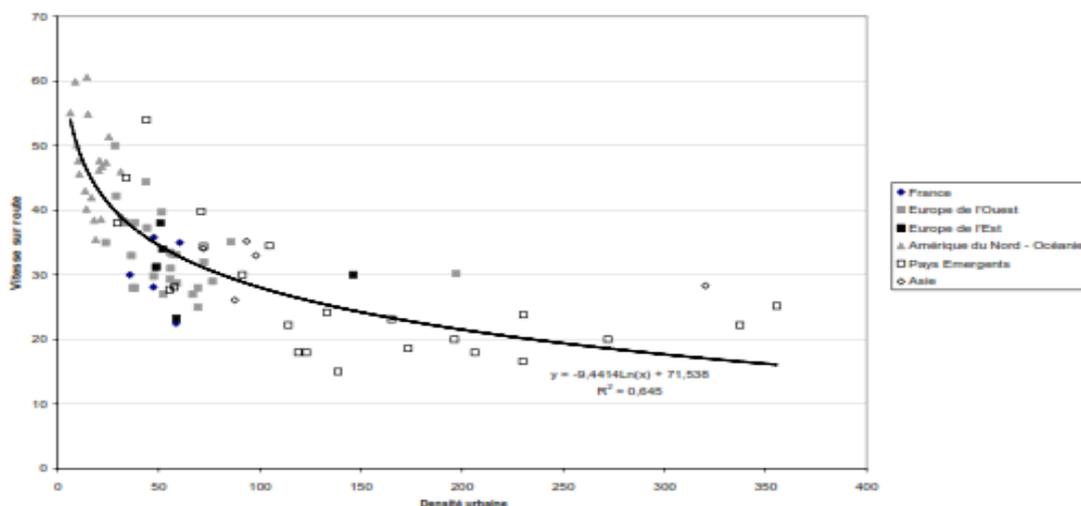
La conjecture de Mogridge postule qu'augmenter les infrastructures réticulaires en milieu congestionné n'augmente pas la vitesse moyenne des VP et du TC. Cette croissance induirait, avec les reports modaux, un « calage » de la vitesse moyenne en VP sur celle du TC (CLEMENT, 1995). En effet, en situation de congestion, tout accroissement de l'offre viaire augmente la vitesse moyenne en VP. Avec la nouvelle offre, les usagers des TC changent de mode de transport du fait que l'automobile va plus vite. La perte de voyageurs baisse les recettes et diminue l'offre en TC, qui s'ajuste au nouveau niveau de demande. La croissance du trafic de la VP impliquera de nouvelles congestions et donc une baisse de la vitesse moyenne de circulation qui s'ajuste sur celle du TC.

La vitesse moyenne des deux modes baisse alors. La croissance de l'offre viaire n'entraînerait qu'une amélioration temporaire de la vitesse moyenne en VP. Aussi l'amélioration des dessertes des réseaux de TC serait prioritaire par rapport à l'augmentation des infrastructures viaires. Le point de départ de la réciproque de cette conjecture (POUYANNE, 2004) est une diminution des capacités du réseau viaire (par exemple la mise en place d'une ligne de TCSP). L'augmentation de la densité résidentielle, accroît le trafic à longueur du réseau et niveau de motorisation inchangés. L'effet à court terme est un accroissement de la congestion. Dès lors, le temps de déplacement en automobile augmente, la compétitivité des TC s'accroît, et on assiste à un report modal vers ceux-ci.

Cette réciproque implique alors que les densités, réparties selon une forme monocentrique, influencent la circulation automobile. Cette variation de vitesse issue des densités conduirait à une variation des choix modaux en faveur du TC. Cette baisse de la vitesse selon les densités est confirmée dans plusieurs études européennes (BONNAFOUS, 2003) (Cf Graphique 70), françaises (BONNAFOUS, 1996) (ENALUT, 2003) ou les modèles de consommations unitaires où la vitesse diminue avec le nombre d'habitants. (Cf Graphique 70)

Graphique 70: vitesse et densité

Graphique 18 - La vitesse sur route (en km/h) et la densité urbaine (en pers. / ha.)



Source : Bonnafous 2003

1-4) Quelles relations entre espace aréolaire et réticulaire ?

1-4-1) Variation de la mesure des aires urbaines.

Pour comparer les formes urbaines globales la référence est souvent l'aire urbaine. En France, la définition de l'aire urbaine contient la notion de pôle urbain. L'INSEE définit le pôle urbain comme une unité urbaine offrant au moins 5000 emplois et qui n'est pas située dans la couronne périurbaine d'un autre pôle urbain.

L'unité urbaine est une commune ou un ensemble de communes qui comportent sur son territoire une zone bâtie d'au moins 2 000 habitants où aucune habitation n'est séparée de la plus proche de plus de 200 mètres (Cf Figure 29).

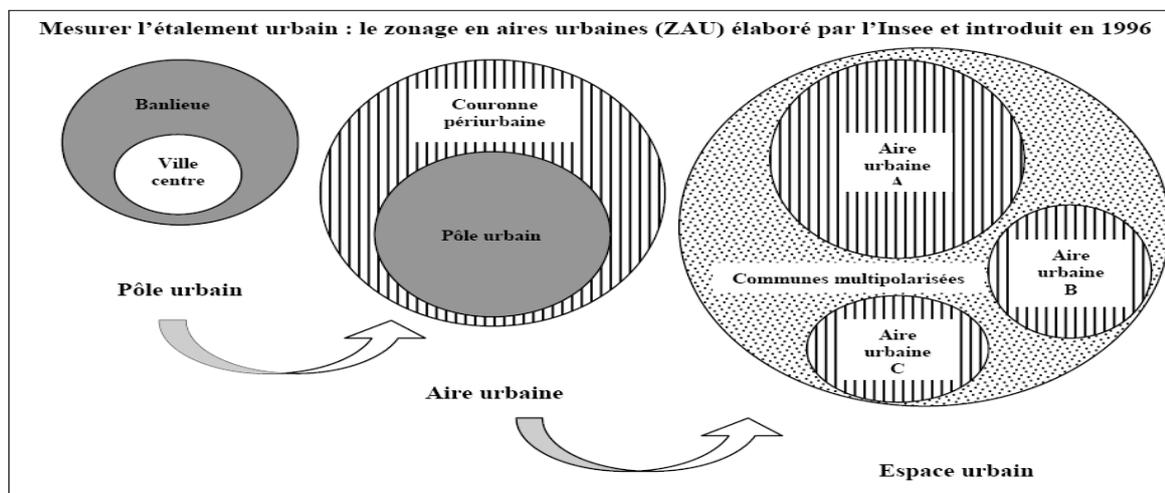


Figure 29: mesures de l'espace urbain

Source : INSEE

En outre, chaque commune concernée possède plus de la moitié de sa population dans cette zone bâtie. Le pôle urbain a donc lui aussi deux définitions emboîtées.

La notion d'unité urbaine ne prend pas en compte les limites administratives des communes. L'aire urbaine intègre le pôle urbain, et des communes rurales ou unités urbaines (couronne périurbaine) dont au moins 40 % de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci. Cette notion, (*urbanized area*) diffère selon les pays. Aux USA, elle implique un groupe d'unités de recensement d'une densité de population d'au moins 1 000 habitants par mile carré et les unités adjacentes d'au moins 500 habitants par mile carrés. Les « métropolitans aéra » englobent une agglomération et les zones périphériques qui sont liées du point de vue professionnel et commercial. Le taux de trajet domicile travail (commuting) est compris entre 15 et 25% au lieu de 40% pour les aires urbaines françaises. L'aire métropolitaine espagnole part des municipios qui sont des villes de plus de 100 000 habitants et la progression de la population des municipios adjacentes caractérise l'aire urbaine. Celles qui s'y rattachent respectent les conditions suivantes : une croissance de population pendant une période donnée supérieure à celle du municipio central, un minimum de 40% d'habitations non agricoles correspondant à des immeubles regroupant au moins cinq familles, un minimum de 500 travailleurs non agricoles (HOUILLON & THOMESIN, 2005). Les Allemands prennent une densité d'activité nette (habitant et emplois) comme référence de la concentration urbaine une densité de plus de 1250 habitants-emplois non agricoles par km² dans une zone d'une dimension de 100 km², et 150 000 habitants avec une densité de population de plus de 1000 hab/km². Si l'aire urbaine de Paris correspond à peu près à la région IDF, la comparer à des villes allemandes dont l'organisation diverge administrativement interroge (LE NECHET, 2010). Les pays ont des méthodes différentes dans la collecte des informations des habitants (INSEE, 2004).

Dans les comparaisons internationales les contenus ont des variations de valeur indépendantes des formes urbaines. Il est difficile de poser un cadre spatial commun pour comparer les métropoles. De plus, des variables économiques apparaissent, le nombre de chômeurs réduit le nombre de déplacements, la consommation par habitant diminue alors sans modification de la densité.

1-4-2) Les effets d'échelle.

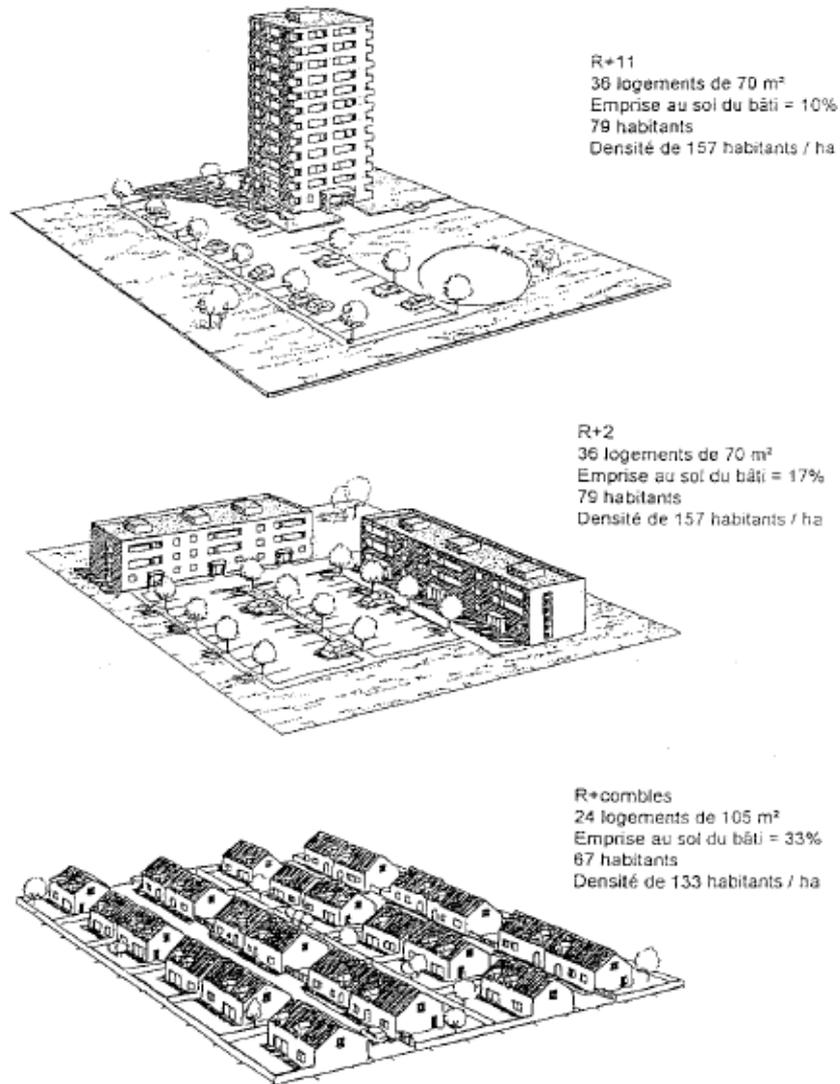
Dans les analyses de régression, l'agrégation des unités augmente les valeurs des corrélations. Plus l'échelle spatiale est petite, plus les unités gagnent en homogénéité, les indicateurs et les paramètres en valeur. Les détails et les spécificités s'estompent. L'homogénéisation uniformise la mesure et perd de l'information. Non seulement, la dimension et l'ampleur des phénomènes changent mais aussi les acteurs, les formes, les seuils et les significations. Or à des échelles régionales, ces agrégations sont importantes noyant des variations explicatives statistiquement. Ainsi, la courbe de Newman et Kenworthy s'aplatit à de fortes densités. Il existe donc un seuil au-delà duquel l'effet des densités sur les parts modales s'épuisent supposant des rendements décroissants (NEWMAN & KENWORTHY, 1990). Au-delà, les parts modales ne changent plus rejoignant les constats de la littérature (POUYANNE, 2004) (LE NECHET, 2010). Sur des secteurs de faibles densités, les parts modales s'inversent renvoyant aux localisations réciproques de l'emploi et des résidences plutôt que la densification (POUYANNE, 2004). Le niveau pertinent d'observation d'un phénomène (ORAIN, 2004) est donc important. Ensuite, la densité est sensible aux effets d'échelle (BURGIERE & REVEL, 2000). A certaines échelles, les mesures et donc les relations des indicateurs sont modifiées. Certains auteurs s'interrogent alors sur la configuration du quartier ou encore la distance entre le travail et le domicile ce qui renvoie à un motif de déplacement particuliers ou encore à l'accessibilité (ALLAIRE, 2007). Les dynamiques macroscopiques disparaissent à une échelle microscopique en particulier pour le TC (GERARD, 1985). Selon l'échelle envisagée du territoire, la relation densité efficacité énergétique apparaît ou non (CHABROL, 2016). Les relations entre les différentes variables de forme urbaine montrent de fortes relations entre elles (autocorrélation spatiale) en interaction avec les comportements de mobilité ce qui a pour conséquence un manque de signification (colinéarité). Une corrélation dans ces conditions n'implique pas la causalité. A chaque échelle, la réalité change (ROCCI, 2007). L'espace géographique est un espace multi plan. Plusieurs échelles territoriales interagissent (LE NECHET, 2010). L'approche morphologique se heurte alors à une indétermination logique. Les indicateurs de consommation d'énergie ne se lient pas avec les échelles (LE NECHET, 2010). Des liens complexes entre morphologie urbaine et mobilité existent qu'ils soient issus de la forme « globale » ou « locale ». Plusieurs approches (POUYANNE, 2004) (LE NECHET, 2010) (MILAKIS & al, 2015), (PELE, 2018) tentent de délier ces échelles et rentre dans l'approche multiscale. Dans les études, des découpages concentriques sont souvent utilisés en référence au modèle monocentrique malgré l'existence d'une critique de la densité. La variation des zonages spécifie l'échelle de référence.

Ainsi il peut s'agir de la comparaison entre plusieurs villes européennes (LE NECHET, 2010), d'aires urbaines françaises (POUYANNE, 2004), (PELE, 2018), ou d'agglomérations (FOUCHIER, 1995). A l'intérieur de ce zonage, les éléments étudiés varient. Il peut s'agir de la commune (POUYANNE, 2004), (LE NECHET, 2010) ou des IRIS (PELE, 2018). De même, il existe une similarité dans les approches qui renvoient soit à la distance au centre soit au gradient de densité. C'est par rapport à la forme à petite échelle qu'est mobilisé un ensemble d'indicateur qui formalisent l'effet de la forme locale sur des variables de mobilité. L'effet de la forme à grande échelle se définit donc par rapport une échelle plus petite, pas comme une échelle spécifique et indépendante dans le choix modal. La qualification de l'aire urbaine reste basée sur l'indicateur construit pour qualifier la décroissance des densités ce qui ouvre alors à une pluralité de classement. Plusieurs tentatives de classification des formes urbaines ont été effectuées particulièrement en Europe (LE NECHET, 2010). Cette typologie rejoint alors des types de classement différant selon le peuplement des villes. Ainsi les « villes peuplées » seraient étalées, polycentriques, ou compactes (ce qui renvoie tout même à une densité très forte) tandis que les villes moins peuplées seraient diffusées éclatées ou monocentrique. A la place d'une échelle spatiale se substitue une échelle de peuplement. Néanmoins, cela illustre toutes les difficultés pour attribuer un cadre spatial uniforme à des villes qui ne le sont pas comme le montre la mesure des aires urbaines. Ce serait donc deux échelles imbriquées et interdépendantes qui interagiraient dans la mobilité quotidienne. Il est donc difficile d'attribuer une causalité à une multiplicité d'indicateurs (LE NECHET, 2010) (PELE, 2018).

1-4-3) Quelle pertinence de l'indicateur densité à très grande échelle ?

La densité renvoie à une concentration et à une répartition moyenne uniforme. Cet indicateur est donc ambivalent puisqu'il signifie à la fois une concentration mais aussi une répartition uniforme du contenant sur son échelle de référence. L'indicateur densité ne spécifie pas la forme urbaine locale (FOUCHIER, 1997). En revoyant des habitants à une surface, elle occulte la diversité du territoire, la présence de réseaux (BONNAFOUS, 2003) ou le type de bâti. (Cf Figure 30).

Chaque exemple a une surface de terrain de 5.040 m² et une S.H.O.B. totale de 2.520 m², soit un C.O.S. brut de 0,5.



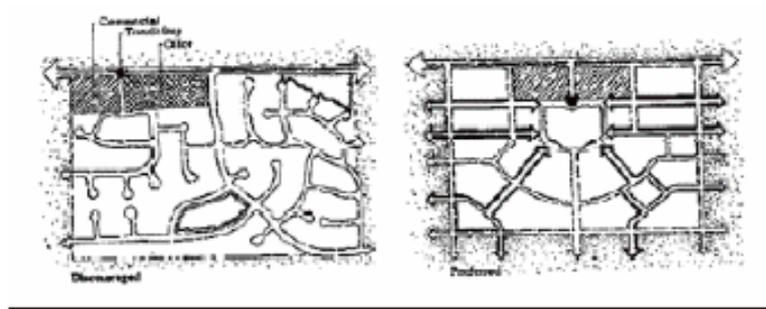
N.B. : Le nombre d'habitants est calculé selon le nombre moyen de personnes par ménage en France en 1990 (2,8 personnes pour l'individuel et 2,2 pour le collectif).

Figure 30: égalité des densités

Source : Fouchier 1997 : Le SHOB signifie la surface Hors Œuvre Brute autrement la surface bâtie sans les aménagements

Les habitants se répartissent différemment dans cette surface à densité brute constante (FOUCHIER, 1997). La première forme n'a aucune zone de rabattement centrale et favorise la VP avec des voyageurs potentiels dispersés. Dans la seconde, les voyageurs potentiels sont rassemblés et susceptibles d'être emmenés dans le même véhicule favorisant le TC. (Cf Figure 31).

Figure 13: Design au sein de deux quartiers différents



Source : Crane (1999).

Figure 31 : dessin urbain

Source Allaire

L'influence du bâti local semble modifier les parts modale VP (CARRE et al, 2000) (Cf Tableau 136)

Tableau 136: part modale de déplacements en fonction de l'habitat.

Habitat	Voiture	Marche	TC	Bicyclette	Cyclomoteur	Motocyclette	Ensemble
Pavillonnaire	72,3	16,7	6,1	3,4	1	0,5	100
Collectif	48,5	33,8	14,6	1,9	0,7	0,3	100

Source : Papon 2000

La voiture est une solution alternative au TC pour se déplacer. La distance au centre n'est donc pas l'unique déterminant dans la description des pratiques de mobilité. Néanmoins, le type de bâti n'est pas suffisant pour comprendre les caractéristiques de la variation des parts modales. Cette question du lieu de résidence peut être abordée, avec les caractéristiques socio-économiques des individus et des distances parcourues qui augmentent avec la distance au centre de l'agglomération. Les indicateurs de la forme urbaine confirment cette approche avec une grande diversité (PELE, 2018). Néanmoins, nous retrouvons l'effet de la densité dans les méthodes employées. A partir d'une régression typologique, l'étude de l'agglomération bordelaise (POUYANNE, 2004) montre que les densités, dans les modèles du sol, conservent leur pouvoir explicatif des parts modales et des distances de déplacement. Mais à certaine échelle, la répartition des densités en particulier pour les motifs achat et loisir est aussi importante. L'agencement des activités modifie les arbitrages des modes des usagers selon leur motif de déplacement. Le rôle du revenu est ambigu. Dans l'agglomération lyonnaise, la densité reste un indicateur pertinent avec la distance à une gare d'accès ferroviaire (PELE, 2018) renvoyant à « l'accessibilité » et non plus à la densité. En grande couronne, le taux de motorisation ne dépend pas que d'un rapport à la densité mais aussi aux temps d'accès aux services (MOTTE-BAUMVOL, 2007). Deux formes d'interaction spatiale coexistent, l'une gravitaire, qui voit le poids et la proximité entre zones créer des opportunités de déplacements et l'autre, moins territorialisée, pour laquelle les temps de déplacement et d'accès aux infrastructures de transport, comptent plus que la proximité spatiale (LE NECHET, 2010).

1-5) Conclusion : une relation discutable.

Il existerait donc une rétroaction spatio-réculaire issue des territoires. Elle viendrait de l'augmentation des densités que le gradient du modèle monocentrique représente. Une réduction des portées et des parts modales seraient le signe d'une croissance de l'efficacité énergétique dans cette forme urbaine. Néanmoins, les représentations diverses utilisées, les effets d'échelle, les approches divergent sans compter que la courbe de Newman et Kenworthy s'aplatit ce qui laisse supposer l'existence d'un seuil de densité. Selon les formes les relations entre densité et efficacités énergétiques disparaissent (LE NECHET, 2010). La relation est donc discutable en IDF.

2) Une forme mono-polycentrique en IDF.

2-1) Une forme « mono-polycentrique » en IDF.

2-1-1) Une forme mono-polycentrique

Les modèles monocentrique et polycentrique justifient des dispersions des flux spécifiques. Nous comparons les données de liaisons obtenues par rapport au tableau des liaisons (Cf Tableau) et la carte des flux des départements de l'enquête EGT (2008) (Cf Tableau 137).

Tableau 137 : tableau des liaisons et origine résidentielle

LIAISON	Total	Paris	Petite Couronne	Grande Couronne
Paris <> Paris	7 995	7 014	572	409
Paris <> Petite Couronne	3 007	890	2 026	90
Paris <> Grande Couronne	1 242	202	26	1 014
PC <> PC	11 542	204	11 022	316
PC <> GC	2 053	16	752	1 285
GC <> GC	14 585	54	150	14 381
Hors Ile-de-France	254	37	62	155
Total	40 678	8 419	14 610	17 650

Source : EGT 2010

Nous évaluons les mobilités internes et d'échange des départements de chaque couronne à l'origine des déplacements, la résidence. Nous répartissons les flux « interne » et « reçu et émis ». Leur valeur n'est jamais inférieure à 0.1 impliquant une légère surestimation. Les chiffres se recourent 12.3 Millions (tableau) contre 12.044 les flux internes 8 millions contre 7.795, les reçus et émis Petite Couronne (PC) (3) ou Grande Couronne (GC) (1.3). (Cf Tableau 138).

Tableau 138: nombre de déplacement Paris milliers				
Département 75	Interne	Reçu et émis		
		Paris	PC	GC
		0	1,3	0,3
			0,9	0,4
			0,8	0,3
				0,3
Total	8	0	3	1,3
Somme totale		12,3		
Part de la mobilité d'échange		0,35		

Source : calcul de l'auteur

Dans la mobilité interne 12% vient des couronnes. La part de mobilité d'échange reçus et émis de Paris avec les autres couronnes est de 0.35. Pour la PC, deux mobilités internes existent : à l'intérieur des départements et entre les départements de la couronne Le taux d'échange entre départements est similaire à Paris. Sans le second la mobilité diminue 16 millions de déplacement et le taux d'échange baisse (31%) (Cf Tableau 139).

Tableau 139 : Nombre de déplacement petite couronne				
Départements	Interne	Reçu et émis		
		Paris	PC	GC
	92,00	4,1	1,3	0,30
	93,00	3,5	0,9	0,30
	94,00	3,3	0,8	0,30
Autre déplacement GC -PC				1,6
Total	10,9	3	0,9	2,2
Somme totale		17		
Part de la mobilité d'échange		0,36		

Source : calcul de l'auteur

La GC ne représente que 23% des flux d'échange, 28% avec les flux interdépartementaux. Les flux de la GC sont d'abord dirigés vers la PC et plus faiblement vers Paris. A l'émission, Paris reçoit des flux (-2064), ceux de la PC sont équilibrés. La GC reçoit faiblement (Cf Tableau 140)

Tableau 140 : balance des flux échangés milliers			
Couronnes	Paris	PC	GC
Emis E	1092	2778	2299
Reçus R	3156	2281	996
Balance = E-R	-2064	497	1303

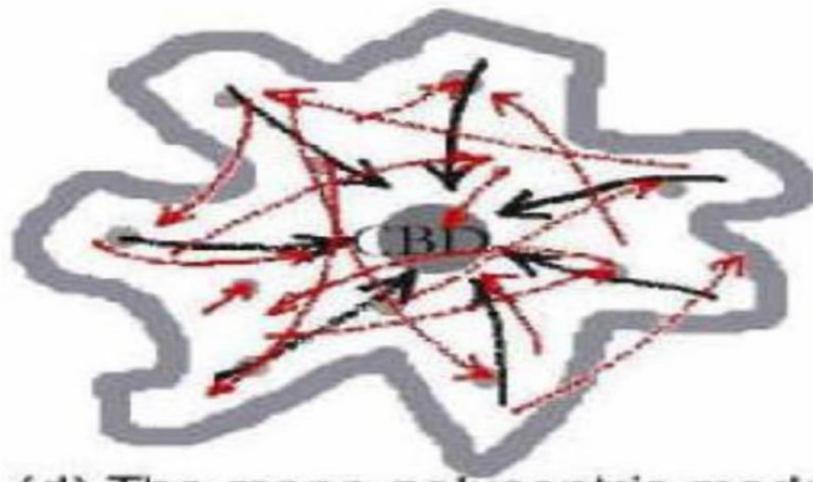
Source : calcul de l'auteur

A l'échelle régionale, la balance des flux des couronnes produit une attraction monocentrique. Lorsque la différence emploi actif est négative la couronne émet des flux et, dans le cas contraire, elle en reçoit (balance négative.). La région IDF reste un espace polarisé dont le principal noyau attracteur est Paris avec un pôle d'attraction secondaire la première couronne (Cf Tableau 141)

Tableau 141 : balance emplois actif		
Couronne	Différence emplois-actif	Balance des flux milliers
Paris	634881	-2064
1ière couronne	-27951	497
2ième couronne	-457437	1303

Source : calcul de l'auteur

Aussi la région se rapproche du « mono-polycentrisme » (BERTAUD, 2003) (Figure 32).



(d) The mono-polycentric model: Simultaneous radial and random movements

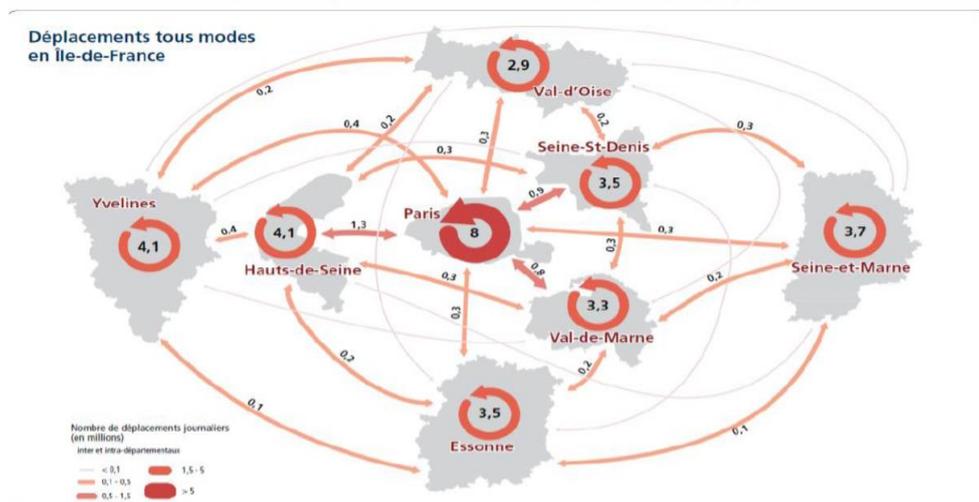


Figure 32 : flux des départements EGT 2010 + Bertaud

Source : EGT + Bertaud 2003

Deux types de polarisations existent une centrale à Paris, une autre dispersée, dans les couronnes.

2-1-2) La périphérisation des emplois et des habitats en IDF.

L'exploitation complémentaire affine les caractéristiques de l'emploi et détaille la composition des ménages et des familles. Ces variables s'obtiennent plus difficilement, l'exploitation complémentaire procède donc par sondage au quart (sauf certaines zones traitées à l'exhaustif). L'utilisation des données est déconseillée pour les effectifs inférieurs à 2000. Les actifs occupés sont les personnes qui déclarent (INSEE, 2017): exercer une profession (salarisée ou non) même à temps partiel ; Aider une personne dans son travail (même sans être rémunérée), être apprenti ou stagiaire rémunéré, être chômeur tout en exerçant une activité réduite, occuper un emploi tout en étant étudiant ou retraité, être militaire du contingent (tant que cette situation existait). Le concept d'emploi est déclaratif ou « spontané ».

Le nombre d'emploi regroupe les personnes ayant répondu à une des deux questions suivantes : « Profession principale. Indiquez la profession ou le métier que vous exercez actuellement » soit « travaillez-vous, sans être salarié, en aidant une autre personne dans sa profession (par exemple un membre de votre famille ?) » Les personnes en congé maladie ou de maternité, les apprentis sous contrat, les stagiaires rémunérés, sont considérés en emploi. Il ne correspond pas aux estimations d'emploi issues du concept du BIT (Bureau International du Travail). Par rapport à des enquêtes par sondage (enquête Emploi, enquête trimestrielle) ou à des exploitations de documents administratifs (déclarations annuelles de données sociales, Urssaf, Unedic), le recensement présente l'avantage d'être exhaustif. Il prend en compte la multi-activité et estime de manière fiable un nombre de personnes en emploi, tout en les affectant sur les territoires. Entre deux recensements, le niveau d'emploi se calcule en appliquant au niveau de l'année passée des indices d'évolutions sectorielles venues d'autres sources administratives (ACEMO, UNEDIC, URSAFF). Les données « des emplois au lieu de travail » attachées au recensement sont distribuées par communes selon des Catégories Socio Professionnelle. Ces données renseignent sur l'activité des firmes dans le territoire (HALBERT, 2004). Conformément au SDAU de 1965, « les activités nobles » (activité de haute valeur ajoutée comme la finance ou les centres de décision des entreprises) à Paris créent une « centralité régionale » (STEINBERG, 1981). Elle s'accompagne d'un desserrement des activités non tertiaires. Paris concentrait 45,28 % des emplois en IDF (1968) et n'en concentre plus de 33% en 2013. La GC en concentre 30% en 2013 (20% en 1968). (Cf Tableau 142)

Tableau 142 : pourcentage emploi au lieu de travail IDF 2000-2013						
Années	1968	1975	1982	1990	1999	2013
RIF	1	1	1	1	1	1
75	45,28%	41,03%	38,43%	35,76%	31,75%	33,24%
77	4,93%	5,36%	5,94%	6,60%	7,71%	7,14%
78	6,72%	8,02%	8,72%	9,17%	10,01%	9,27%
91	4,57%	5,64%	6,62%	7,40%	7,96%	7,32%
92	15,48%	15,77%	15,41%	15,50%	16,17%	17,80%
93	10,01%	10,04%	9,85%	9,67%	9,60%	9,37%
94	8,86%	9,27%	9,36%	9,36%	9,37%	8,82%
95	4,15%	4,87%	5,68%	6,54%	7,43%	7,04%

Source INSEE RGP 1968 2013.

Dans le périmètre de la métropole du grand-paris, 60% et 58 % des surfaces de production renvoient à l'activité tertiaire contre 24% dans la GC. Dans la PC, ces résultats renvoient à La Défense accolée à l'ouest de Paris. La Seine Saint Denis concentre 13% de l'activité industrielle ce qu'elle partage avec le val de Marne. Les entrepôts et l'industrie sont très représentés en GC. Les commerces sont également bien distribués voire plus distribués en GC (MOTTE, 2006). Il y a une disjonction des activités selon leur nature issue de la planification. Les zones d'activité économique (ZAE) montre une localisation des emplois à proximité des réseaux routiers. Ce sont des surfaces affectées aux entreprises initialement regroupées autour de l'agglomération parisienne, elles sont développées à 90% dans la GC.

Aussi, « le développement des ZAE est donc resté très concentré autour de Paris, dans un périmètre étendu, correspondant à la zone agglomérée, ainsi que dans les zones périphériques à forte urbanisation « les (ex) villes nouvelles, les centres urbains de Meaux, Melun, Mantes-la-Ville et Mantes-la-Jolie, Etampes, etc. » (DREIA, 2018). (Cf Tableau 143).

	m ²	%	m ²	%	m ²	%
Couronnes	Paris		PC		GC	
Bureaux	1454022	65,16%	7926665	58,30%	4866668	23,67%
Commerce	389946	17,47%	1877256	13,81%	3959578	19,26%
Entrepôt	29698	1,33%	1363660	10,03%	5820799	28,31%
Industrie	106794	4,79%	1646899	12,11%	4949962	24,07%
Artisanats	2011	0,09%	38377	0,28%	174923	0,85%
Hébergement hôtelier	249052	11,16%	744099	5,47%	791382	3,85%
Total	2231523	100,00%	13596956	100,00%	20563312	100,00%

Source : CCIF+ calcul de l'auteur

Ailleurs, la plupart des ZAE se sont localisées selon leur vocation, le long des principaux axes de communication ou d'axes secondaires, dessinant un réseau très étiré, tentaculaire. Leur dispersion le long des autoroutes (A4 A5 A15 A86) crée une « polarisation diffuse » des emplois en IDF. Les actifs centraux dépendent des emplois périphériques. En même temps, Paris a perdu de la population en part et en volume dans la période 1975-1999, en part ensuite (Cf Tableau 144)

Années	1968	1975	1982	1990	1999	2013
75	28%	23%	22%	20%	19%	18%
77	7%	8%	9%	10%	11%	12%
78	9%	11%	12%	12%	12%	12%
91	7%	9%	10%	10%	10%	10%
92	16%	15%	14%	13%	13%	13%
93	14%	13%	13%	13%	13%	13%
94	12%	12%	12%	11%	11%	11%
95	8%	9%	9%	10%	10%	10%

Source : calcul de l'auteur

En répartition Paris perd 10% d'habitant, la grande couronne en gagne 3,25% la petite couronne en perd 1.75% même si cela est stable depuis 1990. Les trajets domicile-travail classiques du schéma monocentrique diminuent (AGUILERA & MIGNOT, 2004) en 1990 et 1999. Les flux de déplacement se dispersent et augmentent dans les liaisons GC<>GC (EGT, 2010). Les infrastructures du TC accompagnent le desserrement issu des villes nouvelles. L'absence de développement des TC dans les zones faiblement denses favorise alors la part modale de la VP. Celle des TC est plus forte pour les résidents de Paris et des Hauts-de-Seine ; Deux départements à fortes densités, et aux taux d'emploi supérieurs à 1, ou les actifs exercent leur activité à proximité de leur domicile (DREIA, 2018). Aspect vérifié en moyenne et pour la moitié des actifs, malgré la présence des grandes gares TGV, et une proportion élevée de résidents cadres, catégorie qui effectue en général de longues navettes.

2-1-3) Polarisation.

2-1-3-1) A grande échelle.

En géographie, la polarisation (ELILSSALDE, 2004) prend deux sens. En premier, elle est l'attraction qu'un lieu exerce sur un espace hétérogène plus ou moins étendu qui en est dépendant. L'espace s'assimile à un champ magnétique où ce lieu, le pôle central (généralement une ville ou une région), exerce une aimantation proportionnelle à sa population, à ses activités ou à ses équipements. Nous l'utilisons dans ce sens avec des flux. L'autre vient des travaux d'économistes. En 1955, F.Perroux propose, la notion de pôle de croissance. Ce concept, non spatialisé, montre que des investissements sectoriels sélectifs peuvent créer des mécanismes multiplicateurs de croissance. J.R.Boudeville (1972) l'applique spatialement au niveau régional avec les échanges interindustriels. L'approche relationnelle transforme la logique de position en flux selon le semis de ville de la région.

Un pôle peut être un « lieu de forte concentration de l'activité économique » (BERROIR, 2004). En IDF, 4 modèles à 5 critères en résultent (Cf Tableau 145).

Tableau 145: critères de définition du pôle.		
	Mesure brute	Mesure relative
Concentration	Capacité à produire des économies d'agglomération. Critère 1 le nombre d'emploi	Capacité à faire émerger un pic de densité dans le champ urbain. Critère 3 Rapport entre les densités d'emploi de la commune et des communes environnantes.
Attraction	Capacité d'attraction en tant que centre d'emploi ; Critère 2 nombre de communes polarisées par un flux d'actif supérieur à 10.	Niveau de dépendance des communes environnantes (capacité à produire une attraction privilégiée) Critère 4 nombre de communes dont plus de 10% des actifs vont travailler dans ces pôles. Critère 5 nombres de communes dans le pôle représentant le premier flux.

Source : Berroir et alli.

1. Le modèle central. Correspond aux arrondissements de Paris.
2. Le modèle péricentral. Communes de la proche banlieue parisienne concentrant un grand nombre d'emplois (Puteaux Nanterre, Vitry etc.)
3. Le modèle périphérique isolé. Communes dont les pics de densités d'emploi contrastent avec leur environnement (Exemple Melun) Elles attirent fortement les navetteurs.
4. Le modèle intermédiaire. Pôles avec un poids économique plus faible que les modèles péricentraux, leurs habitants sont les plus mobiles, moins de 20% habitant y travaillent.

Seules les communes totalisant plus de 30 000 emplois polarisent la mobilité. L'attraction des communes dont le taux d'emplois est situé entre 10000 et 30000 emplois n'est pas avérée. Sous la contrainte de distance, 7 km, la notion de pôles multi-communaux est exposée en 3ième étapes. La coïncidence, plus ou moins forte des communes constituant les aires d'attraction de la commune-noyau, identifie des liens forts.

Cinq flux d'actifs représentant plus de 1 % des actifs occupés résidant dans la commune de départ définit la zone selon 4 configurations (BERROIR S & Al 2008). La seconde étape observe les échanges symétriques d'actifs définissant l'interaction des communes-noyaux. Les seuils sont soit un minimum de 2 % de dépendance entre communes, soit une réciprocité des flux. Les relations bilatérales des regroupements de communes effectués sont vérifiées. Les critères de la première étape de l'agrégation sont réutilisés. Troisièmement, l'homogénéité de ces pôles est étudiée en termes d'échanges symétriques et de recouvrement des aires de recrutement. Les communes d'un pôle multi-communal, sans être dans le noyau initial sont identifiées. (Cf Figure 33)

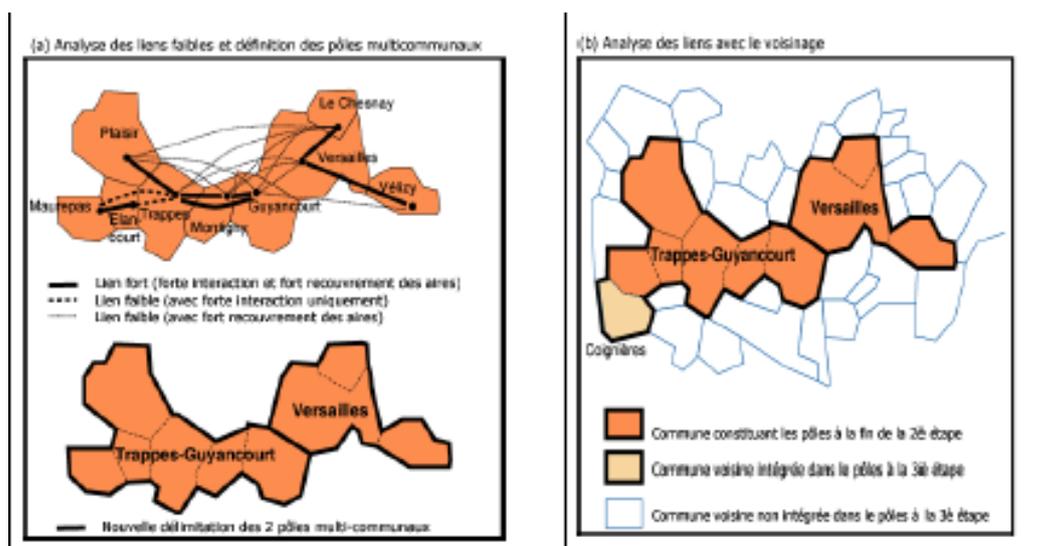


Figure 33 : pôles multicommunaux.

Source : Berroir et alii

Les centralités ne se limitent pas à une seule commune, des synergies existent. En multipliant les approches en termes de concentration et d'attraction, en valeurs absolues et relatives, la centralité est donc contextualisée (SCHNEE, 2014).

2-1-3-2) Des réseaux RATP.

La morphologie montre le niveau de hiérarchisation des réseaux (CONESA, 2010). Moins il est maillé plus il est hiérarchisé ; La morphologie des réseaux modifie la polarisation des flux. Le système le plus hiérarchique est l'étoile ou système hub and spoke (Moyeux et rayons). (Cf Figure 34)

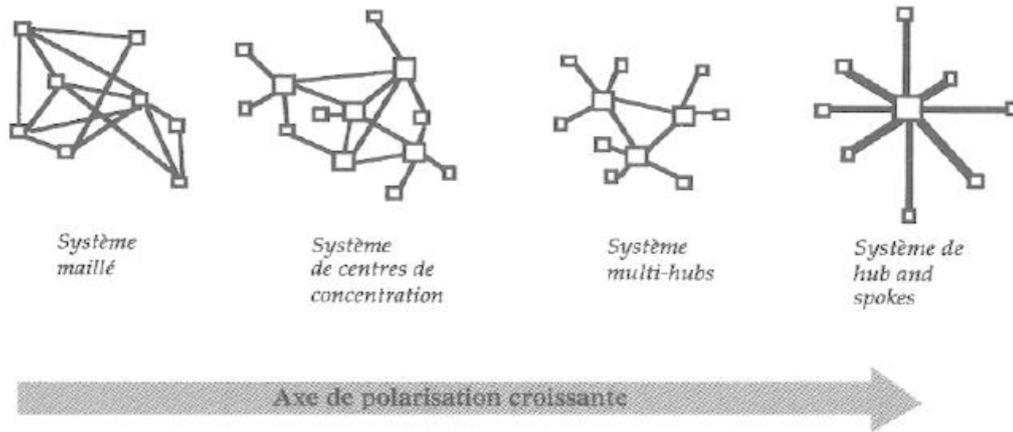


Figure 34: polarisation et forme des réseaux.

Source : Bayer

A petite échelle, le réseau ferré en IDF est radioconcentrique. Il est conçu pour se rabattre sur Paris, certaines lignes la traversant d'autres non. Dans le réseau parisien, le RER est de type multi hub avec des stations comme Chatelet, Saint-Michel, gare de Lyon, Gare du Nord, saint Lazare (Cf Figure 35)

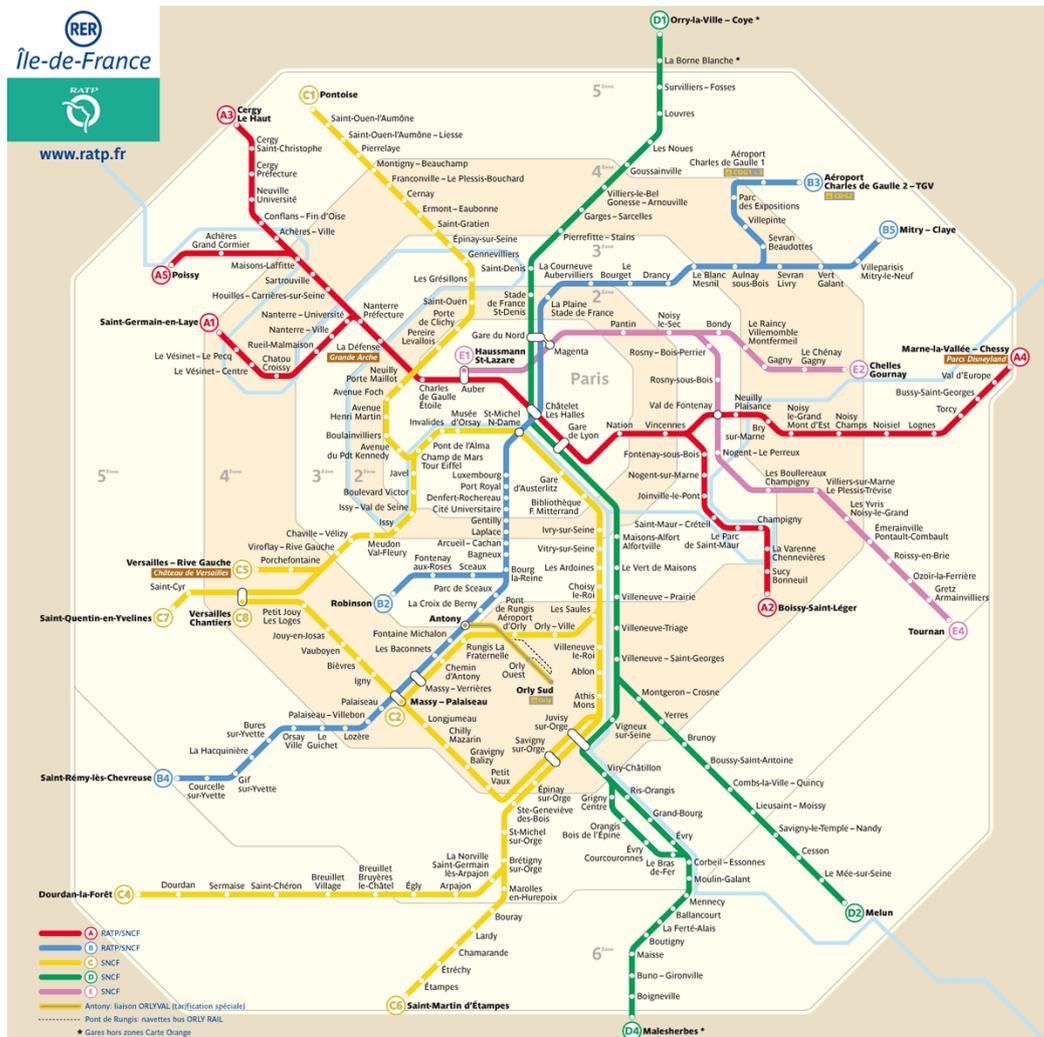


Figure 35: réseaux de RER

Source : RATP

Le RER voit une utilisation privilégiée des banlieusards 29.5% font des déplacements banlieue-paris, dont 24% pour la défense, 35.5% vont de banlieue à banlieue en passant par Paris pour certains. Les réseaux RER polarisent les flux TC, 64.5% du trafic passe par Paris (Cf Tableau 146)

Zones	Paris	Banlieue	Hors IDF	Total
	126 600	361 450	5 250	493 300
Paris	8.5%	24%	0.5%	33%
	443 000	532 250	7 900	983 150
Banlieue	29.5%	35.5%	0.5%	65.5%
	8 200	10 750	350	19 300
Hors IDF	0.5%	1%	-	1.5%
	577 800	904 450	13 500	1 495 750
Total	38.5%	60.5%	1%	100%

Source RATP

La moitié des utilisateurs du métro ont un voyage intra-muros (48%). (Cf Tableau 147)

Couronne	Paris	Banlieue	Hors IDF	Total
	2 234 200	892 150	28 900	3 155 250
Paris	48%	19%	1%	68%
	1 026 000	390 800	10 200	1 427 000
Banlieue	22%	8.5%	-	30.5%
	42 800	13 750	3 700	60 250
Hors IDF	1%	0.5%	-	1.5%
	3 303 000	1 296 700	42 800	4 642 500
Total	71%	28%	1%	100%

Source RATP

Cette utilisation précède celle en banlieue principalement vers la Défense et les portes d'entrée de la région parisienne soit vers Paris ou dans le sens Paris-banlieue. Le métro a une desserte locale contrairement au RER. Sa morphologie est maillée, centrée dans Paris (Cf Figure 36).

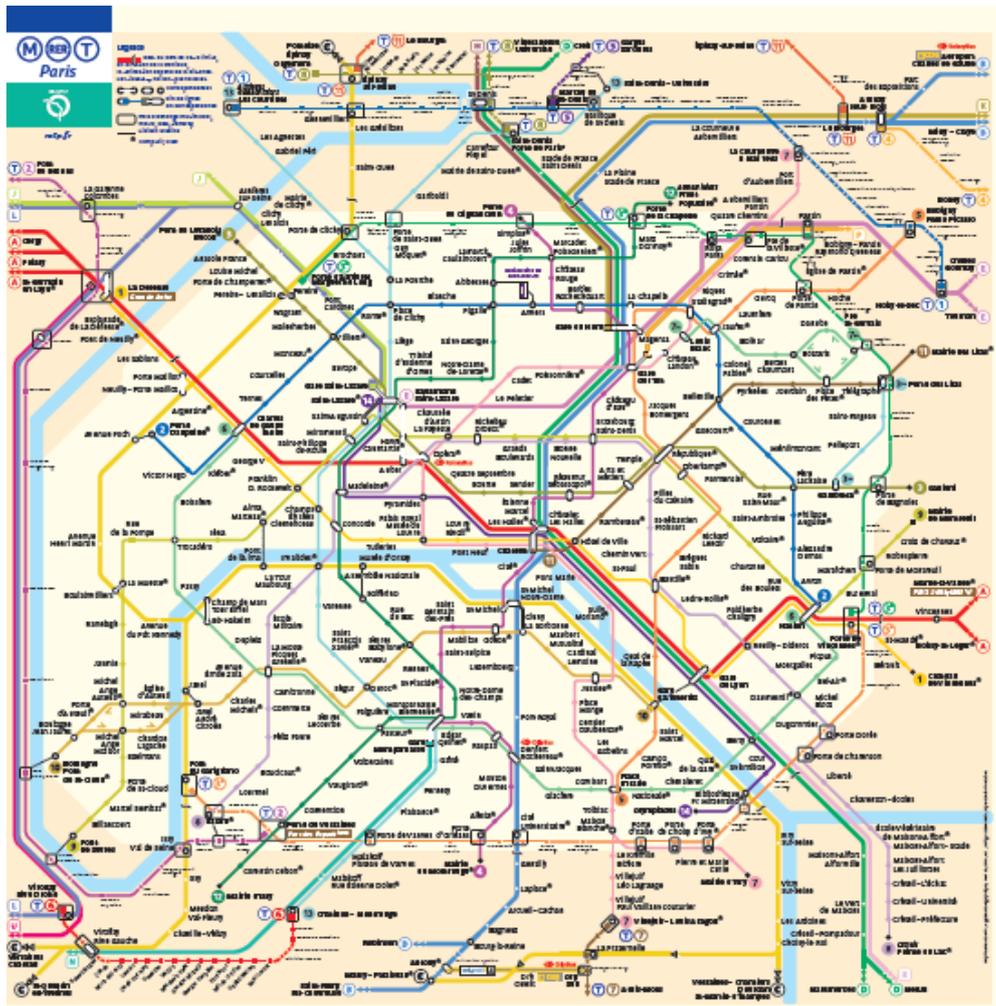


Figure 36 : morphologie réseaux métro

Source : RATP

Les liaisons internes sont différentes. La faiblesse des déplacements banlieue à banlieue du métro (8.5%) montre que l'orientation des flux vient de l'interdépendance de la morphologie du réseau et du territoire. Le cœur de ville (arrondissement 1,4,6,8,9,10,11) est mieux desservi que les arrondissements périphériques en particulier au nord de la ville (19 et 20). La forte densité et le maillage n'empêche donc pas sur le plan des quartiers des déséquilibres dans l'offre de transport (STATHOPOULOS, 1994).

A l'échelle des voies, nous avons deux types de maillage pour le réseau ferré. Ce type de maillage linéaire ou en branche est celle des lignes prises individuellement. (Cf Figure 37)

- **Le type linéaire**



- **Le type en arbre ou ramifié**

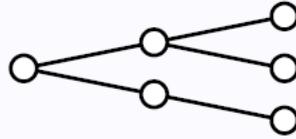


Figure 37 : morphologie des voies.

Source : Cuniasse

Il existe alors des points de fragilités situés sur n'importe quel point de la ligne pour le type linéaire. Le type branche est par ailleurs plus fragile, puisque la rupture d'un type linéaire ou en branche coupe la ligne en deux (CUNIASSE, 2015). L'impact de cette rupture sur le type en branche implique plus de ligne, deux au lieu d'une. Cette fragilité se retrouve dans des formes circulaires plus précisément des demi-cercles, qui apparaissent par exemple sur la ligne 2 et 6 sur le réseau parisien. Cette échelle des voies renvoie aux passagers (CUNIASSE, 2015) dont le voyage peut impliquer des correspondances. Nous obtenons alors un niveau intermédiaire entre la polarisation à l'échelle globale du réseau et la résilience permise par le maillage à grande échelle. Ce dernier donne en effet, une capacité à changer d'itinéraire et donc, pour le voyageur, à utiliser des ressources permises par le fonctionnement d'autres lignes (Cf Figure 38)

Le type maillé

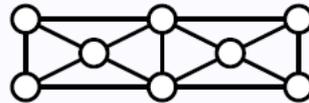


Figure 38 : maillage.

Source : Cuniasse

Les modèles de deux réseaux radioconcentriques, TC et VP, alimentés par des voies secondaires, montrent que les coûts de transport, fixe (hors distance) et variables (selon la distance), modifient les aires de localisation des ménages. L'hypothèse d'une délocalisation des habitats et emplois avec des réseaux « réels » aboutit au polycentrisme (MASSON, 2000). Des modèles de rentes ont été testés avec une structure de flux circulaires et non radiaux. Leurs gradients sont illisibles (MASSON, 2000). Le critère de l'intensité capitaliste traduit alors un usage du sol intensif en centre-ville et extensif en périphérie. Les coûts de transport VP décroissent à partir du centre où l'espace est rare. Le métro n'en occupe pas. La fonction est linéaire selon la distance parcourue. Il coûte moins sur les petites distances.

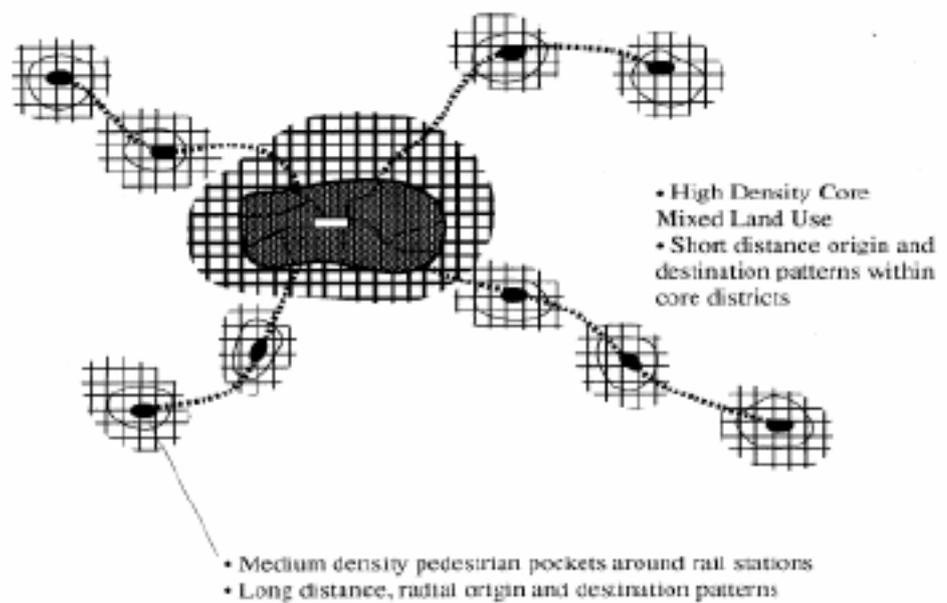
Néanmoins, il existerait un effet reticulo-spatial, le réseau modifierait les localisations et les densités.

2-2) L'interaction réticulo-spatiale.

2-2-1) La vitesse réticulaire acteur de modification de la forme urbaine

La vitesse est en lien direct avec l'urbanisme. La première figure est la ville des TC (NEWMAN P. , 1995). L'occupation de l'espace s'établit le long de ses infrastructures. Selon les gares, des pics de densité apparaissent. (Cf Figure 39)

Figure 37 : Représentation schématique de la ville du transport en commun



Source : Newman (1995).

Figure 39: la ville du transport en commun.

Source Allaire

L'autre montre une « nappe de densité », les usagers VP ont des habitations dispersées (Cf Figure 40)

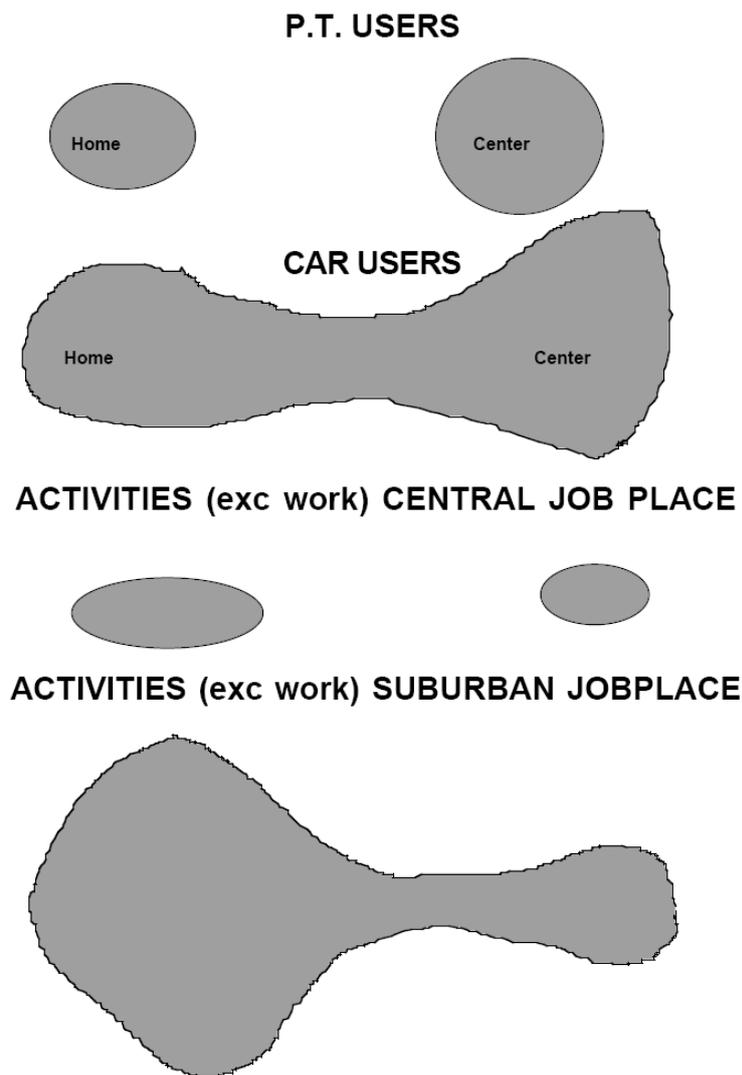


Figure 40: VP et figures urbaines

Source : Orfeuill 1998

Les « champs de densité » des modes TC et VP (MERLIN, 1991) sont différents, ils montrent l'effet des vitesses sur les localisations. Eloignés du CBD, leur forme change selon les modes. Le premier est lié au point d'accès au réseau les gares, l'autre est directement lié aux échangeurs, voire au dessin de la voirie, qui n'a pas nécessairement besoin de points d'accès spécifique pour accéder au réseau. La position des échangeurs VP et des points d'accès au réseau routier est essentielle pour comprendre la dispersion de l'habitat. Aussi, le dessin d'un réseau de transport peut constituer un parti d'aménagement. Le tracé des lignes commande l'urbanisation avec leurs champs de densité associés. (Cf Figure 41)

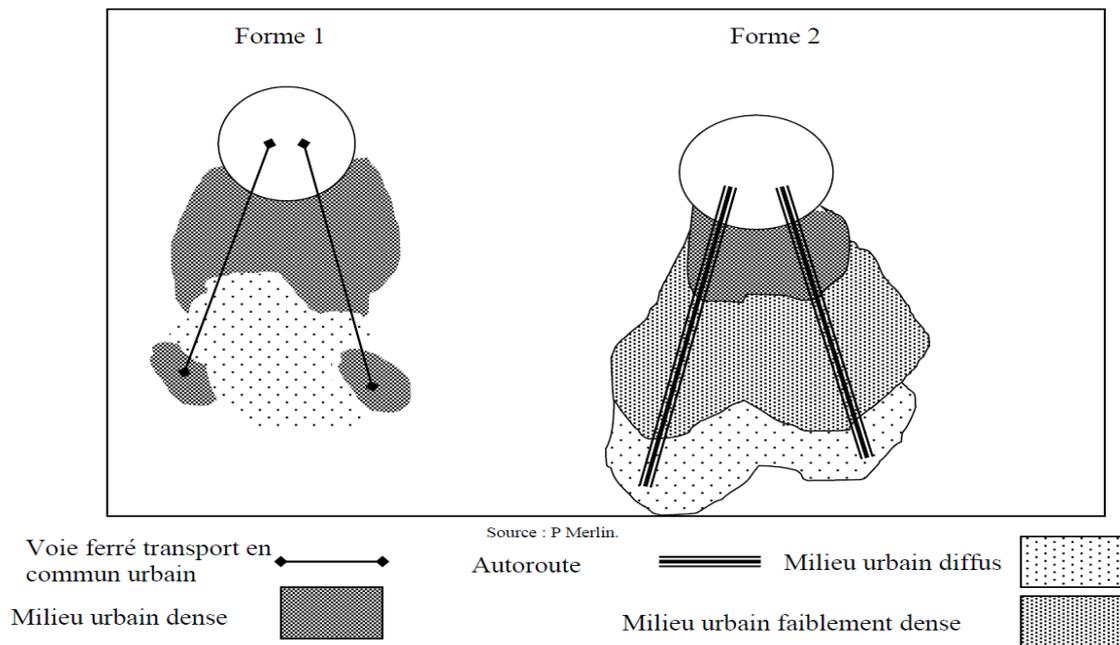


Figure 41: formes urbaines

Source : merlin

La transition urbaine proviendrait de l'effondrement du coût de la mobilité (WIEL, 2005). La distance parcourue augmente avec le revenu (ORFEUIL, 2002) (BERRI, 1995) (ENMV, 2020). Des portées croissantes indiqueraient l'étalement urbain. Plusieurs observations internationales des usages du temps des activités quotidiennes entre 1965 et 1966, effectués par Szalai (1972) (JOLY, 2002), montrent une stabilité des temps consacrés au sommeil ou au transport. Zahavi repart du résultat de certains budgets temps et la décline selon la mobilité avec sa formule (Cf Equation 89) :

$$V = a + b/Vitesse \text{ (89)}$$

Source : Zahavi

Il obtient une convergence rapide du budget moyen vers 1 heure. L'augmentation des vitesses s'accompagne d'une certaine constance des temps de trajet impliquant la croissance des portées plutôt que leur mobilité (ZAHAVI, 1974). Cette constance est mystérieuse (WIEL, 2002). En effet, il existe une grande diversité des situations socio-économiques ou de transports des villes étudiées et des difficultés de comparaison à l'échelle mondiale (JOLY, 2002). Des villes américaines sortent du schéma et le budget temps augmente selon leur PIB. Le revenu serait déterminant. Néanmoins, cette relation reste robuste à l'international (ORFEUIL, 1998) (SHAFER, 2000). S'appuyant sur cette conjecture, un ensemble d'auteurs suppose que la vitesse modifierait les densités urbaines (ENAULT, 2003), (WIEL, 2010) (BIGO, 2020). Il y aurait donc l'achat de distance pour un temps donné. Néanmoins, les coûts d'utilisation du véhicule sont proportionnellement plus importants pour les pauvres que pour les riches (ZAHAVI, 1974). La vitesse marquerait l'inégalité devant le déplacement en France (ENMV, 2020). Ceux qui n'y ont pas accès subissent des contraintes spatiales fortes, la « tyrannie de la distance » (ORFEUIL, 2002). Néanmoins, les comptes rendus des échanges du SDAU de 1965 montrent que « l'évolution des formes urbaines dépend plus des progrès réalisés dans la liberté des mouvements que de l'accroissement des vitesses ».

Aussi, « les déplacements qui augmenteront le plus sont ceux dont la voiture particulière est l'instrument favori : les achats, les loisirs. » C'est donc la possession d'une voiture qui serait essentielle. En effet, l'automobile reflète, outre la vitesse, l'avènement d'une « civilisation du loisir » (DUMAZEDIER, 1962) avec la baisse du temps de travail venue de la productivité (FOURASTIER, 1979). Pour le travail même, « la multiplication des emplois hors de Paris accroîtra les relations de banlieue à banlieue, où la densité urbaine plus faible qu'au centre de Paris permet une utilisation plus large des transports individuels. » (MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2010). Néanmoins, ces aspects ne modifieraient pas le foncier. En effet, « Aussi lourde soit-elle, une infrastructure de transport ne saurait modifier l'usage de l'espace si les dispositifs réglementaires du droit de l'urbanisme empêchent, par exemple, toute modification du coefficient d'occupation des sols » (OFFNER, 1993). Ainsi, l'Etat planifie des infrastructures routières tout en se désengageant de la maîtrise du foncier (MOTTE, 2006).

2-2-2) L'automobile un instrument de libéralisation du marché foncier et d'étalement ?

Deux coalitions s'affrontent dans les années 70 en IDF libérale et universaliste (ZITTOUN, 2001). La première privilégie le marché pour réguler le marché foncier (avec la maison individuelle) et la seconde l'intervention de l'Etat. Durant la planification des villes nouvelles, Albin Chalandon, ministre du logement en 1968 dénonce la préférence pour le logement collectif de l'administration et évince Delouvrier. La « coalition libérale » se renforce et interroge l'intervention de l'Etat dans la politique du logement en 1975. Elle réunit la direction du budget, du trésor, les banques commerciales (Association Française des banques) et des promoteurs. La loi de 1977 et l'arrivée de l'aide à la personne marque sa reconnaissance dans le jeu institutionnel français. Des affrontements successifs entre tenant de l'aide à la pierre, ou à la personne qui disparaît avec l'augmentation des revenus (PAYTHIEU, 1991), traduisent leur lente ascension. La « promotion idéologique » du « modèle pavillonnaire » (HAUMONT, 2001) alimente la construction de maisons individuelles des promoteurs privés. En IDF, la politique pavillonnaire bénéficie de la délocalisation des catégories supérieures (cadres) (BERGER, 2004). Des ménages plus modestes accèdent à la propriété et fuient les HLM (RONCAYOLO, 1997). Or les types de bâti diffèrent selon la rente foncière et la rentabilité potentielle du projet. Grâce aux COS (Coefficient d'Occupation des Sols) les promoteurs anticipaient les prix de vente par le mécanisme de compte à rebours (MACE, 1993) (Cf équation 90).

$$\mathbf{CFB = PS - CP - CC \text{ (90)}}$$

Source Delamotte

CFB = Charge Foncière Brute acceptable par m² construit. PS= Prix de vente espéré de l'opération par m² construit CP= rémunération des fonds propres, frais divers (commercialisation, études, conception...) CC = coûts de construction. Avec ce mécanisme, un modèle explique l'origine économique de la densité parcellaire (DELAMOTTE, 2008) (Cf équation 91)

$$\mathbf{Pv = K (C_{hf} + T) \text{ (91)}}$$

Source Delamotte

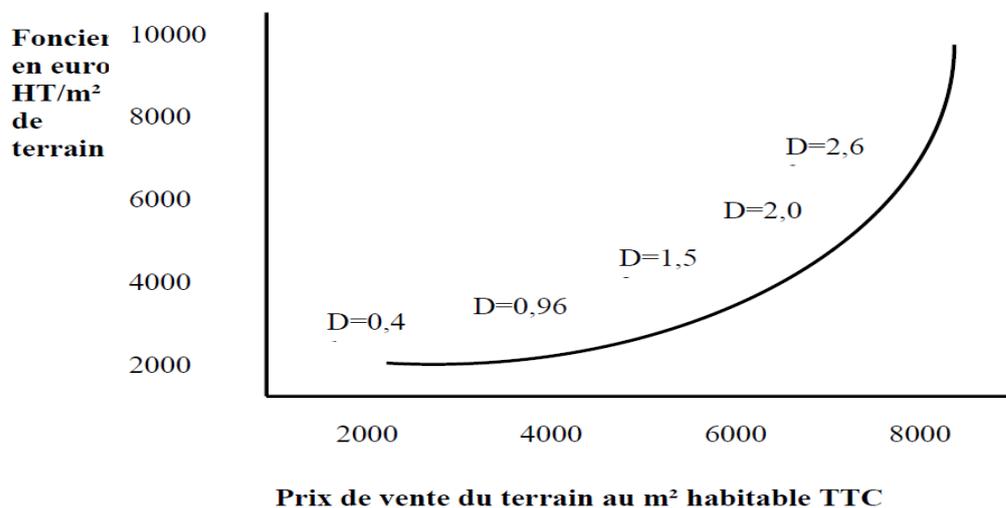
P_v = prix de vente TTC au m^2 de l'immeuble construit. C_{hf} = prix d'achat HT du terrain au m^2 construit. T = coût des travaux K = coefficient de transformation intégrant les hypothèses que le promoteur fait pour ses frais généraux. On a $C_{hf} = F / D$. F = prix offert pour le foncier au m^2 de terrain. D = densité brute. On pose $T = A \times D + B$ avec (A, B) constante ce qui signifie que les coûts de construction sont linéaires. Il obtient l'équation suivante (Cf équation 92)

$$F = - A \times D^2 + D \times (P_v / K - B) \quad (92)$$

Source Delamotte

Cette équation montre qu'en fonction de P_v la densité varie. Aussi, « Il y a une densité optimale au-delà de laquelle l'opérateur n'a pas intérêt à aller, même dans le cas où la densité autorisée (le COS) le lui permettrait » (DELAMOTTE, 2008). Cette densité optimale se calcule en dérivant F qui s'annule quand $P_v/K = 2 A \times D + B$. Elle varie selon les prix du terrain et de vente. La production de logement la moins chère est compatible avec de très faibles densités. (Cf Graphique 71)

Graphique 71: évolution des densités optimales



Source : Delamotte

La répartition des actifs se développe dans la périphérie au détriment d'un espace au centre (LARROQUE & A1 2002). Le schéma d'un polycentrisme de type « Urban village » s'estompe alors malgré les formes urbaines construites pour limiter l'usage de la VP à l'exemple d'Evry (DUPUY, 1999). La forme urbaine se modifie en IDF.

2-2-3) Infrastructure routière et dépendance automobile.

Selon Hall, la notion de « système automobile » mêle le processus de production à des coûts décroissants permettant une diffusion accrue de l'automobile. Les services liés au fonctionnement du véhicule (station-service garages) à la personne, des règles d'utilisation (circulation routière) et des infrastructures entretenues et maillées (MOTTE, 2006) accompagnent le processus industriel. Il serait plus avantageux pour l'ensemble des conditions d'usage du véhicule (vitesse, dessertes sécurité, confort, disponibilité).

L'Etat a investi massivement dans les infrastructures routières en IDF même si des restrictions budgétaires ont limité son expansion. Cette construction du « monopole radical » serait alors à l'origine de la baisse des densités (MOTTE, 2006) avec les répartitions des bâtis et des habitants. Il conduit à l'absence de choix modal, d'usagers captifs de l'automobile, qui n'est plus un choix culturel issu des goûts des consommateurs. Le modèle de dépendance automobile (DUPUY, 1999) relie trois variables (Cf équation 93) :

$$A = D V^2 \text{ (93)}$$

Source : Dupuy

A = Accès soit la longueur du réseau), V = Vitesse), D = Densité de service.

G Dupuy évalue alors trois effets de club, l'obtention du permis de conduire, l'augmentation du parc, l'accessibilité.

L'obtention du permis de conduire augmente la pression collective des usagers sur les pouvoirs publics. Les gains de vitesses entre les usagers de la VP et les autres entraînent un développement spécifique du parc VP et des accès aux réseaux routiers. L'usage de la voiture commence par « là où est garée la voiture » et s'arrête là où il « peut se garer » (DUPUY, 1999). La voirie s'est adaptée à la pression croissante de la motorisation des ménages. L'avantage tiré du stationnement dans l'usage du mode implique un « consentement tacite » (MATHON, 2008) entre la collectivité publique et l'habitant. La décision est politique puisque l'on attend à une certaine forme de liberté dans la capacité à se déplacer. Les lieux de stationnement renvoient à un emplacement privé (48%) ou sur la voie publique (28.8%) et restent largement gratuits en France, même si des politiques municipales concernant le stationnement changent la donne en particulier en IDF. Les autres stationnements ne sont pas nécessairement « payants ». (Cf Tableau 148)

Tableau 148 : proportion de place de stationnement en France 2008.

Type de stationnement	Voiture	Deux roues motorisées	Ensemble
Sur la voie publique - stationnement gratuit	28.8	26.6	28.8
Sur la voie publique - stationnement payant	1.3	0.5	1.3
Sur un emplacement privé	48.0	59.5	48.4
Sur un parking public ou commercial gratuit	16.5	8.2	16.3
Sur un parking public ou commercial payant	0.8	1.1	0.8
Autre	0.2	0.5	0.2
Pas de stationnement	2.8	2.4	2.8
Non déclaré	1.4	1.1	1.4

Source : S Mathon.

Les temps d'accès peuvent être mesurés (CERTU, 2002) au travers d'indicateurs. La proportion de déplacements dont le temps de marche à pied terminal est non nul (PTMAP≠0). La moyenne des temps de marche à pied terminaux pour les personnes en stationnement sur voirie (MTMAP) La proportion de déplacements dont la durée de recherche de stationnement est non nulle (PDRECH≠0). (Cf Tableau 149) :

Tableau 149 : temps d'accès au parking sur trois métropoles françaises

	Indicateur 1 P _{TMAP≠0}	Indicateur 2 M _{TMAP}	Indicateur 3 P _{MDRECH≠0}	Indicateur 4 M _{MDRECH}	Indicateur 5 P _{PAYANT}	Indicateur 6 P _{PBSTAT}
Lille	61 % (+24 %)	2,0 min (+1,1 min)	29 % (+16 %)	1,6 min (+1,1 min)	23 % (+16 %)	53 % (+22 %)
Lyon	53 % (+20 %)	2,1 min (+1,0 min)	29 % (+16 %)	2,3 min (+1,5 min)	29 % (+18 %)	61 % (+34 %)
Montpellier	47 % (+29 %)	3,1 min (+2,4 min)	25 % (+18 %)	1,8 min (+1,3 min)	48 % (+41 %)	78 % (+43 %)

Source CERTU

La moyenne des durées de recherche de stationnement pour les personnes en stationnement sur voirie (MDRECH). La proportion de déplacements dont le stationnement à destination est payant ou interdit (PPAYANT). La proportion d'actifs, scolaires et étudiants, rencontrant en général des problèmes de stationnement sur leur lieu de travail ou d'études (PPBSTAT). Par exemple, la durée moyenne de marche à pied est de 2,1 min à 3, 2 min à Lyon ce qui reste faible pour 53% à 73% de la population. La durée de la recherche de la place est entre 2,3 min et 3,8 pour 29% à 45% de la population. D'autres études (LE FAUCONNIER & GANTELET, 2013) montrent des temps perdus de 3,3 minutes à Grenoble, 11,8 minutes à Lyon, 10,0 minutes dans la zone de Paris quartier Commerce et 7,7 minutes dans la zone de Paris quartier Saint-Germain. Les mesures des temps d'accès au TC parisien (15,52 min) (CARRE & al, 2000) sont plus fortes. La contrainte de stationnement fait donc baisser les parts modales de la VP vis-à-vis du TC (-12%) et de la MAP (CERTU, 2009) (Cf Tableau 150).

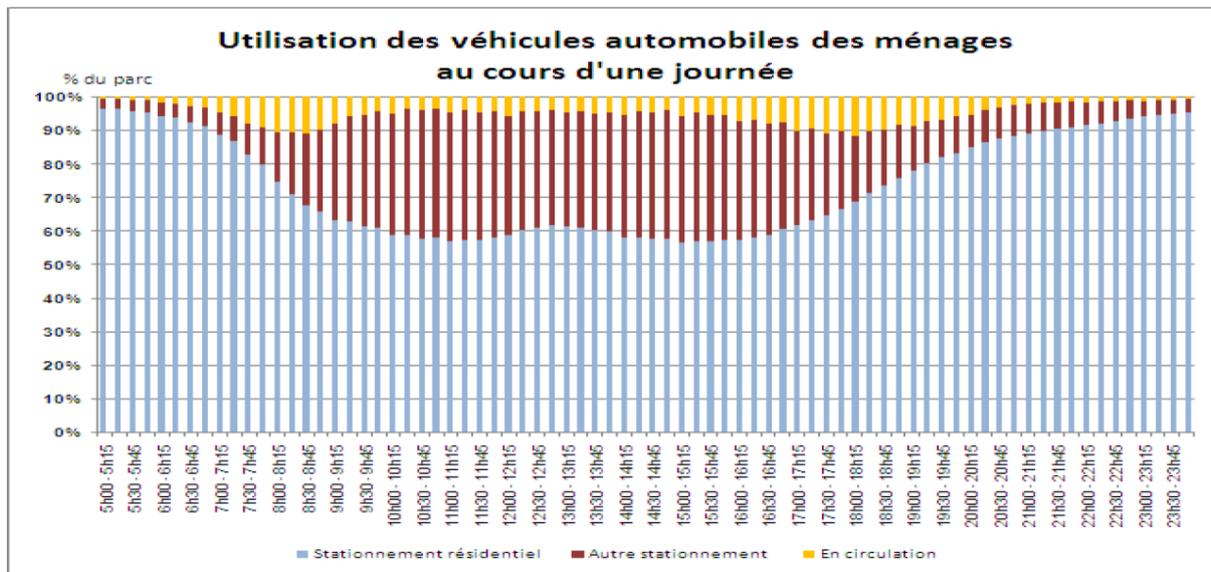
Tableau 150 : partage modal avec contrainte de stationnement

	VP	TC	2 Roues	Marche
Lille	-12 %	+10 %	=	+1,5 %
Lyon	-12 %	+14 %	-0,6 %	-1,3 %
Montpellier	-12 %	+12 %	-2,0 %	+2,6 %

Source CERTU

En moyenne, un véhicule reste stationné 95% du temps pour une utilisation de 1h30 (EGT 2010). Selon les heures, les types de stationnement en IDF varient. Le stationnement résidentiel reste majoritaire même si nous constatons une variation entre 8h00 et 19h00. L'offre de stationnement automobile influence le choix modal en faveur de l'automobile (POUYANNE, 2004) pour les activités. Pour le motif domicile travail (STIF, 2000), l'accès aux parkings favorise l'utilisation de la VP. Leur présence à proximité du lieu d'activité ou de résidence est déterminante dans le temps de trajet entre le lieu de stationnement et la destination finale (cf Graphique 72).

Graphique 72: stationnement en IDF



Source EGT 2010

Aussi, l'automobiliste bénéficie d'effets de club associés à chaque étape de l'utilisation de son véhicule. Deux types de rétroactions sont envisagés. Le vertueux, la croissance de la mobilité s'autoalimente, le vicieux, ou elle détruit les autres modes. La conséquence est l'obligation pour toutes les populations d'accepter une « dépendance automobile » indépendamment de leur revenu (ORFEUIL & al, 2002). Néanmoins, des limites apparaissent dans le raisonnement (MOTTE, 2006) : l'absence de prise en compte des aspects psychologiques, d'alternatives au mode automobile, et de la dimension individuelle dans la définition de la dépendance, qu'il définit comme un processus qui donne à la voiture une place hégémonique dont l'intensité varie selon le temps et des territoires. Cette intensité exclurait certains ménages des services en IDF. En GC, une dissociation selon les revenus semble exister : les plus riches subiraient moins la dépendance automobile que les plus pauvres. (MOTTE-BAUMVOL, 2007).

2-2-4) L'effet rebond

L'énergie se transforme en vitesse (ILLICH, 1974). Depuis Jevons (1865), de nombreux travaux montrent que l'amélioration de l'efficacité énergétique augmente les consommations d'énergie (ROQUES, 2016). Le changement de comportement des consommateurs réduit les économies d'énergies potentielles. La hausse de la demande peut annuler les économies (effet « backfire »). La formalisation théorique (KAZZHOM, 1980) du phénomène renvoie à l'effet rebond. En économie, l'élasticité quantifie la modification d'une variable y relativement à une variable x. Une élasticité de 3% signifie qu'une hausse de 10% de X augmente Y de 3%. Celle de la demande d'énergie (E) à l'efficacité énergétique (ε) est égale à l'opposé de l'élasticité du prix de l'énergie au service (P_e/P) à la demande (D) – 1. Nous avons (Cf Equation 94) :

$$(\Delta E/E) / (\Delta \varepsilon/\varepsilon) = (\Delta D/D) / (- \Delta (P_e/P) / (P_e/P)) - 1 \quad (94)$$

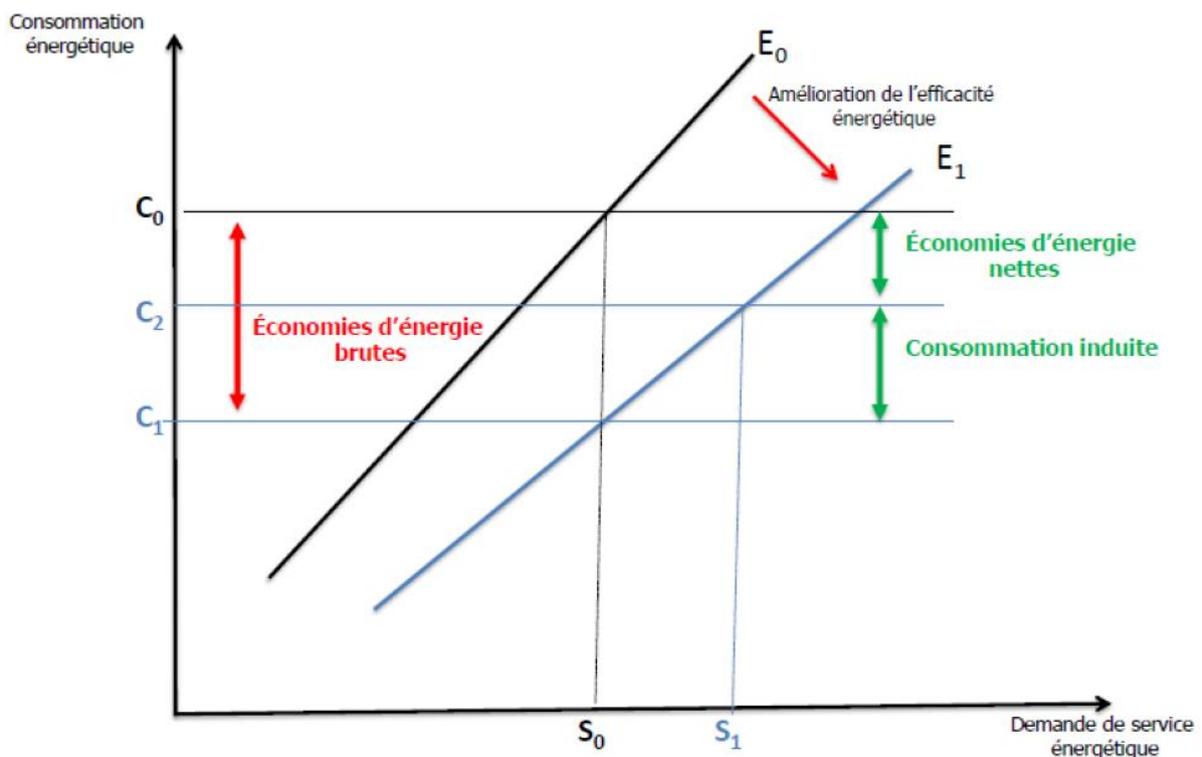
Source Ben Abdallah

Il en existe trois types (BEN ABDALLAH, 2015)

1. Direct : la baisse des consommations unitaires réduit les coûts d'usage. Les consommateurs réinvestissent le revenu. Ils voyagent plus loin et/ou plus souvent. Une part des économies d'énergie potentielles est ôtée. La demande pour l'énergie croît.
2. Indirect : les gains réalisés dans un poste permettent alors d'investir dans un autre. Ainsi les gains réalisés dans l'usage du véhicule sont réinvestis dans l'achat d'un téléviseur. Les consommations d'énergie du ménage augmentent.
3. Global : regroupe les effets direct et indirect modélisés ci-dessous (Cf graphique 73).

L'amélioration de l'efficacité énergétique conduirait toutes choses égales par ailleurs d'une situation C_0 à une situation C_1 soit $\Delta C_0 = C_1 - C_0$. Néanmoins, la demande croissante conduit à C_2 . L'économie d'énergie est $C_2 - C_0$ et la consommation induite, $\Delta C_1 = C_2 - C_1$. (Cf : Graphique 73)

Graphique 73: effet rebond global



Source Benabdallah 2015

L'effet rebond est le ratio de la consommation induite sur l'économie attendue (cf Equation 95)

$$ER = (\Delta C_1 / \Delta C_0) \times 100 \quad (95)$$

Source Benadallah

Dans les transports il a trois origines :

1. Le nombre de voiture croît, le volume consommée augmente avec la croissance de l'efficacité énergétique.
2. Les distances parcourues et les consommations augmentent avec la croissance des vitesses.

3. La baisse des prix de l'énergie augmente l'usage. Selon Goodwin (1992), une hausse des prix de 10% des carburants implique une baisse de 3% du trafic (GUEGUEN-AGENAIS, 2008).

Les différentes études basées sur des variables de trafic montrent un effet rebond qui varie entre 10 et 30% (ADEME, 2010) (DIMITROPOULOS & SORELL, 2007). Entre 90 et 70% des économies sont conservées (BEN ABDALLAH, 2015). En France, les prix du carburant ont baissé de 30% à euro constant entre 1975 et 2001 (NOE, 2010), les hausses des coûts du carburant entre 2000 et 2006 n'ont annulé que 15% de cette baisse (HIVERT WINGERT, 2010). L'énergie traduit un usage des réseaux et donc potentiellement l'effet de la modification de la forme urbaine renvoyant à l'automobile.

2-3) Conclusion de la revue de littérature

Il existerait une interaction une relation densité efficacité énergétique issu des gradients de densité de la forme monocentrique. Néanmoins, une grande incertitude apparaît : zonage, effets d'échelles, fiabilité de l'indicateur... De plus, la forme urbaine de l'IDF s'est modifiée. Du monocentrisme nous sommes passé à un modèle « mono-polycentrique » issu des choix de construction et de mobilité du SDAU de 1965, de la libéralisation des marchés fonciers en IDF, des baisses des coûts de l'énergie, de l'accès simplifiée à la voiture... L'effet rebond serait alors le signe énergétique de cette modification. Aussi une relation densité efficacité énergétique des résidents existe-t-elle en IDF sachant qu'il semble exister un effet rebond en IDF indiquant un changement de forme urbaine ?

3) Relation densité efficacité énergétique dans une forme mono-polycentrique en IDF.

3-1) Une causalité densité consommation par habitant remise en cause : la base UITP.

La relation densité et efficacité énergétique se reproduit-elle sur la base UITP ? Nous reprenons l'approche quantitative. La significativité des coefficients a été testé selon les hypothèses standards. Sur la base UITP, les facteurs explicatifs de la consommation par habitant sont la part modale, la portée, les consommations spécifiques et le PIB/habitant (Cf Tableau 151)

Tableau 151 : consommation par habitant (42 villes)				
Coefficients	Régression	Statistique t	Corrélation,	R ²
Constante	-31001,51	-5,97	0,88	0,74
Consommation spécifique	5308	4,22		
PIB/habitant	0,22	4,36		
Part modale	257,36	7,17		
Portée	965	4,20		

Source : auteur

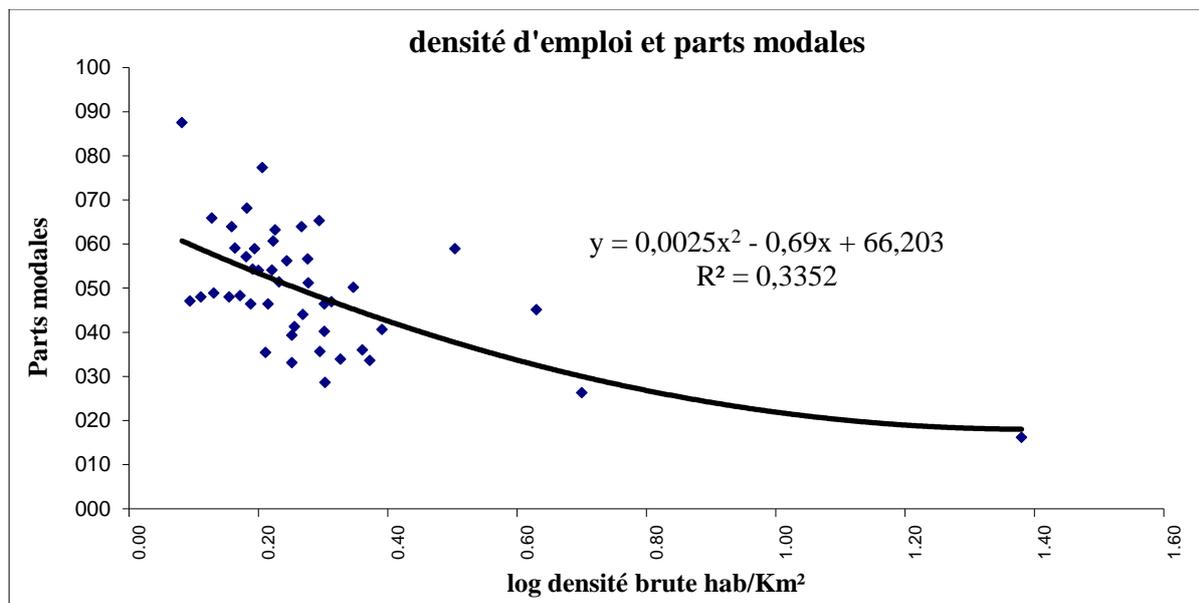
Nous ôtons les variations de la mobilité. Le PIB/habitant n'est plus signifiant. Nous effectuons une régression entre la croissance des choix modaux (Log) et les facteurs cités dans les études et présentes dans notre base. Le niveau de signification ($R^2= 0.60$) est important (Cf Tableau 152)

Tableau 152 : parts modales voiture (base UITP 45)				
Coefficients	Régression	Statistique t	Corrélation,	R^2
Constante	1,78	42,75	0,79	0,60
Offre TC	-0,000012	-4,09		
PIB/habitant	0,000003	2,38		
DAH	-0,0010	-4,53		

Source : auteur

Sans surprise, l'offre de TC et la DAH (densité activité humaine) interviennent dans un sens négatif tandis que la richesse par habitant joue en sens inverse. Avec les parts modales des TC, ces variables renvoient une image inversée. La régression entre densité (quel qu'elle soit emploi DAH ou D_b) et parts modales de la VP, a un faible niveau d'explication (R² = 0,33) (Cf Graphique 74).

Graphique 74: densités d'emploi et parts modales VP



Source : auteur

L'hypothèse selon laquelle la densité seule modifierait des éléments du choix modal n'est pas significative, la variation des formes urbaines sur les villes de la base de données pourrait l'expliquer. Aussi l'échelle de l'IDF la relation densité efficacité énergétique existe-t-elle ?

3-2) Forme monocentrique et effet rebond en IDF

3-2-1) méthode.

Nous travaillons sur l'effet rebond avec des déplacements et non des voyages généralement utilisés pour des études sectorielles sur les transports avec la méthode IDA (BIGO, 2020). L'hypothèse est celle d'un déplacement à voyage non chaîné ce qui minimise « le trafic » mais qui permet une spatialisation simple de cet effet. En effet, s'il existe à partir des déplacements, alors il existe selon les voyages. Nous spatialisons donc en IDF, l'existence ou non, de l'effet rebond et cherchons à savoir s'il existe selon toutes les mailles de trois couronnes Paris Petite Couronne (PC) et Grande Couronne GC entre 1975 et 2008. Nous calculons leurs densités. Une croissance des densités existe entre les mailles circulaires.

Nous avons donc une répartition monocentrique des densités que nous nommerons « forme ». Il ne s'agit pas d'un « modèle monocentrique » avec un gradient de densité.

3-2-2) l'effet rebond en IDF

Deux éléments nous intéressent, les portées et les volumes de déplacement. Les résultats sont conformes à l'effet rebond s'il est supérieur à 1 en valeur absolue. La quantification (Effet Rebond) est donnée par (BEN ABDALLAH, 2015) (Cf Equation 98) :

$$ER = ((\Delta D/D) / -(\Delta C_{us}/C_{us})) - 1 \quad (96)$$

Source : Ben Abdallah

Les variations des consommations espérées et obtenues ($-\Delta C_{us}/C_{us}$) sont calculées selon la consommation spécifique par véhicule. L'accroissement des portées ($\Delta D/D$) correspond au réinvestissement (Cf Tableau 153).

Années	1975	1982	1990	2001	2008
Portée D	5,40	5,60	5,80	6,40	6,20
Variation des portées ΔD	Nd	0,20	0,20	0,60	-0,20
$\Delta D/D$	Nd	0,04	0,03	0,09	-0,03
C_{us} consommation spécifique	3,46	3,28	2,86	2,67	2,51
ΔC_{us} variation des consommations spécifiques	Nd	0,46	0,42	0,19	0,16
$\Delta C_{us}/C_{us}$	Nd	0,14	0,15	0,07	0,06
$ER = ((\Delta D/D) / -(\Delta C_{us}/C_{us})) - 1$	Nd	-1,25	-1,23	-2,34	-0,49
IDF portée actif	6	6,2	6,8	7,4	Nd
IDF portée retraité	5	4,9	5	5,2	Nd

Source : calcul de l'auteur

Les résultats sont conformes à l'effet rebond jusqu'en 1999. Ensuite, il n'y a pas d'effet rebond, les portées baissent dans toutes les couronnes. Néanmoins, l'analyse selon les populations et les couronnes montre des résultats très contrastés (Cf Tableau 154).

Années	1975	1982	1990	2001
Portée Paris Actif Km	5,7	5,8	6,2	6,9
Portées Paris Retraité Km	5,2	6	6,3	6,4
Densité brute Paris Hab/Km ²	20676	19597	19327	19057
Consommation par déplacement Paris Mj	6,02	6,05	6,00	5,31
Indice de convergence Paris	0,27	0,28	0,31	0,37
Portées Petite couronne (PC) actif Km	5,2	5,4	5,8	6
Portées Petite couronne (PC) retraité Km	4,3	4,3	4,9	4,1
Densité brute PC Hab/Km ²	5422	5313	5435	5704
Consommation par déplacement PC Mj	6,80	7,43	7,34	6,56
Indice de convergence (PC)	0,26	0,28	0,31	0,37
Portées Grande couronne (GC) Km	6,8	7	7,6	8,4
Portées Grande couronne (GC) Km	5,4	5,2	5	5,7
Densité brute GC Hab/Km ²	239	265	300	323
Consommation par déplacement GC Mj	10,42	10,42	11,03	12,07
Indice de convergence (GC)	0,33	0,35	0,38	0,46
Portées IDF actif Km	6	6,2	6,8	7,4
Portées IDF retraité Km	5	4,9	5	5,2

Source : EGT + auteur

La variation des portées est similaire entre actifs et retraités, sauf en PC. Nous ajoutons une information supplémentaire : l'évolution de la valeur de densité. Pour la GC c'est un résultat attendu. Il existe une augmentation des portées qui peut expliquer l'effet rebond. Or la compétitivité énergétique de la VP croît expliquant une augmentation de l'usage du fait que les coûts d'usage baissent puisque l'efficacité énergétique augmente et stabilise voire fait baisser le prix du carburant par kilomètre (HIVERT & WINGERT, 2010). Il existe donc une utilisation de la vitesse plus importante dans cette couronne ce qui est conforme aux constats de la littérature voire à la planification du SDAU qui encourageait ce type la promotion de l'automobile dans certains milieux. C'est alors totalement conforme à l'effet rebond.

Ensuite, pour la PC, le résultat est contrasté, les portées augmentent pour les actifs, mais augmentent puis diminuent pour les retraités, alors que l'efficacité énergétique croît et que les coûts du carburant sont les mêmes pour les deux populations. Il existe une grande stabilité des consommations par déplacement et nous notons une diminution dès 1982, de la consommation par déplacement, alors que les portées augmentent toujours et que la compétitivité énergétique de la VP croît. Il y a alors une compensation dans l'usage.

Pour Paris c'est un résultat étonnant, les portées dans les travaux précédant baissent avec les densités. L'effet rebond aurait donc affecté Paris au travers des portées mais la consommation par déplacement baisse ce qui indique la encore une compensation dans l'usage. Les portées de la VP semblent donc « insensibles » à la forme urbaine ce qui ne semble pas être le cas de l'usage. Les volumes de déplacement de l'automobile sont donnés par (Cf Equation 99):

$$\text{Volume de déplacement} = \text{Population} \times \text{part modale} \times \text{Mobilité/taux de remplissage. (97)}$$

Source : EGT + auteur

Nous retrouvons la encore l'effet rebond. (Cf Tableau 155)

Tableau 155 : effet rebond direct et volumes					
Années	1975	1982	1990	2001	2008
Volumes V	8232	9916	12226	12969	13680
Variation des volumes ΔV		1685	2310	743	712
ΔV/V		0,17	0,19	0,06	0,05
C _{us}	3,74	3,28	2,86	2,67	2,51
ΔC _{us}		0,46	0,42	0,19	0,16
ΔC _{us} /C _{us}		0,14	0,15	0,07	0,06
ER = ((ΔD/D)/-(ΔC _{us} /C _{us}))-1		-2,20	-2,28	-1,82	-1,82

Source : calcul de l'auteur

Mais le découpage montre des divergences (Cf Tableau 156)

Tableau 156 : volume de déplacement automobile					
Années	1975	1982	1990	1999	2008
Paris nombre de déplacement	1178	1207	1231	1066	815
Consommation par déplacement Mj	6,02	6,05	6,00	5,31	4,64
Indice de convergence Paris	0,27	0,28	0,31	0,37	0,35
Densité brute Paris Hab/Km ²	20676	19597	19327	19057	19876
Petite couronne (PC) nombre de déplacement	3077	3709	4164	4387	4172
Consommation par déplacement PC Mj	6,80	7,43	7,34	6,56	5,99
Indice de convergence (PC)	0,26	0,28	0,31	0,37	0,34
Densité brute PC Hab/Km ²	5422	5313	5435	5704	5949
Grande couronne (GC) nombre de déplacement	3976	5000	6831	7516	8694
Consommation par déplacement GC Mj	10,42	10,42	11,03	12,07	11,78
Indice de convergence (GC)	0,33	0,35	0,38	0,46	0,43
Densité brute GC Hab/Km ²	239	265	300	323	337

Source : calcul de l'auteur

Seule la GC voit un effet rebond tant sur les portées que les volumes de déplacement jusqu'en 1999 et seulement sur les volumes ensuite. Pour la PC, la quantité de déplacement VP diminue depuis 1990 et restait stable antérieurement. C'est contrasté. Si l'effet rebond est acceptable sur les volumes et les portées jusqu'en 1990, ce n'est plus valable que pour les actifs entre 1990 et 1999. Ce n'est plus valable ensuite. Paris voit un effet rebond sur les portées, mais pas les volumes jusqu'en 1999. Ensuite Paris et la PC, ont une convergence plus faible que la GC. Le TC est plus compétitif dans des densités fortes que faibles. Si l'augmentation des densités par couronne ne semble pas avoir d'effet sur la convergence, nous retrouvons alors un effet de la forme urbaine monocentrique sur les efficacités énergétiques. Plus les densités croissent plus l'efficacité énergétique des habitants augmente. Ensuite nous retrouvons l'effet rebond en GC, ce qui montre dans les milieux faiblement denses une coordination urbanisme transport tournée vers automobile. Elle montre les limites de la technologie dans la croissance de l'efficacité énergétique des déplacements où l'augmentation de l'efficacité est compensée par l'usage. Mais l'évolution montre que deux éléments distincts sont à l'œuvre.

1. La variation des portées est indépendante de la densité du point de vue de la forme urbaine et de la densification. En effet, elles augmentent dans Paris et la GC alors que leur valeur de densité sont grandement différentes. La portée augmente en GC alors qu'elle se densifie.
2. L'usage lui montre du point de vue de la forme urbaine une constante. Le milieu le plus dense avec l'usage le plus faible pour la VP est le plus efficace. C'est donc sur la part modale et non la portée, qui croît dans la couronne la plus dense, que se situerait l'effet de la « forme urbaine » sur la consommation par déplacement des habitants.

Néanmoins, des effets d'échelle peuvent modifier les relations : la représentation monocentrique ne suffit donc pas d'autant que la forme urbaine se modifie comme le montre l'effet rebond.

3-3) Densité et consommation du déplacement un phénomène reproduit en IDF.

3-3-1) Densité par secteur EGT

Les surfaces par commune recensées par l'IGN (Institut Géographique National) regroupent les zones bâties et les autres zones. Par secteur la densité brute (D_B) est donnée par (Cf Equation 96) :

$$\Sigma \text{Habitants} / \Sigma \text{Surfaces} = \text{densité brute du secteur (98)}$$

Source : calcul de l'auteur

La densité pose des problèmes de métrique. Le logarithme les atténue (DALMENICO PEIFFER, 1986). Nous changeons de variable avec un logarithme de base 10. (Cf Equation 97).

$$X = \log(D) \text{ (99)}$$

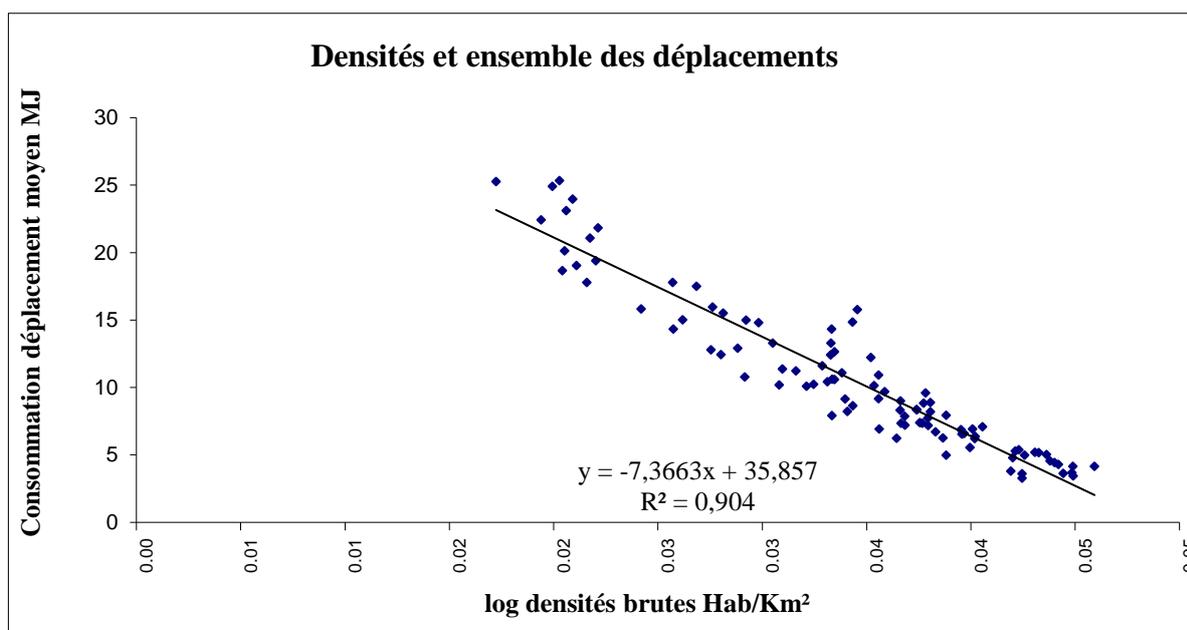
Ces densités ne renvoient eux à aucun découpage en maille préalable contrairement aux couronnes ce qui nous permettra de juger de l'effets d'échelles.

3-3-2) Densité et efficacité énergétique de l'habitant selon les secteurs.

Nous changeons donc d'échelle. Les secteurs EGT présentent l'avantage de renvoyer à un découpage indépendant d'une forme quelconque. Il n'y a donc pas d'effets de maille dû à une agglomération de territoire spécifique dans la relation. Ensuite, le regroupement des communes limite les biais due à la dispersion des densités, sans ôter leur variation due à la spécificité du territoire. Nous calculons une consommation par habitant selon une mobilité effectuée et non potentielle. Celle-ci est indépendante des densités ($R^2 = 0$) vérifiant certains constats (ENMV, 2020). La relation entre densités d'habitant et consommation par déplacement moyen en JO (tout motif confondu) est forte ($R^2=0,90$).

La hausse des densités semble conduire à l'efficacité énergétique. (Cf Graphique 75)

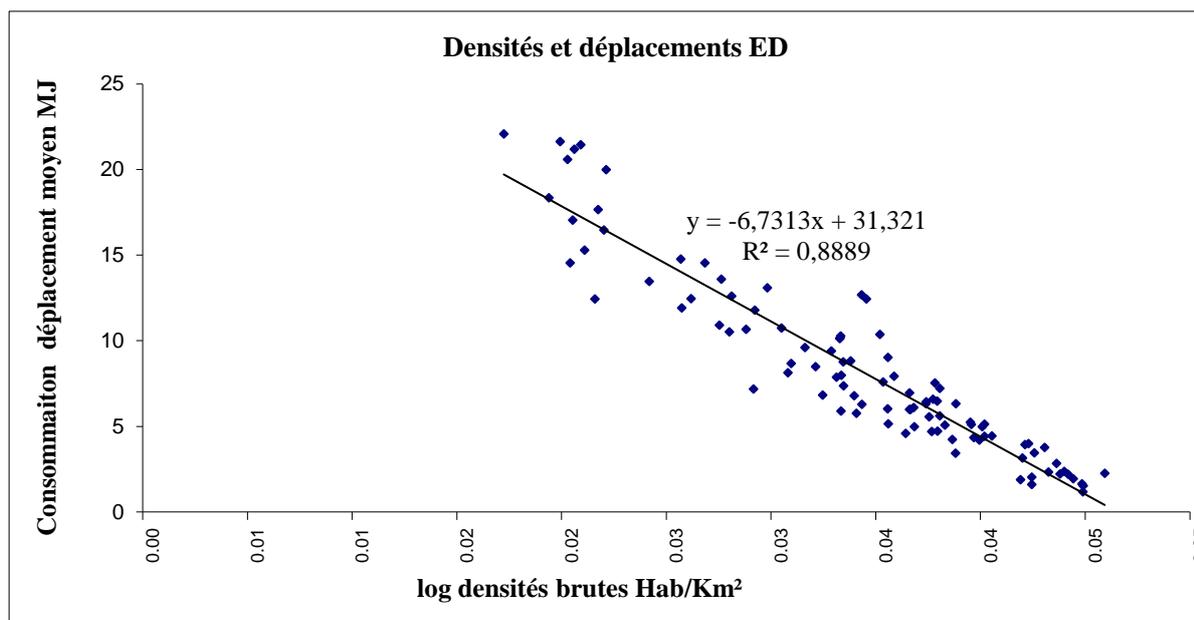
Graphique 75: consommation par déplacement moyen et densité brute



Source : calcul de l'auteur

La consommation par déplacement baisse pour la VP (Test de White OK à 10%) (Cf Graphique 76)

Graphique 76: consommation par déplacement moyen VP et densité

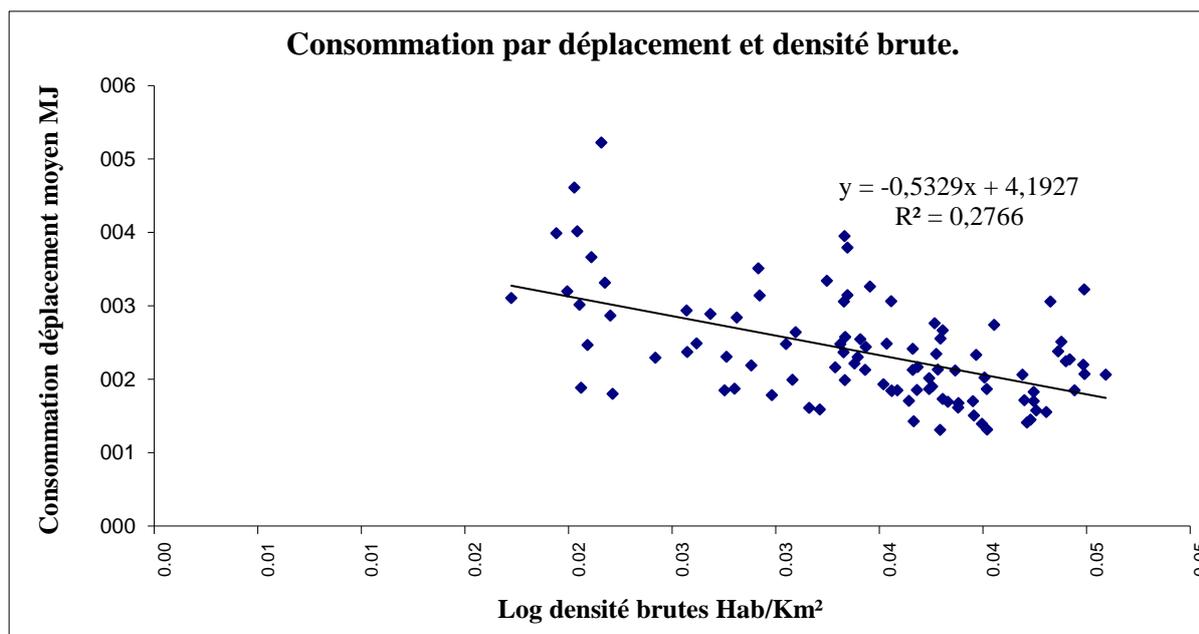


Source : calcul de l'auteur

Ce test conduit à soupçonner une instabilité spatiale dans la relation entre efficacité énergétique par déplacement et la densité. Cette instabilité peut provenir de deux variables la portée ou la part modale. En effet, si l'une des deux variables ne varie pas conjointement à la densité alors une existe une modification de l'efficacité énergétique due à l'usage, même si la relation reste forte du fait que la portée de la VP varie faiblement.

Pour le TC, la relation est moins forte même si elle est aussi négative ($R^2 = 0.27$). Cette fois nous observons que l'usage au travers des portées modifie la relation indépendamment du cadre spatial. En effet, il existe un mécanisme de compensation entre portée et parts modales dans l'indicateur. Les parts modales croissent selon les densités pendant que les portées décroissent. La valeur de l'indicateur varie donc faiblement. (Cf Graphique 77).

Graphique 77: consommation par déplacement moyen TC et densité



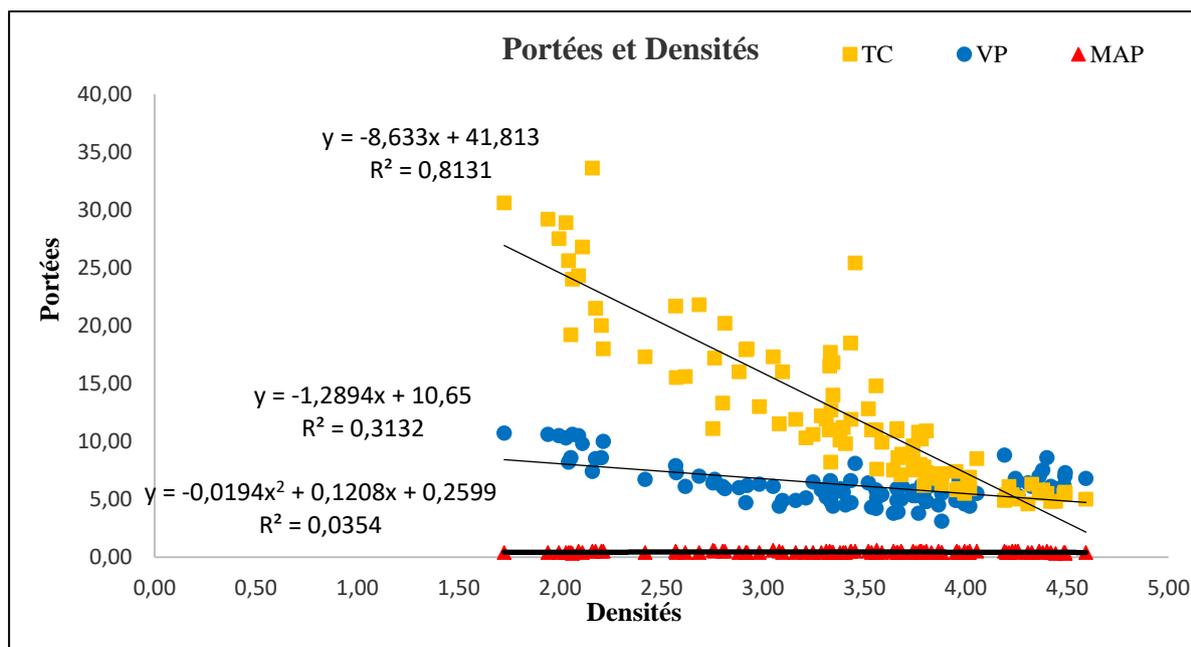
Source : calcul de l'auteur

La relation très forte entre efficacités énergétiques et densités se retrouve dans la forme urbaine mono-polycentrique en IDF. Néanmoins, elle se différencie selon les modes, le mécanisme de compensation interne du TC dans les consommations par déplacement l'explique. Nous examinons la variation des deux variables d'usage portée et parts modales des modes.

3-3-3) Variation des portées.

Beaucoup d'études insistent sur la réduction des portées, due aux densités, dans la croissance de l'efficacité énergétique des habitants. Les portées de la MAP ne varient pas ($R^2 = 0,0276$). Pour le TC, ($R^2 = 0,82$) en ôtant un point extrême la ville nouvelle de Mante la Jolie, elles baissent. Les portées du TC correspondent à une organisation monocentrique avec un réseau radioconcentrique. En moyenne les portées TC (12,32) sont supérieures à celles de la VP (6,25). Mais ces dernières baissent dans l'intervalle de densité [1,75 ; 3] stagnent et remontent dans l'intervalle [4,4 ;5] alors que l'effet « concentration » de la densité auraient dû les faire diminuer. La relation est très faible (0.31) ce qui confirme ce constat. Contrairement au TC, la VP voit ses portées baisser puis augmenter en milieu très denses (Cf Graphique 78).

Graphique 78 : portées et densité



Source : calcul de l'auteur

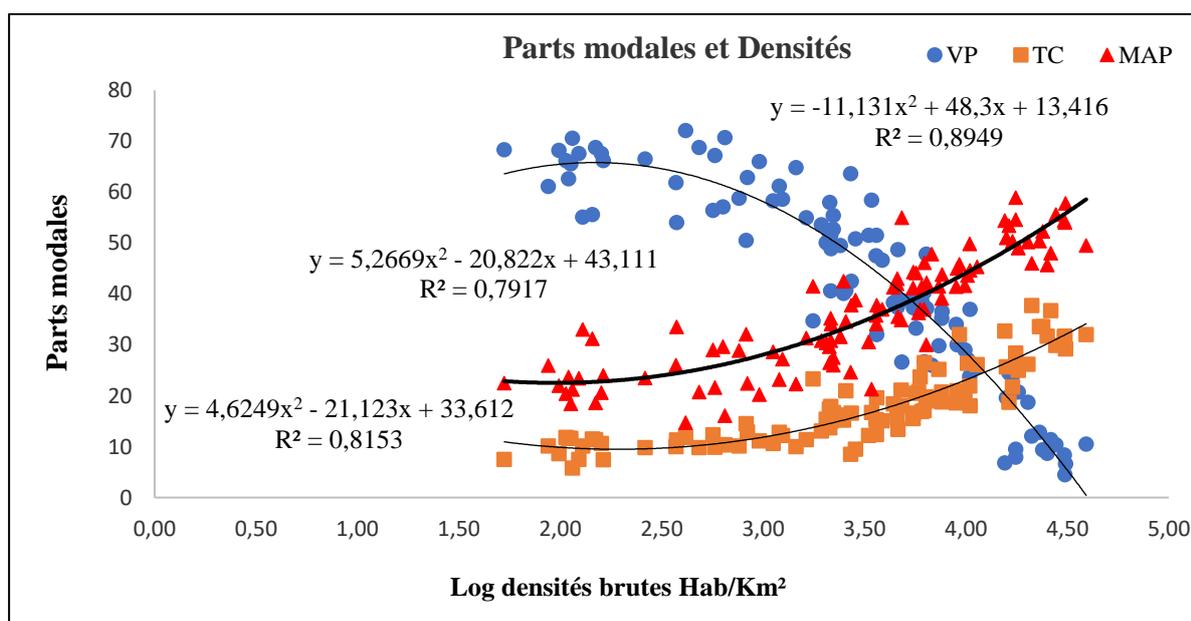
La relation renvoie à nos constats, lors de l'effet rebond, cette fois sur les secteurs EGT.

Cette croissance montre qu'en zone urbaine dense « mixte » des portées en *jours ouvrables* peuvent augmenter puisqu'il s'agit des secteurs parisiens. Cette croissance pourrait expliquer l'instabilité constatée plus haut dans la relation aux densités. En conséquence, la variation de l'efficacité énergétique n'est due qu'aux parts modales pour la VP.

3-3-4) Variation des parts modales.

Nous faisons la régression entre densités brutes et parts modales en IDF. Nous arrivons de nouveau aux mêmes éléments connus de la littérature, alors que la région est « hybride » (Cf Graphique 79)

Graphique 79: densité et parts modales.



Source : calcul de l'auteur

La relation densité et choix modal reste très forte. Nous retrouvons alors des résultats similaires à ceux obtenus avec une forme monocentrique. Néanmoins, des caractéristiques antérieures de la forme urbaine peuvent montrer leur permanence surtout si elles restent importantes. La forme urbaine en IDF reste « mono-polycentrique ». La permanence de la relation n'invalide pas nécessairement un effet de forme urbaine monocentrique en région IDF qui reste, comme le montre notre étude, tant sur les consommations unitaires que par déplacement.

3-3-5) Discussion.

La nouveauté consiste dans le fait que cette efficacité se modifie selon les modes. Leurs portées ne varient pas de la même manière dans cette forme. Aussi nous obtenons le tableau suivant si nous résumons les résultats : (Cf tableau 157)

Tableau 157 : modification des facteurs spatiaux de l'efficacité selon la densité des modes.		
Modification	Portées	Parts modales
TC	Oui	Oui
VP	Non	Oui

Source : auteur

Elles diminuent pour le TC et restent stables pour la VP voire augmentent si l'on en juge par l'effet rebond et l'étude des secteurs EGT. La forme urbaine ne semble pas avoir d'effets sur la portée de la VP, tout comme la densification du reste, comme le montre l'étude sur l'effet rebond et la croissance des portées dans une densification croissante en GC. Ce n'est pas avec les portées que l'efficacité énergétique par déplacement de la VP augmente selon les densités, mais au travers de l'usage, c'est-à-dire aux parts modales. Or la consommation par déplacement est le principal constituant de la consommation par habitant des secteurs.

Les parts modales sont le déterminant commun de la variation des efficacités énergétiques des modes selon la forme urbaine. Le principal enseignement de cette première étude est que la densité semble bien modifier les parts modales et donc les trafics en IDF. Cette variation de part modale c'est à dire la modification des choix modaux des individus selon les densités devient donc le centre de notre questionnement.

4) Conclusion : des résultats qui interrogent.

La notion forme urbaine est polysémique. Construite à partir des densités, elle trouve un pendant au travers des flux qui sont la conséquence de leur dispersion. Après l'exposé de l'indicateur densité, nous rappelons l'interventionnisme étatique en IDF avant les modèles et leurs théories économiques. Les modèles monocentriques ou polycentriques montrent la dispersion des résidences et des emplois selon la rente urbaine et des coûts de transport. La relation entre densité et efficacité énergétique serait issue d'une forme urbaine particulière la forme monocentrique. Des études montrent une relation au travers des variables de mobilité associées à cette efficacité (portée et parts modales) tant d'un point de vue international, qu'interne à une région. Un faisceau de facteurs permet d'inférer cette relation avec les variables spatiales de l'efficacité énergétique. Néanmoins, il reste à noter que ces relations sont fragiles et dépendent des échelles de référence. La causalité est contestable.

La forme mono-polycentrique construite à partir des flux renvoie à celle de l'IDF. Elle est issue de la dispersion des emplois et des résidences en IDF. Il existe alors une polarisation des territoires et des réseaux. La vitesse devient le facteur d'interaction spatiale privilégié dans les flux de transport. Son augmentation vitesses modifie les localisations des résidences et des emplois. L'effet rebond issue de l'automobile pourrait traduire ces modifications de vitesse et de mode en terme énergétique.

Nous étudions alors le phénomène à partir de la base UITP et constatons que la relation densité et efficacité énergétique n'est pas convaincante ce qui peut d'ailleurs être due à la variation des formes urbaines. Nous construisons une forme monocentrique et montrons l'existence d'un effet rebond en Grande couronne expliquant la croissance de la consommation par déplacement entre 1975 et 2008 même s'il semble s'atténuer par la suite. Néanmoins, les résultats antérieurs entre consommation par déplacement et forme monocentrique semblent se perpétuer à une petite échelle. Nous changeons d'échelle. Cette étude confirme, tout en la nuanciant, la relation entre efficacités énergétiques et densités. En effet, les consommations par déplacement des TC ne dépendent pas des densités ce qui n'est pas le cas de la VP. Le mécanisme de compensation interne à la consommation par déplacement augmentation des portées et baisse des parts modales l'explique.

Si les relations entre densité et portées du TC sont conformes, avec un modèle monocentrique doté d'un réseau radioconcentrique, ce n'est pas le cas pour la VP, ce qui est nouveau, vis à vis des études antérieures où les portées baissaient selon les densités, quelque-soit les modes. Cela a pour conséquence de faire des parts modales l'élément essentiel de variation des consommations par déplacement. Malgré la modification de la forme urbaine, la relation entre parts modales et densités reste, quant à elle, conforme aux études antérieures. Néanmoins, le caractère « mono-polycentrique » de la forme urbaine l'explique peut-être. Les caractéristiques de la forme monocentrique continuent à être prégnantes en IDF justifiant peut-être la permanence de la relation entre part modale et densité.

Aussi les éléments suivants sont à retenir :

- L'effet rebond en GC montre une modification de la forme urbaine de cette zone. Néanmoins, il s'atténue dans les autres couronnes, laissant supposer un effet « spatio-réculaire » issue de la densification sur l'efficacité énergétique.
- Cette efficacité énergétique est bien modifiée dans les secteurs alors qu'il existe une modification de l'échelle de référence. Néanmoins, une différence existe entre les modes. La TC et la VP n'ont pas les mêmes relations, ce qui se justifie par la « compensation interne » des variables de la consommation par déplacement, augmentation des parts modales et baisse des portées, du TC vis-à-vis de la VP.
- Seule la relation densités-parts modales semble affecter les consommations par déplacement de la VP et du TC conformément aux travaux antérieurs.

Néanmoins, si les densités modifient les parts modales, alors elles devraient modifier les préférences des individus dans les choix modaux. Une relation expliquerait alors, au travers du temps ou de l'usage, ou des deux types de composante, l'effet de l'espace sur l'énergie consommée.

Chapitre 6 : La densité entraîne-t-elle une modification des parts modales TC ? Une approche par les coûts généralisés du modèle GLOBAL.

Introduction.

Que ce soit dans une forme urbaine, monocentrique ou autre, si les densités modifient les parts modales et l'efficacité énergétique des déplacements des individus alors elles devraient modifier leurs préférences. Comment ces deux dimensions sont en relation ? Ce qu'il s'agit de savoir n'est pas si la densité est l'unique cause de cette modification, mais si la densité *peut être une des causes de cette modification* par une relation avec les variables de coûts généralisés en jours ouvrables.

C'est à partir d'un modèle de déplacement, le modèle GLOBAL de la RATP que nous trouvons la fonction d'utilité de référence sur laquelle nous travaillons, pour des raisons théoriques, puisque sa fonction d'utilité est éprouvée sur les déplacements d>IDF, et pratique parce que des travaux sur les coûts généralisés de ce modèle existent déjà. Ils peuvent servir de base aux nôtres, sans que le modèle ne puisse être réutilisé. En effet, les calculs de coût des modèles de choix modaux dépendent des zonages internes homogènes du point de vue territorial et démographique (CERTU, 2003). Ils sont calibrés sur les flux de déplacement de zone à zone, pas sur les densités des secteurs EGT. Le modèle GLOBAL utilise une approche qualitative statistiquement. Or nos données, nos zones, et notre approche est quantitative, aussi nous devons reconstituer les coûts généralisés des secteurs. Pour nous « l'individu rationnel » fait la différence de coûts généralisés de « type GLOBAL » pour choisir son mode dans les secteurs.

Aussi, nous calculerons les coûts généralisés des secteurs EGT. Nous confronterons les résultats antérieurs avec les résultats obtenus par nos calculs de coûts généralisés. Ensuite, nous vérifierons que leur différence est bien en relation avec les parts modales pour savoir si la modélisation permet, dans les secteurs EGT, de retrouver des résultats conformes à ceux obtenus avec la démarche qualitative du modèle, même si les zonages et les méthodes statistiques utilisés sont différents.

Ensuite, nous entamerons une étude d'un éventuel effet du sol, sur cette variation des coûts généralisés et des parts modales. Nous démontrerons que les densités d'habitants ne modifient pas les parts modales. Trois étapes constituent ce chapitre :

1. La première est un rappel méthodologique des coûts généralisés du modèle GLOBAL.
2. La deuxième à un calcul quantitatif des coûts généralisés dans les secteurs EGT.
3. La troisième à l'étude de la relation entre densités et coûts généralisés dans ces secteurs.

1) Elément de méthode : les coûts généralisés du modèle GLOBAL

1-1) Les modèles 4 étapes

1-1-1) Principe de fonctionnement.

Les modèles 4 étapes proviennent des USA. En 1956, le fédéral highways act confirme leur utilisation pour évaluer la rentabilité des infrastructures aux USA. Dès l'origine, ils sont calés sur les enquêtes déplacement et sont utilisés pour deux raisons principales (PREDIT, 2000) :

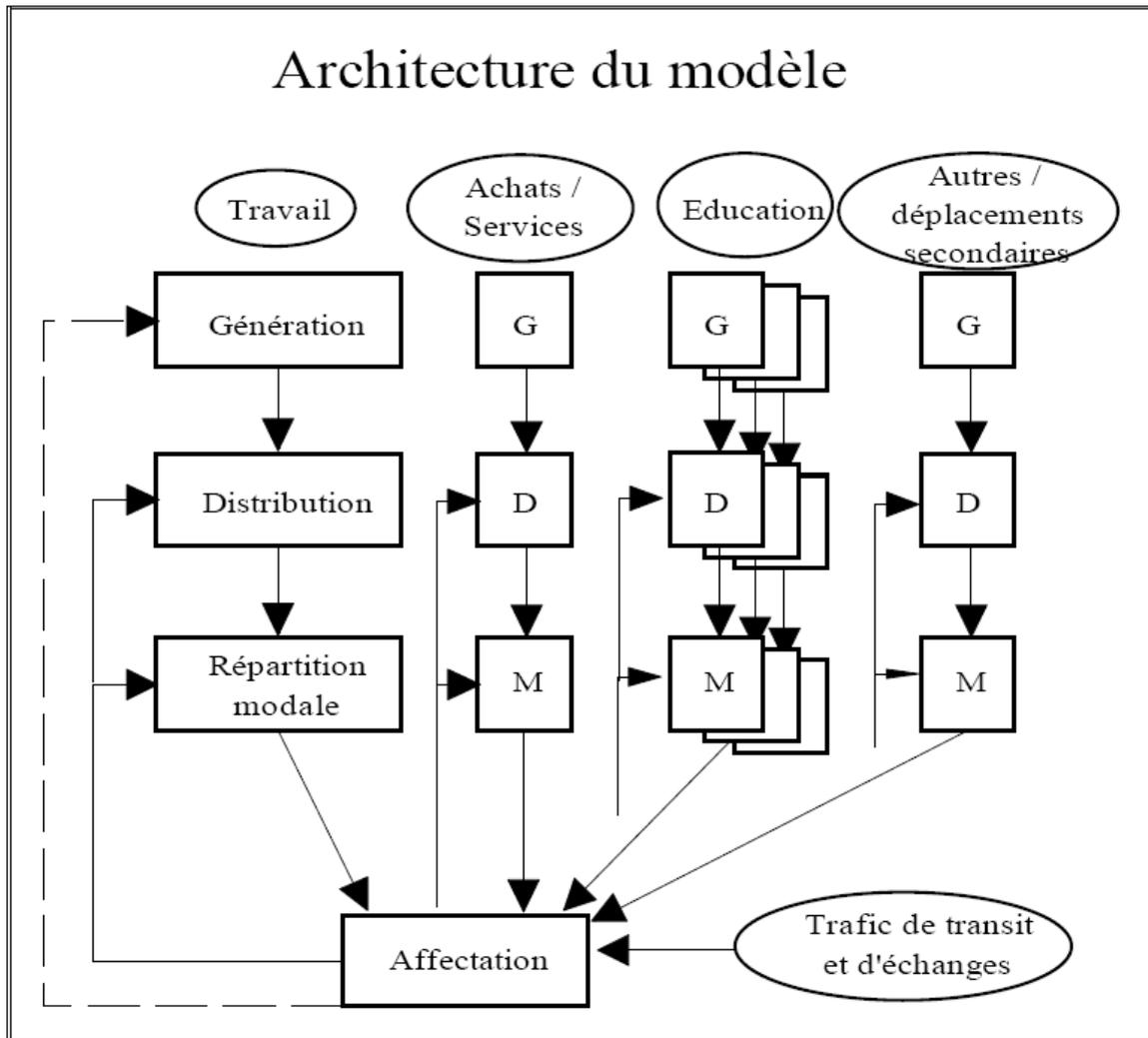
- Le dimensionnement des infrastructures c'est à dire évaluer une charge maximale.
- L'évaluation socio-économique, c'est à dire la monétarisation des avantages du projet par rapport à une situation de référence sans objet. Il ne s'agit pas de déterminer une charge maximale dans une nouvelle infrastructure, mais d'évaluer les avantages économiques d'un projet en termes de taux interne de rentabilité ou de bénéfice actualisé. En outre, de nouvelles demandes attachées aux gains environnementaux se font jour (MA, 2007).

C'est avec les modules de génération et de distribution des flux qu'a commencé leur construction (CHATZIS, 2013). Leur structure actuelle se finalise dans les années 1970. Néanmoins, la transposition aux transports de la théorie micro-économique pose quelques problèmes :

- Le transport est un bien intermédiaire. La fonction d'utilité n'est pas adaptée.
- Les biens transports ne sont pas divisibles en quantité.
- Le prix des transports n'est pas forcément un bon indicateur d'équilibre.
- La rationalité néo-classique des acteurs n'est pas avérée.

Fonctionnellement, quatre étapes se succèdent. Selon un motif, des résidents génèrent des déplacements qui se distribuent également entre deux zones, d'émission et de réception, selon un modèle gravitaire. Ensuite, le module de répartition attribue des parts modales à chaque mode. Enfin l'affectation donne le trafic par réseau selon les possibilités d'accès (Cf Figure 42)

Figure 42: modèle 4 étapes



Source : CERTU

Nous n'exposerons pas le module d'affectation des trafics qui est inutile pour l'étude. Il existe plusieurs types de modèles de choix modaux en IDF.

1-1-2) Génération et distribution des flux.

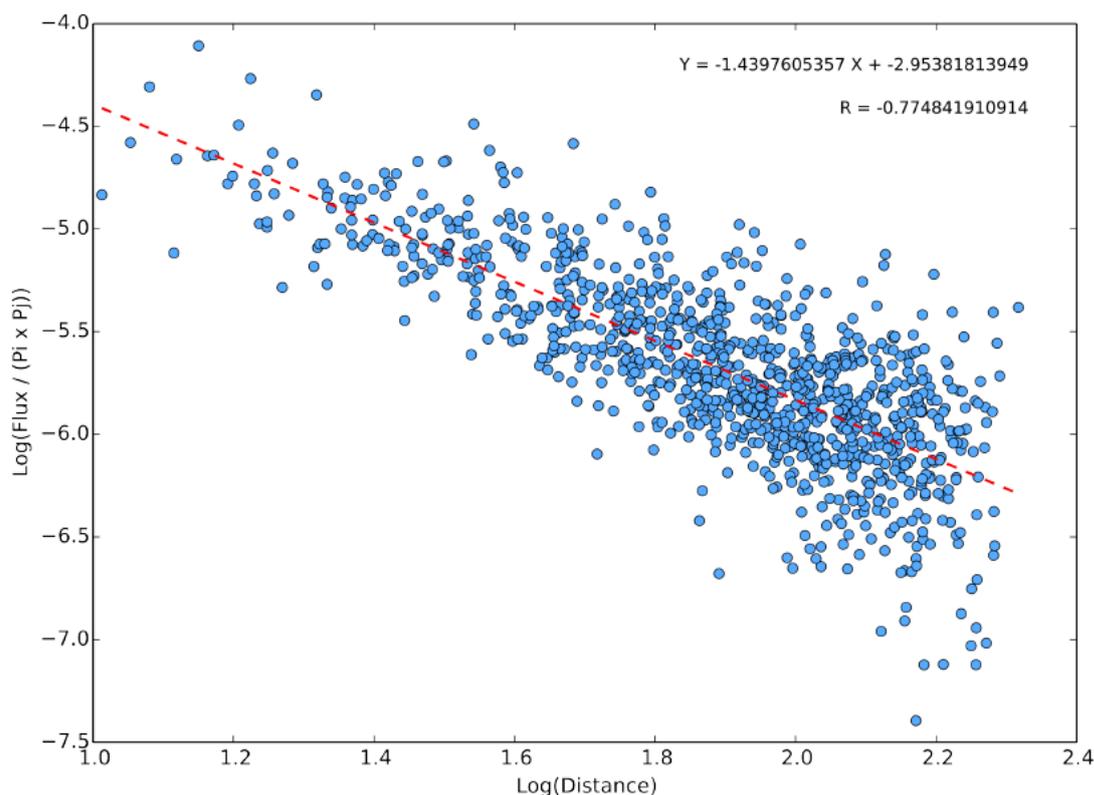
Les données de flux que les enquêtes mesurent (BONNEL, 2002) ne sont pas équilibrés. Les flux identifiés de zone à zone sont donc équilibrés (THIERNO, 2010). Ensuite, la distribution spatiale des déplacements consiste à répartir les volumes de déplacements émis et reçus par chaque zone entre les différentes Origine-Destination (OD) possibles. L'équation générique est la suivante (Cf Equation 100):

$$I = K (P_i P_j) / D_{ij}^2 \quad (100)$$

Source : l'homme

I_{ij} = niveau d'interaction P_i (P_j) = population des zones P_i et j D_{ij} = distance entre i et j . Les premiers modèles gravitaires, issus d'une analogie des travaux de Newton (MERCIER, 2008), viennent de Ravenstein (NOIN, 1994). La régression du motif domicile travail montre une bonne adéquation du modèle gravitaire à la répartition des flux. (Cf Graphique 80).

Graphique 80: flux domicile travail val de marne et distance.



Source l'homme 2018.

Les « classiques » (LHOMME, 2018) ont été utilisés dans l'interurbain et transposés à l'urbain (BONNEL, 2002). D'autres modèles gravitaires basés sur l'entropie (MILLION, 2015) ou les coûts généralisés (fonction de résistance) existent (GLEYZE, 2001) (BONNEL, 2002)

1-1-3) La répartition modale du modèle GLOBAL

Les modèles 4 étapes modélisent la variation des parts modales selon deux approches. Certains reprennent les déplacements (DAVIDSUM transilien, MODUS, GLOBAL), d'autres aux boucles de déplacement (ANTONIN ou IMPACT). Le premier renvoie à des individus qui choisissent leur mode selon des composantes déterminés, le second à des individus qui maximisent leur temps de leur cheminement. Certains modèles de déplacement sont agrégés et s'appuient sur les parts modales moyennes, d'autres désagrégés s'appuient sur le choix modal individuel. Les modèles « désagrégés » de choix modal, apparaissent parce que l'approche zonale n'indique rien individuellement. Ils sont donc désagrégés dans le sens où la zone est une collection d'individus distingués qualitativement par des attributs économiques (BONNEL, 2002) sur une surface homogène.

Les parts modales des enquêtes EGT s'adressent à un individu dont le choix prend des modalités exclusives. Prendre l'autobus exclut la voiture. Aussi, la variable prend deux valeurs (0,1), les perturbations prennent des valeurs discrètes, l'hypothèse de continuité et de normalité des résidus n'est pas respectée. L'utilisation des Moindre Carré Ordinaire (MCO) est impossible. Pour outrepasser cette difficulté, l'analyse s'effectue avec une distribution de probabilité.

Deux types de régression existent : dichotomique ou polytomique. Le premier renvoie à deux choix de la variable qualitative (0.1), le second renvoie à plusieurs (0.1 2..). Ces traitements construisent une variable latente, ou plusieurs. Pour une variable Y (0 ou 1), Y* est sa variable latente associée (JACQUOT, 2000) (Equation 101)

$$Y = 0 \text{ alors } Y^* < 0 \quad Y = 1 \text{ alors } Y^* > 0 \quad (101)$$

La variable latente est reliée linéairement à la variable explicative X (Equation 102)

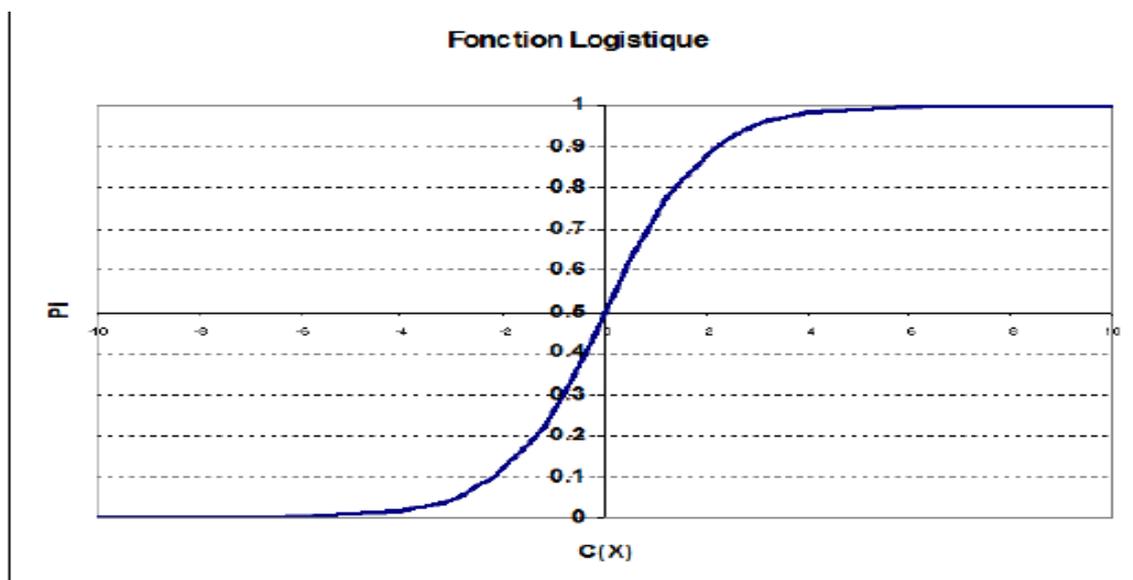
$$Y^* = A X + U_i \quad (102)$$

Source : Jacquot

Par hypothèse cette perturbation suit une loi normale centrée réduite (modèle PROBIT) ou de type $F(U_i) = 1 / (1 + e^{-U_i})$ (LOGIT) (Cf Graphique 81). Dans ce dernier cas, l'hypothèse d'indépendance des choix non pertinents doit se vérifier. La perturbation U_i prend deux valeurs $U_i = -A X$ si $Y = 1$ ou $U_i = 1 - A X$ si $Y = 0$. La distribution de probabilité π sur l'intervalle [0,1] de l'estimateur A est alors connu. Nous avons sur cette fonction (Cf Equation 103):

$$\pi = e^{-AX} / (1 + e^{-AX}) \quad (103)$$

Graphique 81 : fonction logistique



Source : Rakotomalala

Pour estimer ce paramètre (π), maximisant la probabilité de retrouver l'échantillon observé (WONNACOT, 1974) la méthode du maximum de vraisemblance est introduite. Dans notre cas, elle suit une loi binomiale $(1, \pi)$ de paramètre y (Cf Equation 104)

$$L = (\pi)^y \times (1 - \pi)^{(1-y)} \quad (104)$$

Source : Rakotomalala

Selon une hypothèse, ou des variables expliqueraient une relation, nous calculons le log de la vraisemblance de cette fonction qui est concave ; La dérivée admet une solution unique, l'itération est convergente. Généralement, l'équation n'est pas soluble analytiquement. L'algorithme des programmes varie (Newton Raphson ou autre) ce qui peut modifier les résultats (RAKOTAMALA, 2017). Pour calculer la qualité de son ajustement, deux sont distingués dans Stat d'Excel© :

Le pseudo R^2 de Mac fadden, le pseudo- R^2 de Cox and snell. Ils comparent la déviance entre un modèle réduit à une constante et le modèle estimé. Cette déviance dans le modèle linéaire, est en quelque sorte la différence entre la somme totale des carrés et la somme des carrés résiduelle. Le premier fait la différence entre un modèle parfait (=1) et le ratio des log-vraisemblances qu'il existe entre le modèle (LLm) et le modèle réduit à une constante (LLo). Le second fait la différence entre un modèle parfait (=1) et le ratio des vraisemblances (Lo) et Lm modulo un exposant dont le ratio est $2/n$ avec n le nombre de variables. Le coefficient de Nagerlkerke (RAKOTAMALA, 2017) normalise alors ce coefficient. Il reste à évaluer la capacité du modèle à être prédictif. Nous exposons le rapport de vraisemblance. Une matrice de confusion avec deux possibilités réelles et prédictives, positive ou négative, est construite (RAKOTAMALA, 2017) (Cf Tableau 158).

Tableau 158: matrice de confusion

$Y \times \hat{Y}$	$\hat{+}$	$\hat{-}$	Total
+	a	b	$a + b$
-	c	d	$c + d$
Total	$a + c$	$b + d$	$n = a + b + c + d$

Source : Rakotomalala

Quatre options en résultent :

1. a et d = des vrai positifs et négatifs c'est à dire que le modèle (+ ou -) et la réalité est conforme (+ ou -). Le taux de succès est donné par $(a + d) / n$ (n nombre de variable)
2. c et b = des faux négatifs et positifs c'est-à-dire qu'il y a divergence entre le modèle et la réalité. Le taux d'erreur est donné par $(b+c) / n$.

Plusieurs indicateurs sont alors construits nous nous centrons sur deux :

La sensibilité ou taux de vrai positif ou rappel entre la prévision (+ et -) et la réalité (+) (Cf Equation 105)

$$S = a / (a+b) \quad (105)$$

La spécificité ou le taux de vrais négatifs (Cf Equation 106)

$$S_p = d / (c+d) \quad (106)$$

Le rapport de vraisemblance rapporte la sensibilité (S) et la spécificité (S_p), où le taux de vrais positifs et négatifs. Plus il est grand, plus la vraisemblance de la relation l'est. Cela revient à opérer la différence des déviances. Il en résulte un écart comparé à une distribution du Khi deux. Sous H_0 , le modèle ne signifie rien : (Cf Equation 107)

$$LR = -2 \times \ln (L(Ms)/L(Mr)) \quad (107)$$

Source : Rakotomalala

Cette méthode ne teste que la prédiction y et pas la probabilité π ce qui justifie d'autres tests pour tester la fiabilité de la relation (diagramme de fiabilité etc... pas exposé ici).

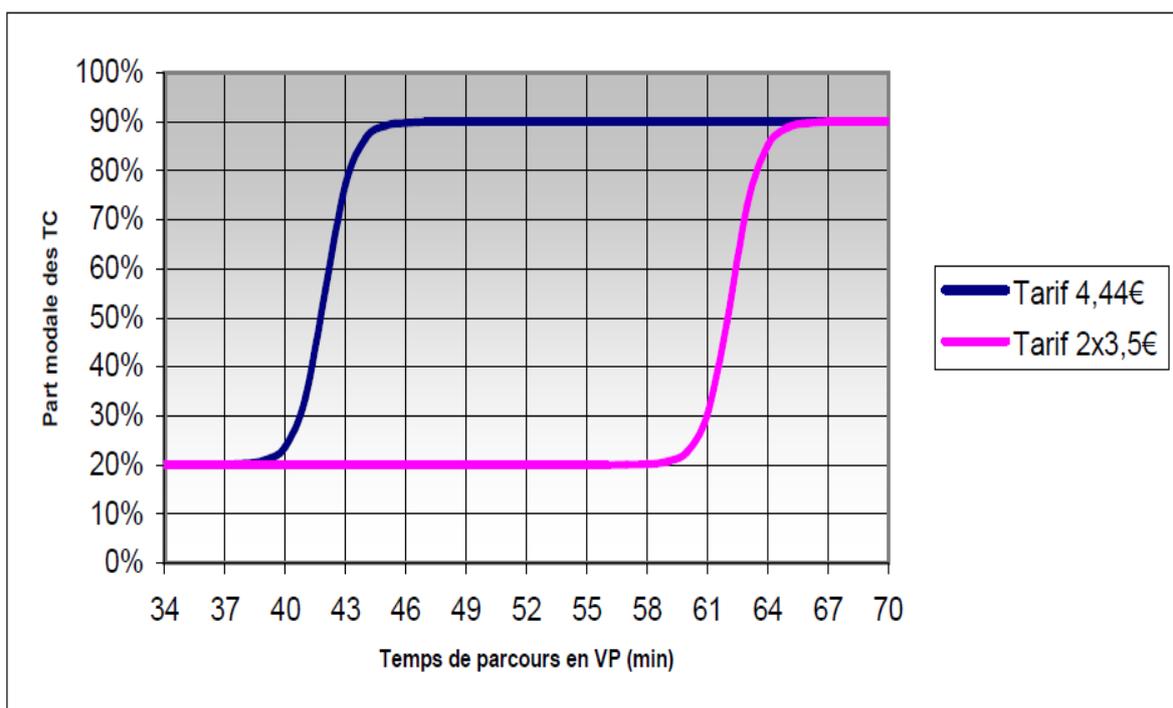
Il reste alors à évaluer les coefficients. Outre le rapport de vraisemblance le test de Wald est usité. Il s'agit de calculer le maximum de vraisemblance de la relation. Ces modèles prédisent ou d'expliquent les évènements liés aux déplacements en termes de risques probables (odds). Dans le modèle GLOBAL, la probabilité de choix modal entre le TC et la VP dépendent de la différence des coûts généralisés de la VP et du TC : (Cf Equation 108)

$$TC = 20\% + (1-(20\% +10\%)) \times 1 / (1+\exp (-\theta (CG_{vp} - CG_{TC})) \quad (108)$$

Source : Samadzad

Le coefficient (θ) précédent leur différence mesure la concentration du choix (THIERNO,2008). Plus il est élevé, plus le mode le moins coûteux reçoit des déplacements. Le nombre de passager « dépendant » des TC (usager captif) représentent 20% ceux « dépendant » de l'automobile (10%) (SAMADZAD, 2008). La courbe de probabilité montre un choix modal en faveur du TC dans une limite de 90%. L'intervalle de passage d'une part modale de 20% à 80% équivaut à un temps de parcours situé entre 40 et 43 minutes en VP. Des coûts croissant du TC (7 euros) transfèrent la courbe en temps de parcours de 40 à 58 minutes. (Cf Graphique 82)

Graphique 82 : variation des temps de parcours voiture



Source Samadzad

1-1-4) Les critiques des modèles 4 étapes pour les choix modaux

Beaucoup de critiques sont adressés aux modèles de choix modaux nous en retenons trois.

- Le modèle de choix du mode déterministe implique un comportement du consommateur n'est pas décrit en termes de processus décisionnel (JOLY, 2002). Ces modèles ne sont pas comportementaux. Les déplacements ne sont pas segmentés, l'individu n'optimise pas un déplacement mais un ensemble.

- Les modèles désagrégés impliquent que la préférence d'un décideur dépend de deux alternatives. L'introduction d'une troisième ne modifie pas son choix ce qui est irréaliste. L'emboîtement résout ce problème en dissociant le mode de la destination. Néanmoins, l'usager choisit son mode avant sa destination. Or le motif de déplacement et donc la destination précède le mode. D'autres limites sont associées à la pertinence du modèle, l'existence de données ou la stabilité du comportement de l'individu. Les modèles agrégés et désagrégés peuvent donner des résultats différents (QUINET, 1995). La nécessité d'agréger les résultats pour représenter un ensemble d'individus dans une zone est aussi une limite forte (MILLION, 2015)
- L'hypothèse de rationalité de ces modèles est remise en cause parce qu'il n'y aurait pas une rationalité mais plusieurs, qui dépendent du mode de vie des habitants (KAUFMANN, 2000) (MUNAFO, 2017). La mobilité serait devenue un objet social dans les années soixante (ROCCI, 2007), sur l'hypothèse que la minimisation des coûts généralisés est insuffisante à expliquer le choix modal, même si l'arbitrage coûts bénéfice examinés avec le modèle 4 étapes n'est pas absent du calcul. Des éléments affectifs, passionnels, renforcent le choix effectué et déforme la représentation des autres modes ce qui conduit alors à biaiser l'arbitrage qui ne dépend pas de la seule fonctionnalité du mode (ROCCI, 2007), (VINCENT, 2010), (DELAUNAY, 2019).

Néanmoins, l'évaluation des modèles 4 étapes utilisés en France, montre qu'ils ont remplis leur mission avec des erreurs acceptables d'un point de vue macroscopique (PREDIT, 2000) ou régional dans notre cas. Les modèles GLOBAL (ou MODUS) sont repris dans les études de trafics du grand Paris. Nous décrivons donc ses composantes.

1-2) Les coûts généralisés utilisés

1-2-1) Présentation des coûts.

Les coûts généralisés du modèle GLOBAL sont définis par les équations suivantes pour les trois modes MAP, VP, TC. (Cf Equation 109,110,111).

$$\text{CG mode Doux} = \lambda \times (\text{Coef}_d \times d / V_{\text{ped}}) \quad (109)$$

$$\text{CG}_{\text{VP}} = \lambda \times (\text{coef}_{\text{vp}} \times T_{\text{vp}} + T_{\text{Gsta}}) + C_k \times d + C_{\text{vp}} + C_{\text{sta}} \quad (110)$$

$$\text{CG}_{\text{tc}} = \lambda \times (T_{\text{Grab}} + \text{coef}_{\text{att}} \times T_{\text{att}} + \text{coef}_{\text{tc}} \times T_{\text{tc}} + \Sigma(\text{coef}_{\text{corr}} \times t_{\text{coor}} + \text{pen}_{\text{corr}}) + C_{\text{tc}} \quad (111)$$

Source Samadzad

Deux types de coûts apparaissent :

1. Les coûts du temps qui sont précédés de la variable λ pour les modes TC VP MAP
2. Les coûts d'usage $C_k \times d + C_{\text{sta}}$ pour la VP et C_{tc} pour le TC

1-2-2) Les coûts du temps

Le coût du temps se compose de la valeur du temps et du temps. Des coefficients, traduisant un inconfort ou des éléments du voyage (correspondances), lui sont affectés.

1-2-2-1) La valeur du temps λ des voyageurs

Les choix dépendent donc des prix des biens et des services mais aussi du temps qui apparaît alors comme un équivalent monétaire (BECKER, 1965). Pour le transport, la valeur du temps λ somme les données monétaires et temporelles. Elle dépend de facteurs socio-économiques, non du mode TC ou VP (CROZET, Y, 2005). C'est un coût d'opportunité individuel traduisant l'utilité marginale du revenu qu'un usager est prêt à consacrer pour son temps (QUINET, 1995). Sa mesure fait l'objet d'une abondante littérature (BONNEL, 2002) (CROZET, Y, 2005). Elle est issue des modèles de trafic ou de questionnaires (Préférences révélées ou déclarées). Les premières correspondent aux trafics réellement observés, mais elles aboutissent à des valeurs hétérogènes, dépendant de la construction des modèles (QUINET, 1995). L'utilisation de ces valeurs dans d'autres situations que celles qui ont calibré le modèle sont délicates. Les secondes simulent des comportements des individus dans n'importe quelle situation (indépendamment des normes de confort etc.). Toutefois, les estimations souffrent de biais liés aux questionnaires ainsi que des difficultés inhérentes à la méthode (difficulté de distinguer des classes fines d'usager) (CROZET, 2005). Cependant, les enquêtes EGT ne confirment pas les résultats de certains modèles. Ces incertitudes justifient le fait d'utiliser une valeur moyenne basée sur les salaires. Plusieurs mesures existent selon les motifs de déplacement (CROZET, 2005) (CGSP, 2013). Les valeurs du temps recommandées sont construites sur une moyenne de 59% des salaires bruts horaires, 85% pour le motif professionnel, 77% motif domicile travail et de 42% pour autres (ROQUINY, 2013) observés en France ou en IDF. Ils intègrent les cotisations sociales versées par le salarié. La valeur du temps est plus forte en IDF vis à vis de la France, les salaires étant plus élevés (Cf Tableau 159)

Tableau 159 : valeur du temps 2013

Motif du déplacement	France entière	Île-de-France
Professionnel	17,5	22,3
Domicile-travail/études/garderie	10,0	12,6
Autres (achat, soin, visites, loisir, tourisme, etc.)	6,8	8,7
Sans détail du motif	7,9	10,7

Source CGSP

Elle l'est aussi pour les motifs obligés (domicile-travail...) vis-à-vis des non-obligés (autres). Les motifs sans détail rassemblent l'ensemble des motifs de déplacement (ROQUINY, 2013). Il s'agit alors d'un déplacement moyen regroupant l'ensemble des déplacements. (Cf Equation 112)

$$\lambda = \alpha \lambda_{dt} + \alpha \lambda_p + \alpha \lambda_{autre} \quad (112)$$

Source : Roquiny

Cette valeur du temps peut alors être rapportée au temps de parcours par réseau (RER Bus Métro) (GUEGUEN-AGENAIS, 2008).

1-2-2-2) Les coefficients de pénibilité.

Les éléments d'inconfort augmentent le coût généralisé (HAYWOOD & KONING, 2012) avec des coefficients de pénibilité. Pour une minute d'attente, il faut multiplier par ce coefficient pour obtenir l'équivalent en termes d'attente réelle du voyageur au cours de son déplacement. Pour la VP (Coef_{VP}), il prend en compte les conditions de confort du véhicule. Pour le TC, il existe aussi un coefficient Coef_{att dans} pour l'attente du véhicule et deux coefficients de pénibilité (Coef_{corr} ; Pen_{corr}) pour les correspondances. Le coefficient de pénibilité Coef_{TC} prend en compte les conditions de confort de l'utilisateur. Ces temps font l'objet de plusieurs valorisations dans les pays. Les valeurs évoluent entre 1.42 et 1.75 au Royaume Uni pour le rail et entre 1.29 et 1.49 pour l'autobus (CGSP 2013). Il peut faire l'objet d'une spécification selon les caractéristiques du lieu d'attente. Les valeurs sont divergentes selon les méthodologies et les études (ROQUINY, 2013). Le coefficient de pénibilité augmente de 0,08 par voyageur, 0,09 s'il est debout. La constante est de 1 pour le voyageur assis, 1.25 debout. (Cf Tableau 160)

Tableau 160 : temps réel du voyageur dans le TC.

Situation de l'utilisateur dans le mode, tous modes confondus (tram, métro, bus, train de banlieue)	Évolution du multiplicateur K(p) du temps réel selon le nombre de passagers debout « p » par m ² dans le véhicule	
	pour des situations où des places assises en dur sont disponibles	Pour 4 > p > 0
Assis	K(p) = 1,00	Ka(p) = 1,00 + 0,08*p
Debout		Kd(p) = 1,25 + 0,09*p

Source : CGSP 2013

Ces questions sont abordées par quelques travaux sur le réseau parisien (LEURENT, 2009) (KONING, 2012). Ils tentent de chiffrer un consentement à payer ou d'évaluer le surcoût lié au confort. Le niveau d'inconfort dépendrait tout d'abord de la « densité d'occupation du sol » (DE PALMA & al, 2011) (KONING, 2012) des véhicules ce qui renvoie aux taux d'occupation et donc de remplissage. Le fait d'être serré, génère de l'inconfort et diminue le nombre de places assises en particulier du fait que certains sièges sont amovibles. Ensuite, il existe une probabilité très faible de trouver une place assise si le taux d'occupation est fort, puisqu'il existe plusieurs personnes susceptibles de prendre une place si elle se libère. Le surcoût associé à une place assise serait de 15% (LEURENT, 2009). Les utilisateurs de la ligne 1 augmenteraient leurs déplacements de 5,7 - 8,1 minutes afin de jouir du confort des heures creuses durant les heures de pointe (KONING, 2012).

1-2-2-3) Les variables de quantité de temps VP-TC

Les temps de déplacement hors stationnement (T_{VP}) sont les temps motorisés de la voiture. Elles sont déduites des modèles vitesse débits issus du SETRA ou de la DIRIF. Les temps généralisés de recherche et de stationnement (T_{G_{sta}}) correspondent aux temps de recherche et de manœuvre à l'intérieur d'une place de parking. Le temps de rabattement (T_{G_{rab}}) est un temps d'utilisation pondéré moyen (TUPM). Il représente la durée moyenne des actions entre le centroïde de la zone étudiée et le point d'accès aux TC.

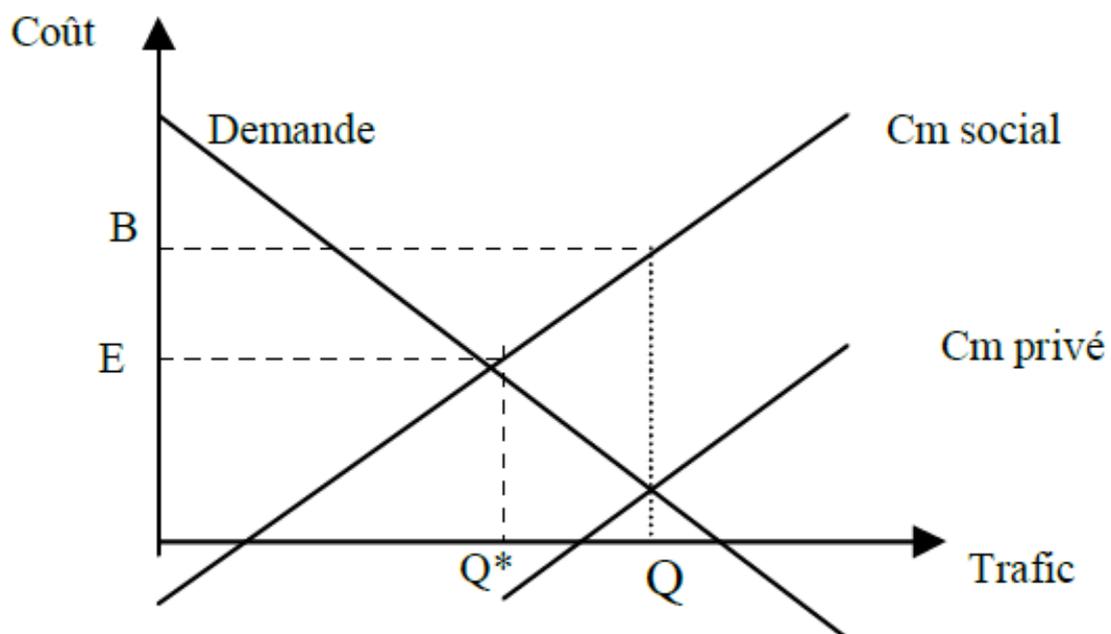
Les temps de correspondances (T_{corr}), comme les rabattements à pied, sont pris en compte avec le TUPM. Le temps d'attente (T_{att}) correspond au temps passé à attendre le véhicule, il dépend de l'intervalle. Le temps de roulement (T_{TC}) est le temps de circulation motorisé du voyage. Il est déduit des vitesses des réseaux des transporteurs. Pour le TC, le temps d'accès, vis-à-vis du temps de circulation dans le véhicule, est supérieur à la VP.

1-2-3) Les coûts d'usage TC

1-2-3-1) Cadre théorique

Le coût social des transports renvoie à la mise en œuvre d'un prix d'usage égal à l'optimum de Pareto. Les coûts sociaux se distinguent des coûts privés (GUEGUEN-AGENAIS, 2008) (Cf Graphique 83).

Graphique 83 : structure des coûts.



Source AE Gueguen

La droite de demande correspond à la disponibilité d'un usager. Le prix « Cm privé » représente ce qu'il paie, alors que le prix « Cm social » représente ce qu'il payerait en intégrant les nuisances. Cet optimum implique alors de taxer l'infrastructure par rapport au « Cm social ». Deux solutions existent

- Le versement d'une subvention supérieure à son déficit d'exploitation ce qui entraîne une iniquité entre les usagers des TC et les autres.
- Une tarification au coût moyen garantissant l'équilibre budgétaire mais nuisible à la fréquentation.

Dans les deux cas, il existe alors une distorsion par rapport à l'optimum. D'un côté, il existe une intervention où certains paient pour d'autres et, de l'autre, une baisse de fréquentation du fait que la tarification au coût marginal n'est pas respectée. Aussi, la tarification de second rang minimise les écarts par rapport à l'optimum.

Cette approche segmente la clientèle en deux catégories :

1. La clientèle réactive à l'effet prix pour éviter qu'il les dissuade d'utiliser le service.
2. Celle qui ne l'est pas et qui restera indifférente à la modification de prix.

Les théories du surplus se sont développées à partir de cette approche. Elles sont la base des théories sur la différenciation des prix qui s'éloignent de la tarification uniforme.

1-2-3-2) Les tarifications des TC.

Les tarifications en usage tiennent compte (GUEGUEN-AGENAIS, 2008) :

- De la sensibilité aux prix.
- Des revenus des personnes et de la structure de consommation ;
- De l'heure de la distance et du type de service utilisé.
- De transferts modaux vers le TC selon des nuisances écologiques de l'automobile.

Trois éléments composent cette tarification.

1. La gamme tarifaire distingue les voyageurs selon leur fréquence de mobilité et leurs caractéristiques socio démographiques.
2. Les structures tarifaires avec les modulations horaires (avantage tarifaire en heures creuses ou surcharge en heure de pointe), le service rendu (service omnibus et service express, service à la demande, service de nuit etc..), la distance avec des variantes de tarification par zones (alvéoles ou concentriques) ou par section ou un tarif unique. L'intégration tarifaire permet de passer d'un réseau à l'autre voir d'un opérateur. Elle permet les déplacements multimodaux.

En IDF, trois types de tarification existent aujourd'hui (IDF MOBILITE, 2015). La tarification "plate", le tarif du titre est forfaitaire. Jusqu'à septembre 2015, cette tarification renvoie au ticket t+, utilisable dans le métro, le train-RER dans Paris, le tramway et le bus (à l'exception de certaines lignes dites à tarification spéciale et du Noctilien) : un ticket t+ suffit pour effectuer l'intégralité du déplacement, quelle que soit la distance parcourue (avec des restrictions de correspondances entre certains modes). Avec la création des forfaits « toutes zones » en septembre 2015, la tarification plate devient également la modalité majoritaire pour les abonnements, le prix des forfaits d'une durée supérieure ou égale à une semaine ne dépend plus de la distance des déplacements de l'utilisateur.

La tarification à la distance, correspond aux situations dans lesquelles le tarif du titre augmente avec la distance parcourue. Elle concerne les services suivants :

- Le train-RER hors de Paris (billets Origine-Destination) ;
- Certaines lignes expresses de bus (dites « à tarification spéciale » pour les différencier des lignes à tarification plate) ;
- Le Noctilien ;
- Des abonnements bus en nombre de trajets limités (carte scolaire, lignes régulières).

Ces lignes sont divisées en sections dont l'amplitude varie selon les modes et les services (lignes de bus à tarification spéciale, fer, etc.), voire au sein d'une même ligne, selon l'éloignement de la section par rapport à Paris.

Cette modalité tarifaire n'est pas proportionnelle à la distance parcourue (tarification kilométrique), mais prend la forme de tarifs croissants avec le nombre de sections parcourues. Le sectionnement s'applique aux lignes, pas aux trajets individuels. Un voyageur acquittera donc 2 tickets t+ s'il franchit deux sections, même si la distance de son voyage est inférieure à l'intervalle inter-paliers.

La tarification zonale caractérise les forfaits intermodaux offrant un nombre de déplacements illimités sur la période de validité du titre dans les zones choisies. Son principe, défini en 1975 lors de la création de la Carte Orange (devenue depuis 2010 le forfait Navigo), consiste à diviser le périmètre des transports urbains en zones concentriques autour de Paris (qui constitue la zone 1), à moduler le tarif du forfait selon les zones couvertes (2 minimum), et de leur localisation vis à vis du cœur de l'agglomération. Le nombre de zones, est passé de 5 à 8 en 1991.

1-2-4) Les coûts ressentis VP

Deux types de coût existent, ressentis et non ressentis (GUEGUEN-AGENAIS, 2008). Les dépenses « non ressenties » sont l'achat, les pièces détachées, les dépenses d'entretien, les services d'assurance et personnel. Ces dépenses sont stables comme le montrent d'autres études (HIVERT & WINGERT, 2010). Les coûts ressentis se divisent en trois types : les coûts de carburant, les coûts stationnement et éventuellement les péages que nous n'exposons pas, puisqu'il n'y en a pas en IDF.

1-2-4-1) Les coûts du carburant

Ils sont calculés à partir d'un prix moyen composite (HIVERT & WINGERT, 2010) selon les volumes consommés des différents carburants à monnaie constante. Ce prix du carburant peut alors être rapporté en kilomètre et intégrer l'efficacité énergétique.

1-2-4-2) Le stationnement.

Les coûts suivent plusieurs approches. Les effets du parking peuvent être abordés selon les coûts économiques, leur tarification ou leur nuisance dans l'occupation de l'espace public (MATHON, 2008). L'approche consistant à définir un seuil de mètre carré et d'imputer un prix au sol selon les communes, à l'image de la taxe mise en place en 2016, est très compliquée. Il varie selon les types de propriété. Un locataire paie un prix supplémentaire mais peut-on dire la même chose d'un propriétaire qui voit en plus une valorisation de son bien ? Il faudrait aussi définir les coûts de possession. Enfin, ces parkings privés ne sont utilisés qu'au début et à la fin de la boucle de déplacement pour un déplacement diurne. De même, la fonction d'utilité suppose un temps généralisé de stationnement ce qui signifie que l'utilisateur prend le temps de chercher une place, or ce n'est pas le cas, s'il dispose d'une place de parking même payante. L'approche par les dépenses publiques a été mise en œuvre en IDF (GUEGUEN-AGENAIS, 2008). Trois types de déplacement sont envisagés. Le déplacement domicile travail considéré comme gratuit. Les autres motifs de déplacement sont évalués à 2 euros pour 2h00 à Paris contre 1 en petite couronne et 0 en grande en 2003.

1-2-5) parts des coûts d'usage et du temps dans les coûts généralisés.

Pour la VP, les coûts d'usage qui croissent selon les couronnes. Elle évolue de 5% à 10% vis-à-vis des coûts du temps (GUEGUEN-AGENAIS, 2008), la part des coûts du temps est donc plus forte quelque soit les couronnes. (Cf Tableau 161)

Tableau 161: VP coûts d'usage et du temps euros voy-km			
	Coût d'usage	Coût du temps	Pourcentage
Paris	0,05	1	5,00%
1ière couronne	0,04	0,65	6,15%
2ième couronne	0,04	0,4	10,00%

Source : AE Gueguen agenais calcul personnel

La variation s'inverse pour le RER. Les coûts d'usage sont 3 fois moins importants que les coûts du temps et leur part décroît en fonction des couronnes. (Cf Tableau 162)

Tableau 162: RER coûts d'usage et du temps euros voy-km			
	Coût d'usage	Coût du temps	Pourcentage
Paris	0,14	0,44	31,82%
1ière couronne	0,14	0,6	23,33%
2ième couronne	0,14	0,7	20,00%

Source : AE Gueguen agenais+ calcul personnel

Nous retrouvons ces caractéristiques pour le métro. (Cf Tableau 163)

Tableau 163 : métro coûts d'usage et du temps euros voy-km			
	Coût d'usage	Coût du temps	Pourcentage
Paris	0,12	0,56	21,43%
1ière couronne	0,12	0,7	17,14%

Source : AE Gueguen agenais+ calcul personnel

Pour l'autobus, les coûts et leur variation sont plus contrastés selon les couronnes ou l'on ne note aucune évolution notable. (Cf Tableau 164)

Tableau 164 : bus coûts d'usage et du temps euros voy-km					
	Coût d'usage	Coût du temps (fourchette)		Pourcentage	
Paris	0,23	0,85	1,55	27,06%	14,84%
1ière couronne	0,23	0,8	1,23	28,75%	18,70%
2ième couronne	0,23	0,85	1,4	27,06%	16,43%

Source : AE Gueguen agenais +calcul personnel

Pour le TC, la part des coûts d'usage dans les coûts du temps est plus forte que pour la VP. Pour les deux modes, les coûts du temps sont supérieurs au coûts d'usage quel que soit la couronne (GUEGUEN-AGENAIS, 2008). Ils sont la variable essentielle des coûts généralisés.

1-3) Conclusion :

La fonction d'utilité du modèle GLOBAL se compose des coûts du temps plus important que ceux d'usage. Néanmoins il n'est pas formalisé selon les données des secteurs EGT, ni sur l'approche quantitative. Aussi, nous reprenons sa fonction d'utilité que nous adaptons aux secteurs EGT dans un cadre quantitatif. Nous en reprenons aussi la théorie, la différence des fonctions de coût des modes modifie leurs parts modales. Aussi, dans un cadre quantitatif, la différence des fonctions de coût des secteurs EGT doivent aussi modifier leurs parts modales. Ensuite, si une telle relation existe, alors nous examinerons la relation entre densité et parts modales de notre hypothèse de recherche.

2) Parts modales et différence de coûts généralisés dans les secteurs EGT.

2-1) Méthode de transposition des coûts généralisés dans les secteurs EGT

Le lien entre forme urbaine et efficacité énergétique reste quantitative. Les résultats de Newman et Kenworthy sur la région IDF sont confirmés même s'ils sont nuancés. Nos données de mobilité dans les secteurs EGT sont moyennes : l'hypothèse de normalité des résidus peut être respectée ouvrant à cette approche. Des données de revenus, de coûts de stationnement ou de carburant peuvent les compléter. Il reste alors à calculer les coûts généralisés par secteur. Or nous avons choisi un modèle de différence de coûts généralisés spécifiques : le modèle GLOBAL. Néanmoins, d'autres modèles reprennent des variables de coûts généralisés et des fonctions d'utilité différentes (SAMADZAD, 2008). Il n'est pas sûr que les choix qui dépendent de la différence de coûts généralisés « de type GLOBAL » fonctionne sur les secteurs EGT pour une analyse quantitative. Aussi, il nous faut le vérifier. La significativité des coefficients sera testée selon les hypothèses standards.

2-2) Calcul de la valeur du temps

2-2-1) Calcul des revenus par secteur

L'INSEE distingue plusieurs types de revenus. Le revenu disponible comprend les revenus déclarés à l'administration fiscale (revenus d'activité, retraites et pensions, indemnités de chômage et certains revenus du patrimoine), les revenus financiers non déclarés et imputés (produits d'assurance-vie, livrets d'épargne exonérés), les prestations sociales perçues et la prime pour l'emploi, nets des impôts directs (impôt sur le revenu, taxe d'habitation, contribution sociale généralisée (CSG), contribution à la réduction de la dette sociale (CRDS), et prélèvements sociaux sur les revenus du patrimoine). Cette mesure correspond au concept microéconomique (INSEE, 2017).

Le revenu disponible brut ajusté est le revenu disponible accru des transferts sociaux en nature (remboursement de frais de santé par la Sécurité sociale, allocations logement, dépenses publiques d'enseignement...), contrepartie des consommations individualisables incluses dans les dépenses des administrations publiques et des institutions sans but lucratif au service des ménages. Le revenu disponible net correspond au revenu disponible des ménages diminué de la dépréciation du capital. Il est économiquement plus pertinent pour analyser leur patrimoine et le calcul des ratios patrimoine/revenu, car il retrace le revenu effectivement utilisable soit pour la consommation, soit pour l'accroissement du patrimoine (*via* l'épargne nette). Le revenu individuel comprend les traitements et salaires, les indemnités chômage, les retraites, les pensions alimentaires reçues et les revenus d'indépendants. Il est net de CSG et CRDS. Les revenus du patrimoine correspondent aux revenus fonciers et revenus de valeurs et de capitaux mobiliers, hors plus-values. Ils ne sont que partiellement couverts dans la déclaration fiscale. Plusieurs sont exonérés d'impôts (épargne réglementée notamment). Des revenus imputés (produits d'assurance-vie, livrets d'épargne exonérés) les complètent. Ensuite une unité de consommation peut être appliquée au ménage.

De manière générale, un ménage, au sens statistique du terme, désigne l'ensemble des occupants d'un même logement sans que ces personnes ne soient nécessairement unies par des liens de parenté (en cas de cohabitation, par exemple). Il peut se composer d'une seule personne. L'unité de consommation reflète les économies d'échelle issues de la mise en commun de certains biens. Les dépenses d'un ménage de plusieurs personnes ne sont pas proportionnelles à leur nombre. Aussi, pour comparer les niveaux de vie de personnes vivant dans des ménages de taille ou de composition différente, on utilise une mesure du revenu par unité de consommation, à l'aide d'une échelle d'équivalence. L'échelle la plus utilisée actuellement (« l'OCDE modifiée ») décompte 1 unité de consommation (UC) pour le premier adulte du ménage, puis 0,5 UC pour les autres personnes de 14 ans ou plus, et 0,3 UC pour les enfants de moins de 14 ans. L'INSEE collecte, par l'enquête ERFS (Enquête sur les Revenus Fiscaux et sociaux), les données d'évaluation des revenus des ménages.

L'administration fiscale lui permet d'obtenir les revenus fiscaux des foyers fiscaux (INSEE, 2017) qui désignent les personnes inscrites sur une même déclaration de revenus. Il peut y avoir plusieurs foyers fiscaux dans un seul ménage : un couple non marié où chacun remplit sa déclaration de revenus représente deux foyers fiscaux. Les revenus déclarés à l'administration fiscale sont le revenu fiscal de référence. Ils intègrent les revenus patrimoniaux, d'activité indépendante ou salariée, les retraites et pensions, les indemnités chômage. Il y a trois notions différentes les revenus de référence, le salaire et les retraites et pension utilisée par l'administration fiscale. Un revenu fiscal a des origines différentes, (salaire patrimoine (loyer, dividendes)). Les exonérations diverses ne permettent pas une vue exhaustive de ces revenus (épargne réglementée notamment). Les traitements et salaires ont pour origine un emploi. Il peut s'agir d'honoraires (profession libérale). (Cf Tableau 165).

Tableau 165 : revenus fiscaux commune de Paris 1^{ère} arrondissement 2008.

Revenu fiscal de référence par tranche (en euros)	Nbre de foyers fiscaux	Revenu fiscal de référence des foyers fiscaux	Traitements et salaires		Retraites et pensions	
			Nbre de foyers concernés	Montant	Nbre de foyers concernés	Montant
0 à 9 400	329 676	1 282 703 406	171 205	999 355 974	72 017	529 514 900
9 401 à 11 250	65 049	673 283 601	46 743	514 262 242	18 407	225 768 240
11 251 à 13 150	63 328	775 623 001	51 197	675 728 036	12 534	164 877 350
13 151 à 15 000	71 606	1 008 235 237	54 245	828 493 882	18 188	272 873 011
15 001 à 16 900	71 185	1 135 107 275	55 088	949 472 969	17 148	284 669 889
16 901 à 18 750	66 845	1 190 555 558	52 423	1 006 967 777	15 582	283 217 334
18 751 à 23 750	152 948	3 234 924 524	126 697	2 884 740 338	29 192	581 204 250
23 751 à 28 750	123 963	3 241 292 202	99 311	2 762 154 540	28 011	664 817 203
28 751 à 38 750	159 087	5 286 746 777	126 005	4 370 571 894	38 196	1 085 134 874
38 751 à 48 750	89 215	3 864 148 032	68 856	3 017 916 914	24 199	834 561 752
48 751 à 97 500	160 032	10 695 280 914	120 549	7 653 768 143	48 412	2 254 952 881
+ de 97 500	79 549	21 635 934 479	62 135	9 816 380 384	20 527	1 292 238 204
Total	1 432 483	54 023 835 006	1 034 454	35 479 813 093	342 413	8 473 829 888

Source : administration fiscale

Le salaire imposable comprend le salaire de base et les revenus dits accessoires du salaire (avantages en nature, indemnités pour frais professionnels, épargne salariale, etc). Le salarié perçoit un salaire net qui sert de base au calcul de son imposition. Il s'agit du salaire brut déduit des cotisations salariales. La CSG est partiellement déduite, impliquant que le salaire perçu n'est pas le salaire déclaré. Les prestations sociales sont collectées auprès des organismes sociaux sont versées par la branche famille et l'assurance vieillesse (minimum vieillesse retraites pensions). Certains foyers sont imposables d'autres non. Certains perçoivent une pension en continuant de travailler d'autres n'ont que des revenus du patrimoine. Il n'y a donc pas additivité des foyers fiscaux entre la première colonne (ensemble des foyers fiscaux et les deux autres (salaires et pensions). En IDF, les données fiscales regroupent par commune les revenus fiscaux des foyers fiscaux (IMPÔT, 2010). Nous disposons donc de deux informations par communes :

1. Le salaire net total des foyers fiscaux.
2. Les revenus fiscaux totaux (salaire net + pension)

Nous intégrons dans les secteurs EGT

- Les sommes des salaires et traitement des communes du secteur
- La somme des pensions des communes du secteur

Nous disposons alors de deux types de revenus.

- Les revenus par actif = Σ traitement et salaires du secteur / Σ actifs. Le revenu par actif est alors le salaire net moyen par actif du secteur.
- Les revenus pour la population = Σ traitement et salaires + Σ retraites et pension par secteur / Σ habitant.

Il y a une stricte proportionnalité entre les salaires nets et bruts permettant de les évaluer par commune en IDF. La moyenne des cotisations salariales est en effet de 23%. Néanmoins, cette approche situe sur le même plan les honoraires et les salaires alors qu'ils n'ont pas les mêmes cotisations sociales puisque les deuxièmes paient à la fois les cotisations patronales et salariés. Dans son déplacement nous situons la profession libérale comme un salarié. Le salaire brut par actif est donc (Cf Equation 113).

$$\text{Salaire brut par actif} = \text{revenu par actif net du secteur} \times 1.23. (113)$$

Source : auteur

2-2-2) Calcul de la valeur du temps par secteur.

La valeur du temps que nous calculons reprend la méthode des autorités (ROQUINY, 2013) à partir des revenus (cf revue de littérature + ci-dessus). Pour l'ensemble des déplacements de la population, nous affectons 60% des salaires bruts horaire des actifs. Le temps de travail (T) moyen des salariés est de 1607 heures soit (Cf Equation 114) :

$$\lambda_s = 0.60 \times \text{revenus par actifs} / 1607 (114)$$

Source : calcul de l'auteur

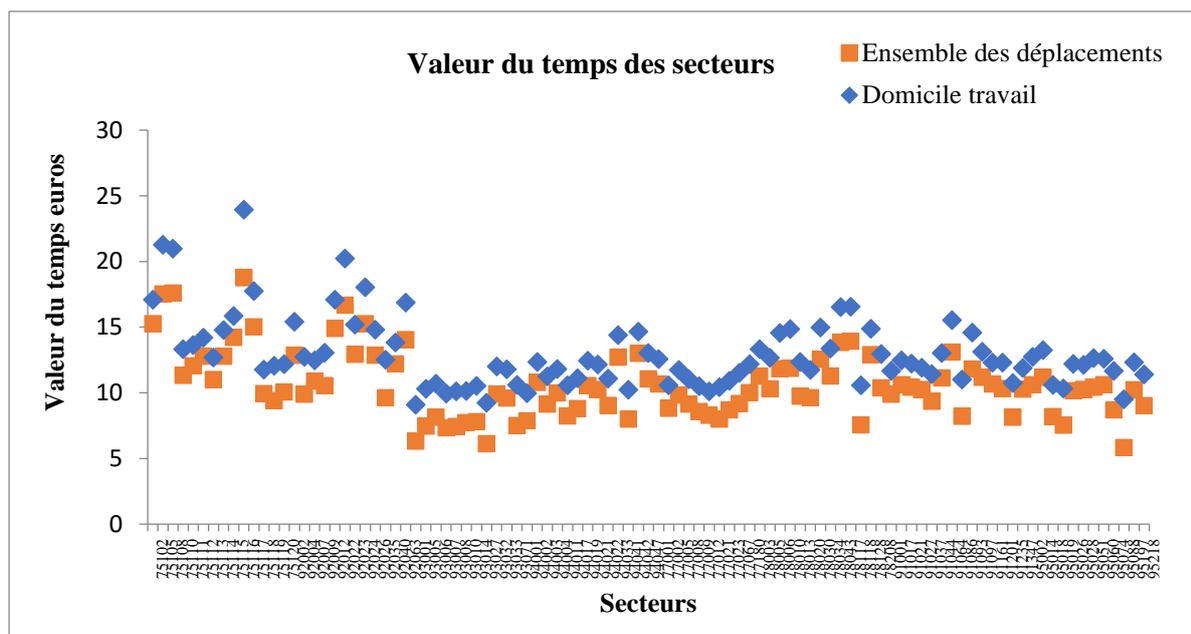
Néanmoins, la population se compose de retraités et d'actifs nous y ajoutons les retraites et pensions. Mais ils ne travaillent pas, donc la population ne travaille pas 1607 heures.

Avec 1300 heures, nous retrouvons 10 euros en moyenne, valeur proche de celle des autorités (ROQUINY, 2013). Le coefficient de 1300 heures module la part de retraités dans la population totale puisque les actifs travaillent 1607 heures. Elle ne le fait pas par secteur, mais nous conservons les variations, selon une valeur moyenne issu de travaux antérieurs ce qui nous cale, avec une information originale puisque la valeur du temps dépend des secteurs. Pour l'ensemble des déplacements elle est donc (Cf Equation 115) + (Cf Graphique 84)

$$0.60 \times (\text{revenu population}) / (1300 \times \text{Population}) = V_t (\text{hab}) \quad (115)$$

Source : calcul de l'auteur

Graphique 84: valeur du temps ensemble des déplacements et domicile travail



Source : calcul de l'auteur

Pour la valeur du temps du trajet domicile travail ($0.77 \times$ revenu des actifs), la moyenne de 16.86 € est supérieure à celle des autorités 12.60 €. L'évaluation en net la retrouve. La valeur du temps DT varie de manière similaire à celle de l'ensemble des déplacements (ED) selon les secteurs. Les valeurs sont plus élevées à Paris ou dans le 92. Avec leur cumul, la frontière est-ouest (MOTTE, 2006) se retrouve selon les revenus (Cf Tableau 166).

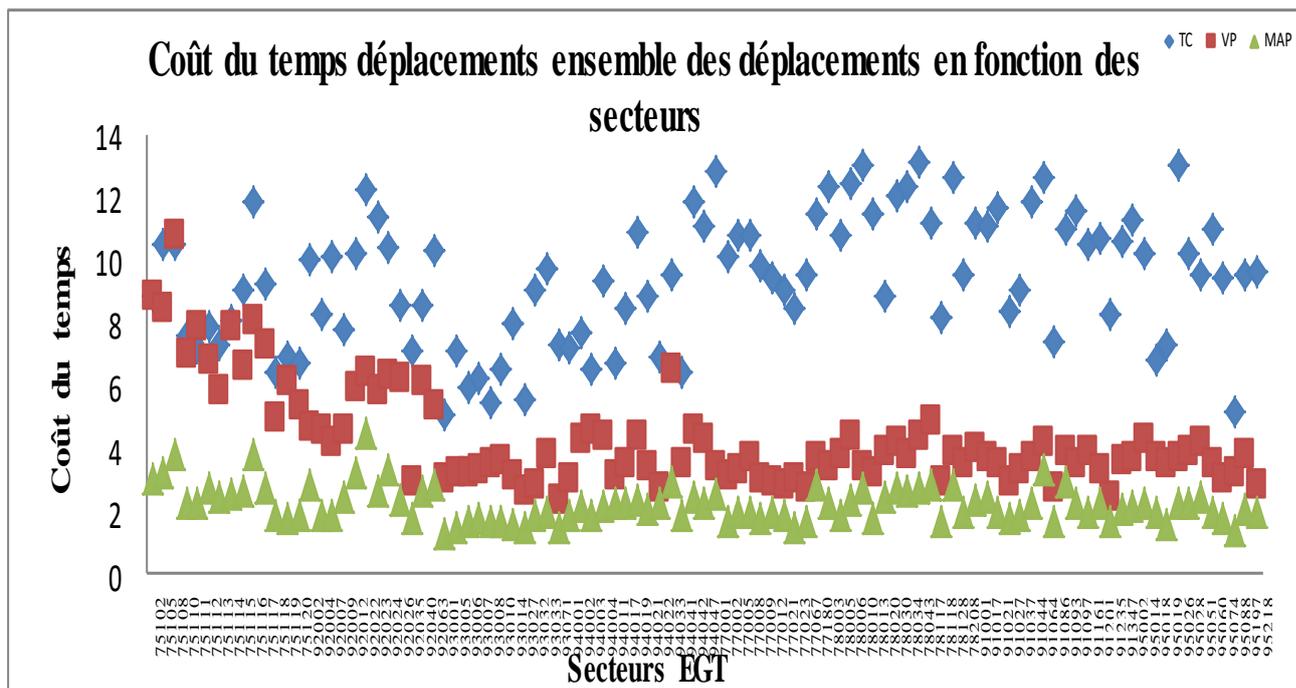
Tableau 166 : valeur du temps		
Couronne	Actif	Population
Paris + 92	16,99	14,66
1 ^{iere} couronne 93 94	14,96	12,57
2 ^{ieme} couronne	11,99	9,85

Source : calcul de l'auteur

2-3) Calcul des coûts du temps par secteur.

Nous disposons des temps de parcours donnés de porte à porte par secteur EGT. Ces temps sont les variables de quantité des coûts du temps des modes VP TC et MAP. Nous faisons l'hypothèse qu'elles regroupent l'ensemble des temps réticulaires y compris ceux issus de la pénibilité et des temps aréolaires pour aller vers le lieu de destination finale (Cf Graphique 85)

Graphique 85 : coût du temps VP et TC euros



Source : calcul de l'auteur

Dans Paris, les coûts du TC sont très proches de ceux de la VP. Pour les autres secteurs, les coûts du temps du TC dépassent fortement ceux de la VP. Pour la MAP, les coûts du temps restent relativement stables et toujours inférieurs à ceux des déplacements motorisés.

2-4) Les coûts d'usage VP

2-4-1) Les coûts d'usage du carburant en IDF.

Nous reprenons les données historisées de prix du carburant (NOE 2010) (Cf Tableau 167).

Années	1975	1982	1990	2001	2008
Essence	1,377	1,305	1,127	1,09	1,37
Diesel		0,98	0,79	0,79	1,28

Source Noe + les chiffres de 2008 sont issus de l'INSEE

Nous estimons un prix synthétique du carburant en IDF selon les parcs essence et diesel selon deux modalités le prix unitaire (P_u) et le prix individuel du carburant (P_i) que l'utilisateur paie en tenant compte de la consommation spécifique moyenne (C_{su}). ($P_i = C_{su} \times P_u$) (cf équation 116)

$$P_{\text{moyen}} = \text{Prix essence} \times \text{Part du parc essence} + \text{prix gasoil} \times \text{part du parc diesel} \quad (116)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous convertissons en Mégajoule (Cf Tableau 168). Les deux prix (P_u) et (P_i) baissent pendant la période 1975-2001. Ensuite, les prix individuels (P_i) baissent avec la hausse de l'efficacité énergétique alors que les prix unitaires (P_u) montent. Pour 2008 le prix d'usage est de 0.047€/MJ soit un prix individuel du carburant de 0.089 €/MJ. Nous retrouvons des résultats connus : une baisse des coûts de carburant au kilomètre pendant la période étudiée.

Années	1975	1982	1990	2001	2008
Essence	1,377	1,305	1,127	1,09	1,37
Diesel		0,98	0,79	0,79	1,28
Part essence/ gasoil IDF	1,38	1,29	1,09	1,02	1,33
1litre en Mégajoule primaire	0,034	0,035	0,034	0,035	0,035
Prix du litre €/MJ (P _u)	0,047	0,045	0,038	0,036	0,047
Consommation spécifique	3,74	3,28	2,86	2,67	2,51
Prix individuels (P _i) au €/MJ Km	0,129	0,114	0,098	0,093	0,089

Source : calcul de l'auteur

2-4-2) Les coûts des stationnements.

Les approches envisagées antérieurement ne conviennent pas à nos périmètres. Nous estimons le prix des parkings par secteur dans les villes. Le stationnement payant varie selon le stationnement résidentiel ou visiteur. Le prix forfaitaire sur la journée était de 0.65 € en 2008 pour Paris alors qu'il varie pour les visiteurs selon les arrondissements pour une durée de deux heures (3,4 à 1,20 euros). En consultant les règlements des stationnements des villes pour la petite couronne et certaines villes de la grande, nous constatons une grande variation dans les méthodes et les tarifs mais aussi quelques permanences. Pour les visiteurs, quelques zones sont systématiquement payantes : le centre-ville et les alentours. Sauf exception (PUTEAUX), l'ensemble de la ville n'est pas touché (Cf Tableau 169) (CHAMBRE REGIONALE DES COMPTES, 2016).

Tableau 169 : stationnement résidentiel payant dans 5 villes du 92.

	PUTEAUX	SAINT CLOUD	RUEIL	NANTERRE	SURESNES
% voirie payante	100%	70%	30% +	27%	9,4%
Période payante	9h-12h et 14h-18h	9h-19h (gratuité le WE sauf les rues Fouilleuse et Louis Loucheur)	9h-12h30 et 14h-19h	9h-12h et 14h-18h	9h-12h30 et 14h-19h
Durée maximum autorisée	7 h	Zone rotative : 2h	Zone Rouge : 45 mn	Zone Rouge : 1h30	Zones Orange / Rouge : 2h
		Zone résident : 3h	Zone Orange : 2h30	Zone Jaune : 3h00	autres durées mais sur des secteurs très limités
			Zone Verte : 8h30	Zone Verte : 7h00	
tarif 1 h	1,00 €	1,40 €	1,40 € / 1,80 €	1,20 € / 1,30 €	1,00 €
gratuité		15 premières minutes		15 premières minutes	
stationnement résidentiel	partout sauf axes rouges	en zone résident	non	en zone verte	non
	0,10 €/jour 0,60 €/sem	0,50 €/jour 3 €/sem 132€/an		2 € / semaine	

Source : chambre régionale des comptes.

Leurs prix varient des codes de couleurs variables (Rouge Verte bleue etc...). La zone rouge (orange, jaune) est la zone où la rotation des véhicules est fortement encouragée, la zone verte privilégie de stationnement de moyenne durée. La zone bleue (résident) autorise le stationnement gratuit pour tous les usagers en limitant la durée pour les non-résidents. Cela contraint le stationnement de rabattement et celui de longue durée (voiture ventouse). Le prix du stationnement résidentiel s'y applique. Il permet de se garer dans les zones vertes à des prix moins importants que les tarifs visiteurs. Pour les zones rouges, il peut ou non exister des réductions.

Les coûts de stationnement varient fortement selon les villes. A partir des documents existants (Conseil municipal, données d'usager, d'association), présents sur Internet nous effectuons les recherches sur toutes les villes de la petite couronne.

Nous évaluons quelques villes de la deuxième couronne avec pour référence le seuil de densité minimum où il existe des tarifs résidentiels payant de la première couronne soit 3173hab/km². Le stationnement résidentiel reste majoritaire (MATHON, 2008) nous conduisant à prendre cette base pour référence même s'il est moins cher. S'il existe quelques villes payantes (Evry Melun) d'autres ne le sont pas. Le stationnement payant ne dépend pas de la densité, des villes très denses sont gratuites. Nous calculons les coûts du stationnement par secteur à partir de nos données par commune. Nous effectuons l'opération suivante dans le programme VBA (Cf Equation 117):

$$\text{Coût du stationnement du secteur EGT} = \Sigma \text{ Coûts du stationnement des villes du secteur } \times \text{ nombre de déplacements voiture} / \Sigma \text{ des déplacements. (117)}$$

Source : calcul de l'auteur

Pour un déplacement nous obtenons alors le coût d'usage visiteur ou résident.

2-4-3) Variation des coûts de stationnement vis à vis des coûts de carburant.

Nous évaluons la variation des coûts de déplacement vis-à-vis des coûts de carburant. La population se déplaçant en VP (Cf Equation 118).

$$P_v = P \times T_m \text{ (118)}$$

Source : calcul de l'auteur

P_v = population se déplaçant en voiture. P = population T_m = ménage possédant au moins une voiture. Nous calculons alors le nombre de déplacements en VP à partir de la part modale (Cf Equation 119)

$$D = P \times P_m \times M \text{ (119)}$$

Source : calcul de l'auteur

D = déplacement en voiture. P_m = part modale P = population M = mobilité.

Le covoiturage est peu développé, seuls les détenteurs de voiture effectuent une mobilité en VP. Leur part modale propre est plus importante que celle de la population. (Cf Equation 120)

$$P_{mpv} = D / P_v \text{ (120)}$$

Source : calcul de l'auteur

Nous calculons la mobilité en VP de cette population. (Cf Equation 121)

$$N = M \times P_{mpv} \text{ (121)}$$

Source : calcul de l'auteur

Une personne fait N déplacements en VP. Pour une mobilité résidentielle interne à la commune, cette personne ne paie pas sa place initiale, payée antérieurement, elle garera donc au maximum son véhicule $N-1$ fois dans sa mobilité totale. Nous avons donc N déplacements pour $N-1$ stationnements. Son prix est alors : (Cf Equation 122)

$$P_s = N-1 \times K \text{ (122)}$$

Source : calcul de l'auteur

K = prix du stationnement. Le prix de ses N voyages en carburant est alors (Cf Equation 123)

$$P_d = N \times P_i. \quad (123)$$

Source : calcul de l'auteur

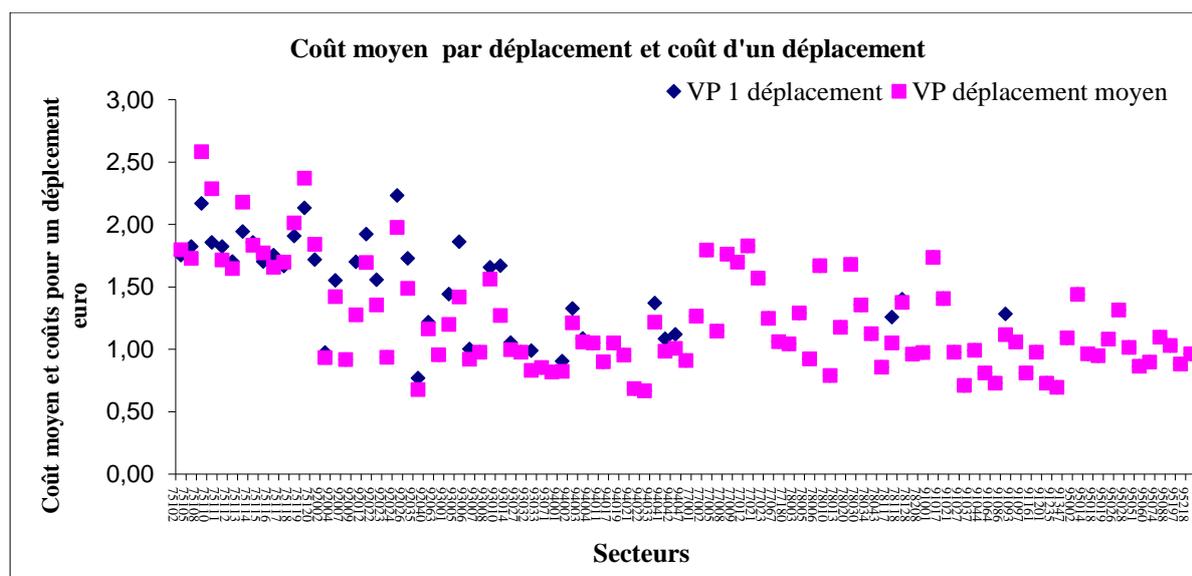
Nous effectuons le ratio en le prix du stationnement (P_s) et du carburant (P_d) (Cf Equation 124) :

$$P_s/P_d = N-1 \times K / N \times C \times C_{svp} \quad (124)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous calculons un coût moyen en sommant les deux coûts. Les deux composantes ne varient pas de la même manière. Nous obtenons alors des points de coût moyen par déplacement moyen (rose) et pour un déplacement (bleu). Si le nombre de déplacement dépasse 1, seuls les coûts du carburant augmentent les prix par déplacement en VP aussi les coûts moyens baissent par rapport à un déplacement avec un stationnement. Pour une boucle de déplacement résidentiel, les coûts de stationnement ne représentent que 16% des coûts d'usage pour une boucle de mobilité interne à une commune. La répétition des déplacements implique que la tarification forfaitaire du stationnement devient plus avantageuse. Néanmoins, si nous supposons que nous sommes sur des déplacements en dehors de la commune alors normalement ces coûts d'usage augmentent. Ce n'est pas forcément le cas. En effet, des parkings gratuits sont mis à disposition des salariés pour le motif domicile travail. De même, l'utilisation de parking temporaire (supermarché) est envisageable pour les autres motifs (achats) (Graphique 86).

Graphique 86: coût d'usage des voitures



Source : calcul de l'auteur

Aussi la croissance des coûts de parking n'est pas systématique même si le centre de Paris fait exception. Le principal facteur des coûts d'usage en IDF reste les coûts du carburant en 2008.

2-5) Calcul des coûts d'usage du TC par secteur.

2-5-1) Coût au billet et à l'abonnement par département.

Les recettes des transporteurs reflètent les coûts d'usage des usagers (GUEGUEN-AGENAIS, 2008). Plusieurs billets apparaissent avec des coûts divers. Les autorisations de montée à bord sont des billets au voyage.

Le ticket + à l'unité est plus cher qu'en carnet du fait que les tickets à l'unité reflètent le coût d'exploitation réel du voyage (Cf Tableau 170)

Billets	Recette €	Nombres	Par voyage
Ticket + en carnet	372202	323740	1,15
Ticket+ vendu à l'unité	107547	63735	1,69
Billet banlieue	287792	107547	2,68
Billet banlieue en carnet	107036	139894	0,77
Accès à bord	45185	31576	1,43
Prix moyen par voyage	919762	666492	1,38

Source : OMNIL

Les billets de banlieue intègrent la distance, ce qui augmente le coût, nous observons une forte chute pour les billets de banlieue en carnet, les tarifs de banlieue sont décroissants par rapport au ticket +. Le prix moyen issu des billets est de 1,38 euro par voyage. La part des recettes des billets dans l'ensemble des recettes est de 28%.

2-5-2) Coût d'usage TC.

Nous cherchons un prix moyen par département que nous affecterons aux secteurs EGT. Or il existe plusieurs types d'abonnement selon des périodes et des mois y compris les titres touristiques (Paris visite etc...). Seuls les titres résidentiels nous intéressent, le Navigo annuel, le Navigo mensuel, le Navigo hebdomadaire, et imagine R (moins de 26 ans). (cf Tableau 171).

Tableau 171 prix des abonnements

	Navigo annuel	Navigo mois	Navigo semaine	Imagine'R
1-2	617,1	60,4	18,4	290,7
1-3	796,4	78,2	23,9	406,2
1-4	972,4	95,5	29,1	522,0
1-5	1 112,5	109,9	33,4	638,1
1-6	1 251,1	123,6	37,6	715,5
2-3	585,0	57,3	17,5	290,7
2-4	739,2	72,5	22,1	386,4
2-5	878,9	86,3	26,3	503,4
2-6	993,3	97,7	29,8	561,0
3-4	572,0	55,9	17,0	290,7
3-5	704,0	69,0	21,0	367,5
3-6	810,7	79,6	24,3	463,8
4-5	569,8	55,7	17,0	290,7
4-6	636,9	62,4	19,0	347,7
5-6	561,0	54,9	16,7	290,7
Prix moyen en euros (pondéré par les ventes)	778,0	70,6	22,5	347,6

Source : OMNIL

Le prix moyen reliant le centre à la périphérie est 796 € et de 739 € pour une zone 2-4. Le prix de la zone décroît du centre vers la périphérie. Le prix moyen pondéré par euro montre qu'en moyenne les trois zones sont privilégiées.

En effet $617.1 \text{ €} < 778 \text{ €} < 796 \text{ €}$. 796€ est le prix de la carte 1-3 en Navigo annuel et 617.1 la moyenne des prix des Navigo 1- 2. Nous retrouvons ces résultats sur les autres abonnements. Les portées confirment ce diagnostic. Le rayon moyen de la circonférence parisienne est de 5.25 Km. Les portées de 5 Km ne permettent pas de sortir de la ville pour un habitant du centre mais un habitant situé dans le 20^{ième} va en troisième zone. C'est, selon cet abonnement (3 zones), que nous raisonnons sur un individu moyen même s'il en existe d'autres. La moyenne globale de 3 zones laisse pour chaque département (hors 75) 3 zones d'accès (Cf Tableau 172)

Tableau 172 : Navigo Annuel Mensuel									
Département	Zone d'accès			Prix des zones				Prix mois	Prix jour
				1 ^{ière}	2 ^{ième}	3 ^{ième}	Prix moyen annuel		
Paris	1-3			796			796	66	2,18
92	1-3	2-4	3-5	796	739	704	746	62	2,04
93	1-3	2-4	3-5	796	739	704	746	62	2,04
94	1-3	2-4	3-5	796	739	704	746	62	2,04
77	2-4	3-5	4-6	739	704	636	693	58	1,90
78	2-4	3-5	4-6	739	704	636	693	58	1,90
91	2-4	3-5	4-6	739	704	636	693	58	1,90
95	2-4	3-5	4-6	739	704	636	693	58	1,90

Source : calcul de l'auteur

Les prix de la zone du centre vers la périphérie pour un voyageur moyen décroissent. En divisant par douze nous obtenons un prix au mois. Pour obtenir un prix du jour nous divisons par 365/12 soit 30,42 jours donné en dernière colonne. Nous obtenons un prix moyen de l'abonnement sur l'ensemble des départements (2,18 pour le Navigo annuel). Sur tous les départements nous obtenons un prix moyen de 2,10. Nous contrôlons notre valeur en multipliant les recettes de chaque abonnement par la part de trafic. Le prix moyen est de 2,11 (Cf Tableau 173)

Tableau 173 : prix quotidien						
	Navigo/Annuel	Navigo/Mois	Navigo/hebdo	Imagine R	Total	Prix jour
Prix	778	778	990	347	2893	2,11
Trafic	9936	11455	6406	9223	37020	
Part de trafic	0,27	0,31	0,17	0,25	1	
Prix moyen	209	241	171	86	707	

Source : calcul de l'auteur à partir des statistiques RATP

Nous pouvons alors calculer le prix moyen individuel quotidien. Pour le Navigo annuel le prix du jour est de 2,18 (tableau 172 ci-dessus) et la part de trafic 27% (tableau 173) nous obtenons alors 0,59 ($2,18 \times 0,27$). Ce prix représente le coût moyen par jour du Navigo annuel dans l'ensemble des abonnements. Nous réitérons l'opération pour les autres abonnements. Ensuite nous les sommons Pour Paris :

0,59 (Navigo annuel) + 0,28 (imagine R) + 0,59 (Navigo semaine) + 0,80 (Navigo mois). (125)

Nous obtenons 2,25 nous réitérons l'opération pour les autres départements (Cf Tableau 174)

Tableau 174: prix moyen du TC		
Zones	Somme des prix moyen abonnement	Prix moyen du TC ticket à l'unité compris
Paris	2,25	2,01
92	2,16	1,94
93	2,16	1,94
94	2,16	1,94
77	2,01	1,83
78	2,01	1,83
91	2,01	1,83
95	2,01	1,83

Source : calcul de l'auteur

Néanmoins, les tickets représentent 28% de recettes. Les prix moyens de l'utilisateur sont : (Cf équation 126)

$$\text{Prix moyen} = \text{Prix de l'abonnement moyen} \times 0,72 + 0,28 \times \text{prix du ticket. (126)}$$

Source : calcul de l'auteur

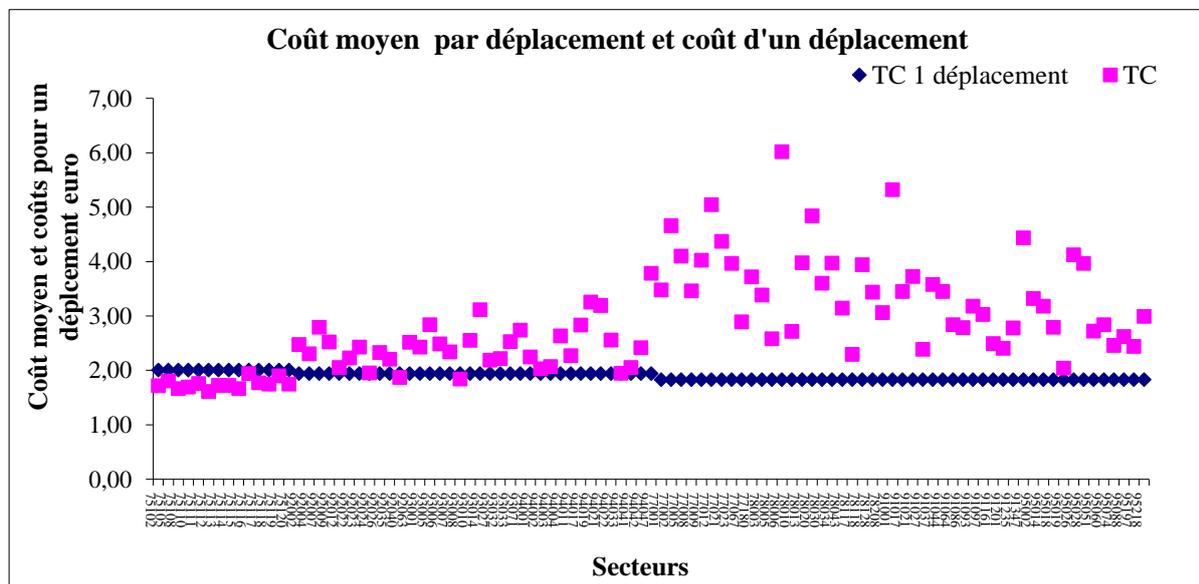
Nous assimilons un voyage à un déplacement. Pour estimer le nombre de déplacement du TC, nous considérons l'ensemble des parts modales. Nous (Cf Equation 127) :

$$\text{Prix moyen d'un déplacement} = 0,72 \times \text{Prix de l'abonnement moyen} / (\text{part modale Tc} \times \text{mobilité du secteur}) + 0,28 \times \text{prix du ticket} \times (\text{part modale Tc} \times \text{mobilité du secteur}) \quad (127)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous obtenons un résultat différent de la VP (Cf Graphique 87). Dans certains secteurs, le prix moyen des déplacements est inférieur au prix d'un déplacement. La prééminence de l'abonnement dans le prix moyen de déplacement l'explique. Plus les déplacements augmentent plus le prix moyen baisse.

Graphique 87: coût d'usage TC



Source : calcul de l'auteur

Ce n'est pas le cas dans d'autres secteurs, la baisse de l'usage implique une augmentation des prix moyens du TC à cause de l'abonnement. Ensuite, pour les voyageurs qui prendraient des tickets nous observerions une croissance des prix par déplacement similaire à celle des voitures. Les dynamiques de prix sont différentes selon les modes avec l'abonnement, d'autant que l'employeur les modifie avec son remboursement de 50% pour ses salariés. Nos calculs n'intègrent cet effet.

2-6) Les hypothèses vérifiées dans les secteurs.

Les coûts généralisés sont la somme des coûts du temps et d'usage. Nous calculons leur différence et les mettons en relation avec les parts modales.

2-6-1) Part des coûts d'usage dans les coûts du temps.

Pour la VP, les coûts généralisés dans Paris et le 92 sont plus forts que dans les autres départements. Les coûts temps et d'usages augmentent. La hausse de la valeur du temps et la baisse des vitesses augmentent les coûts du temps. Les coûts d'usage restent faibles (Cf Tableau 175).

Département	Coûts d'usage	Coûts du temps	Coûts d'usage/ coût du temps	Coûts généralisés
75	1,76	7,30	0,25	9,06
92	1,04	4,35	0,25	5,38
93	0,94	3,16	0,30	4,10
94	0,83	4,02	0,21	4,86
77	1,23	3,16	0,39	4,39
78	1,00	3,80	0,27	4,80
91	0,84	3,48	0,24	4,32
95	0,89	3,62	0,25	4,51
RIF	1,08	4,30	0,26	5,38

Source : auteur

Pour le TC, les coûts généralisés sont à ceux de la VP dans les départements (Cf Tableau 176), alors que ce mode capte 50% des parts modales pour le déplacement domicile travail. Néanmoins, ces coûts sont calculés pour l'ensemble des déplacements. Il est fort probable que, pour ce motif, les temps de déplacement soient plus importants pour la VP vis-à-vis du TC.

Département	Coûts d'usage	Coûts du temps	Coûts d'usage/ coût du temps	Coûts généralisés
75	1,75	8,46	0,21	10,21
92	2,31	9,59	0,25	11,90
93	2,48	6,91	0,37	9,40
94	2,56	8,60	0,30	11,17
77	3,97	10,24	0,40	14,22
78	3,62	11,41	0,33	15,03
91	3,28	10,44	0,32	13,71
95	2,93	9,28	0,33	12,20
RIF	2,84	9,41	0,31	12,25

Source : auteur

Les deux composantes, sauf à Paris pour les coûts d'usage, dépassent ceux de la VP. La plus forte utilisation baisse les coûts d'usage de l'abonnement TC. Pour les deux modes :

1. Les coûts du temps sont prééminents dans les coûts généralisés.
2. La différence de coûts généralisés est plus faible à Paris et en petite couronne

Nos coûts généralisés sont supérieurs à ceux calculés au voyageur kilomètre (GUEGUEN-AGENAIS, 2008). Ceci s'explique en partie du fait que nous travaillons sur les déplacements, non les voyages ou encore la charge moyenne. Ensuite, la prééminence des coûts du temps dans les coûts généralisés se vérifie mais de manière moins forte.

Les proportions de coûts d'usage dans les coûts du temps de 27.67% à 33% sont supérieurs aux calculs antérieurs (5 à 10%). La différence de méthode l'explique peut-être (Cf Tableau 177)

Couronne /Mode	VP	TC
Paris	27,67%	21,36%
PC	27,09%	30,45%
GC	33,08%	33,68%

Source : calcul de l'auteur

2-6-2) Couples et parts modales.

La différence de coûts généralisés détermine le choix modal dans le modèle GLOBAL. Aussi, les régressions doivent être significatives. Chaque arbitrage implique une différence entre les deux modes concernées. Ainsi, le couple TC-VP (C_{TC-VP}) renvoie à la différence entre le coût généralisé du TC et de la VP. Le couple C_{MAP-TC} renvoie à la différence de coût généralisé entre la MAP et le TC. Deux couples (TC-VP et MAP TC) expliquent normalement les parts modale TC. De même, les parts modales de la VP doivent être expliquées par les couples MAP-VP et TC-VP et pour la MAP les couples MAP-TC et MAP-VP. (Cf Equation 128,129,130).

$$Pm_{tc} = \alpha C_{TC-VP} + \beta C_{MAP-TC} \quad (128)$$

$$Pm_{vp} = \alpha' C_{TC-VP} + \beta' C_{MAP-VP} \quad (129)$$

$$Pm_{map} = \alpha'' C_{MAP-TC} + \beta'' C_{MAP-VP} \quad (130)$$

Source : auteur

Nous vérifions alors nos hypothèses en commençant par la VP. Le couple TC-VP est significatif. L'autre MAP-VP n'est pas valable au seuil de 5%. Le déterminant principal de la part modale est alors la différence de coût généralisé entre le TC et la VP. Pour le TC nous obtenons (Cf Tableau 178) :

Coefficients	Régression	Statistique T	Corrélation,	Détermination R ²
Constante	30,16	16,84	0,93	0,86
Variable TC-VP	-2,32	-9,97		

Source : calcul de l'auteur

Plus les écarts de coût diminuent plus le TC est favorisé. Réciproquement plus les écarts de coûts généralisés augmentent plus la part modale de la VP est favorisée (Cf Tableau 179) :

Coefficients	Régression	Statistique T	Corrélation,	Détermination R ²
Constante	9,90	2,58	0,95	0,90
Variable TC-VP	5,03	17,69		

Source : calcul de l'auteur

La MAP n'est pas significative.

Pour la MAP, les coefficients positif et négatif intrigant (Cf Tableau 180).

Coefficients	Régression	Statistique T	Corrélation,	Détermination R ²
Constante	57,71	18,44	0,89	0,79
Variable MAP-VP	-2,82	-6,93		
Variable MAP-TC	2,97	12,78		

Source : calcul de l'auteur

La relation entre la différence de coût généralisé et les parts modales existe mais la différence de coût généralisé du couple MAP-TC est positive. Or, pour le TC, le coefficient devrait aussi être négatif puisqu'il s'agit d'un mode motorisé. Néanmoins, cela peut justement renvoyer à un effet spatial.

2-6-3) Conclusion de cette première approche

Nous retrouvons les éléments essentiels du modèle GLOBAL et des fonctions de coûts généralisés associés. Cette fonction d'utilité agrégée mesure bien la variation des parts modales selon la différence de coûts généralisés dans le cadre quantitatif. Néanmoins, la relation à la part modale de la MAP intrigue puisque le coefficient positif ne correspond pas à l'arbitrage théorique. Un mode plus rapide devrait prendre des parts modales au mode le moins rapide, les coefficients des modes VP et TC devraient être de même signe. Un effet de la densité pourrait donc l'expliquer compte tenu des relations entre parts modales et densités.

3) Effet induit et direct des concentrations d'activité sur les variables du temps.

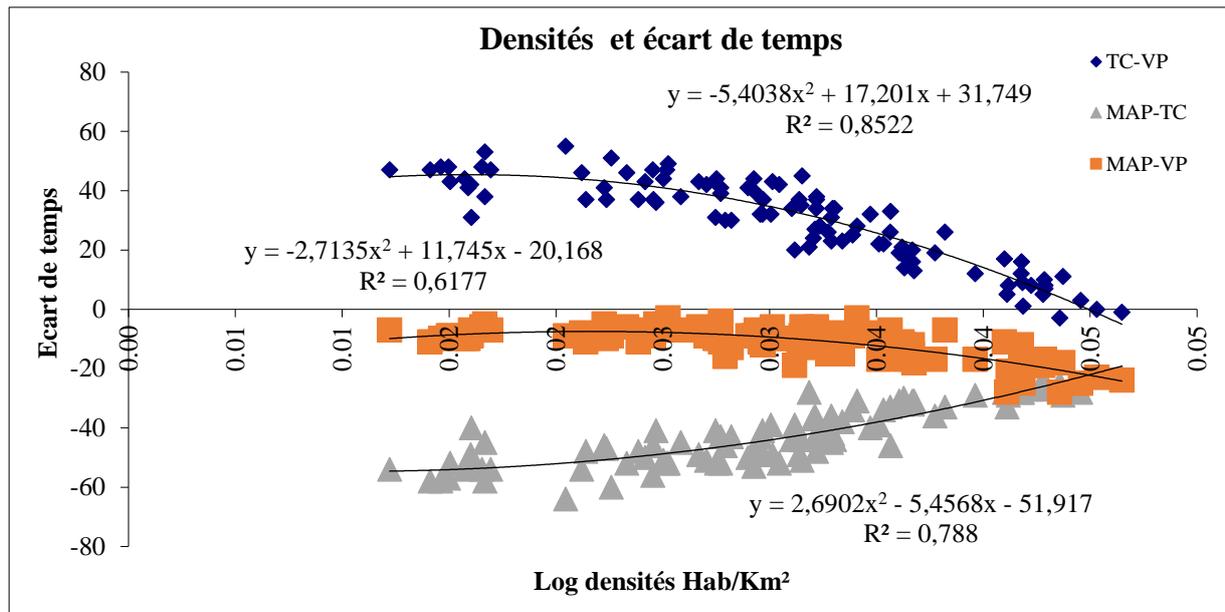
3-1) La relation densité part modale comme problème théorique

3-1-1) Densité et différence de coût généralisé

La régression entre densité et coûts généralisés donne des relations significatives ($R^2=0,74$) pour le couple TC-VP. Pour la MAP, les densités modifient la différence des coûts généralisés pour le couple MAP-TC ($R^2 = 0,61$), pour le couple MAP-VP la relation n'est pas linéaire et faiblement significative ($R^2 = 0,33$). Des relations avec les différences de coûts généralisés existent. Ils se composent des coûts d'usage et du temps. Aucune relation n'apparaît avec les coûts d'usage. Les coûts du temps sont composés de la valeur du temps et de la différence entre les temps de déplacement. La régression avec la valeur du temps ne donne aucun résultat, la densité n'influence pas les revenus.

Selon les écarts de temps, des différences apparaissent entre les significations des relations. Si elles sont très fortes pour les écarts de temps TC-VP ou MAP-TC ($R^2 > 0,78$) c'est moins le cas pour MAP-VP ($R^2=0,62$). Deux éléments apparaissent. Le faible coefficient pour le couple MAP-VP. La variation pour ce couple, vis-à-vis des deux autres, renvoie à une relation spécifique à expliquer. Ensuite, la forte régression pour le couple MAP-TC ($R^2 = 0,78$) dont le coefficient est positif. Or le temps du TC décroît en milieu dense, la compétition avec la MAP interroge. Pour le couple TC-VP la relation est inverse, l'écart de temps positif diminue avec les densités. Il existe donc bien un effet du sol (Cf Graphique 88).

Graphique 88: densités et écarts de temps des modes.



Source : calcul de l'auteur

Néanmoins, la part modale est soumise à un mécanisme de double causalité.

1. Elle dépend d'un déplacement et donc d'un motif.
2. Elle dépend d'un arbitrage entre coûts généralisés.

Aussi comment des densités d'habitant modifieraient-elles des parts modales issues d'un motif de déplacement, dû à une activité en jour ouvrable, alors qu'elles renvoient à un domicile ?

3-1-2) Concentrations d'activité et densités dans les secteurs EGT

Les motifs de déplacement supposent une activité. L'emploi au LT représente un motif d'activité. En effet, lorsque le motif de déplacement concerne les achats l'individu rencontre un vendeur au lieu de destination. Il suppose un emploi d'approvisionneur de stock ou d'artisan. De même, pour un professeur d'université que rencontre un étudiant. La consultation médicale suppose un emploi de médecin. Le motif de destination pour des habitants pour une activité suppose un emploi. L'emploi au lieu de travail (LT) concerne donc l'activité entreprise à l'intérieur des communes et un motif de déplacement. En effet, ces emplois permettent les activités qui conduisent aux motifs de déplacement, exceptés ceux concernant les visites à des amis. Cette conjugaison de l'activité aux emplois ne concerne pas un motif de déplacement spécifique, mais l'ensemble, à commencer par le domicile travail. A partir des données d'emploi au LT des recensements par commune, nous calculons l'activité du secteur avec notre programme VBA. (Cf Equation 131)

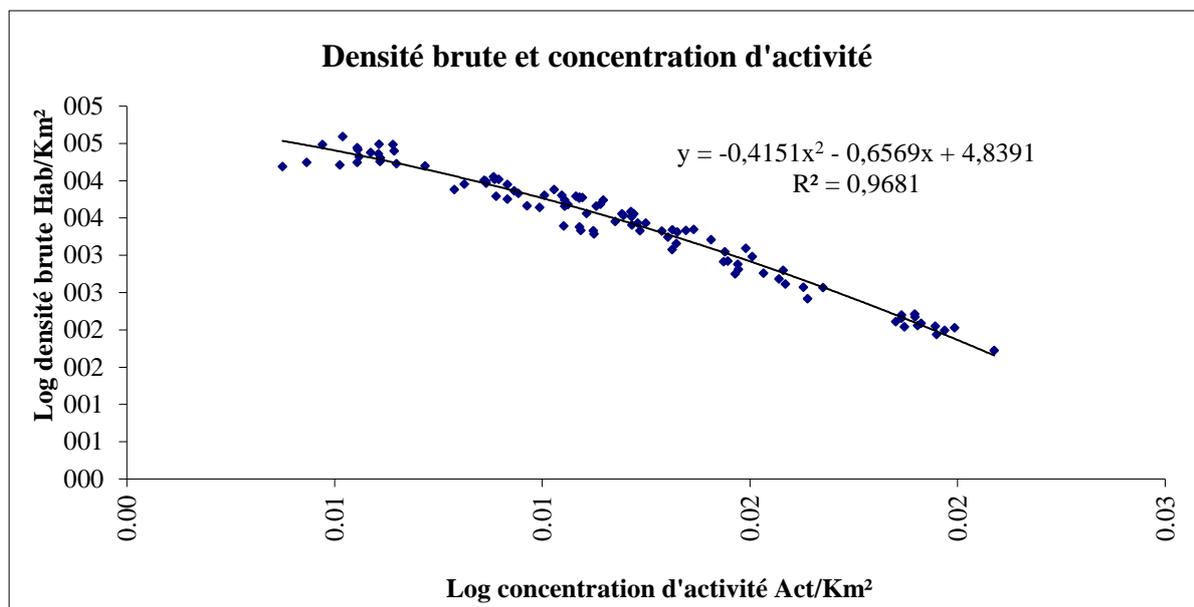
$$\text{Activité du secteur} = \Sigma \text{ des activités des communes (131)}$$

Source auteur

Nous calculons ensuite la densité d'emploi au LT. Nous faisons l'hypothèse d'une répartition aléatoire des activités sur le sol. La surface est supposée circulaire. La formule est alors $(1/2\sqrt{d})$. L'hypothèse est faible pour les milieux très denses. Pour les milieux non denses, où les positions des infrastructures sont essentielles pour comprendre la dispersion des activités, c'est moins vrai.

Lorsque la densité d'emplois au LT est forte, la distance entre les activités est faible. Nous changeons de métrique en Log. La densité d'activité explique l'habitat rejoignant des constats historiques (Cf Graphique 89). L'adéquation des deux courbes produit l'hypothèse que la densité ne modifie pas l'efficacité énergétique. La résidence et l'activité sont deux aspects de la mobilité urbaine. Le premier est à l'origine du premier déplacement, le second est une destination.

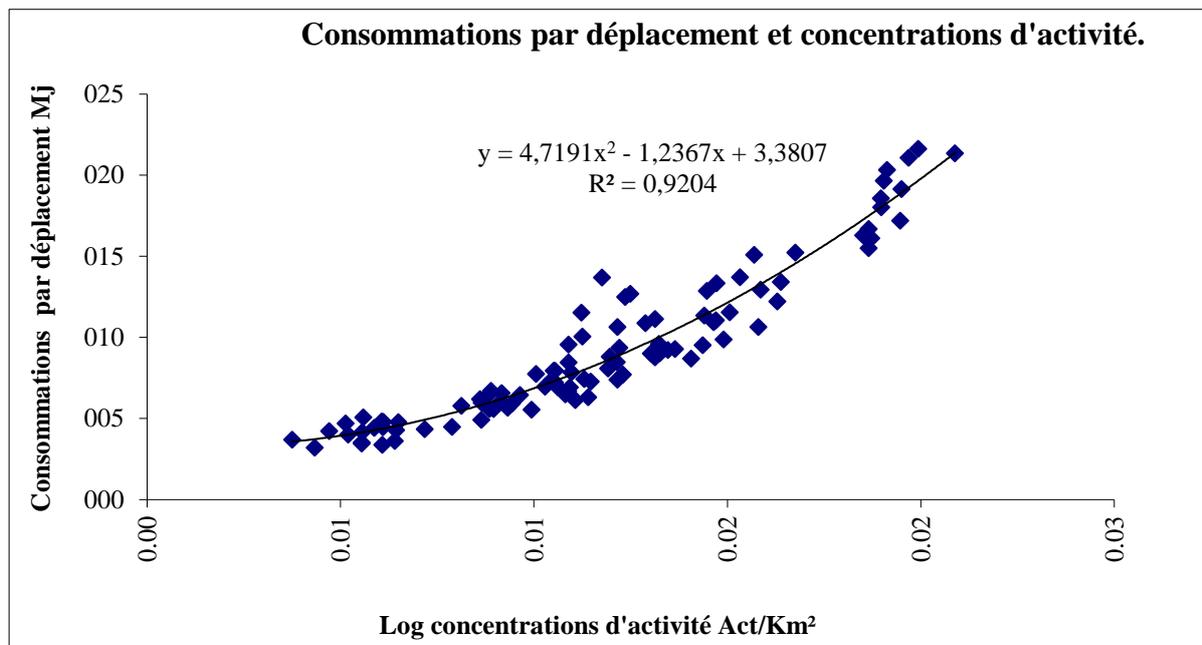
Graphique 89: densité et concentration d'activité



Source : calcul de l'auteur

Les régressions entre concentrations d'activité et consommation par déplacement le confirment (Cf Graphique 90).

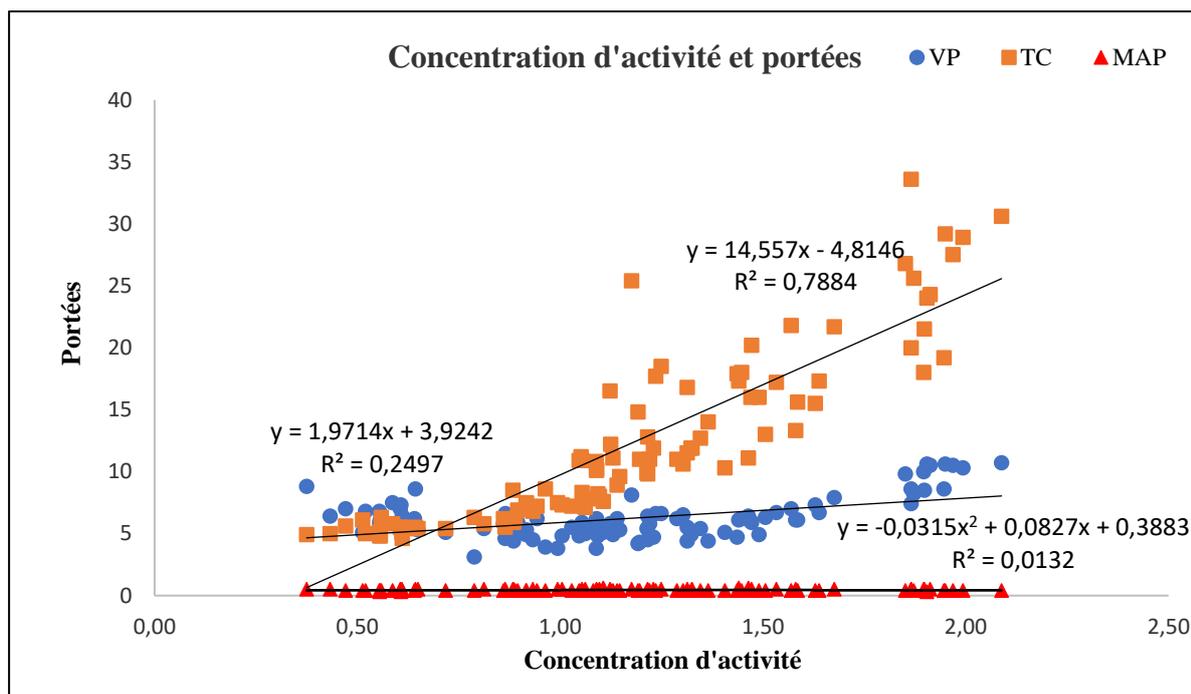
Graphique 90 : consommation par déplacement et concentration d'activité



Source : calcul de l'auteur

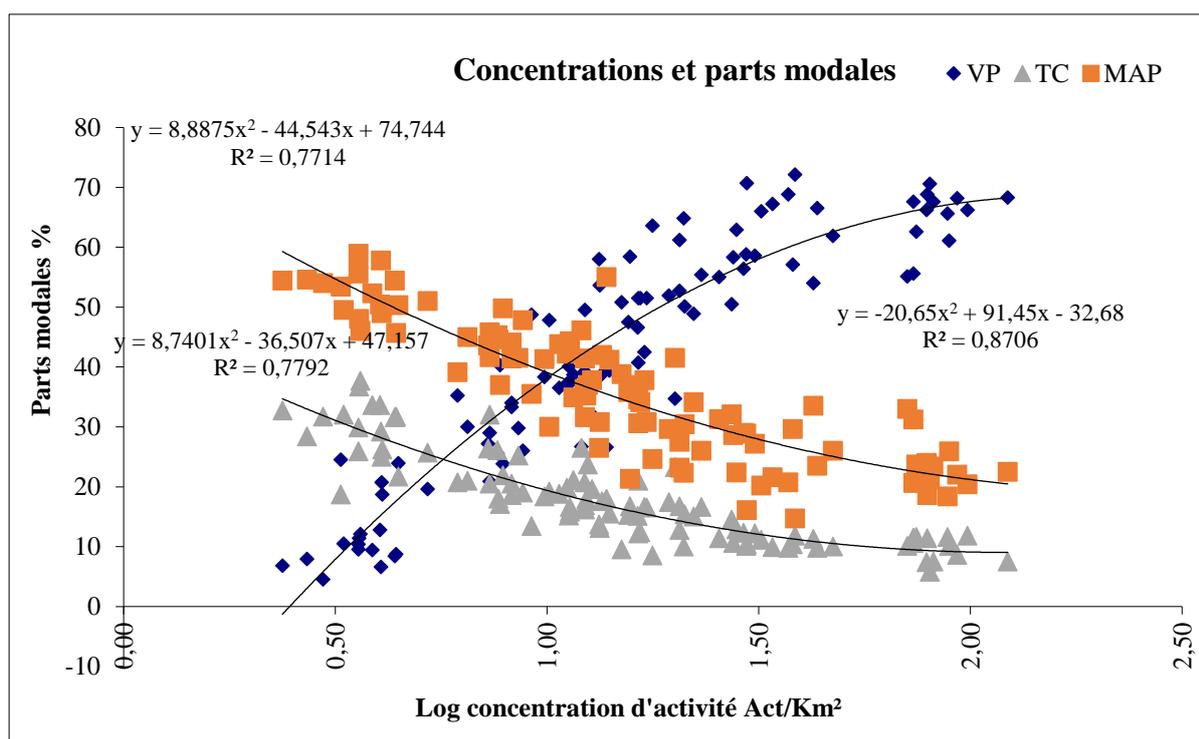
Cette relation est valable pour les portées ou les parts modales (Cf graphique 91,92).

Graphique 91 : portées et concentration d'activité



Source : calcul de l'auteur

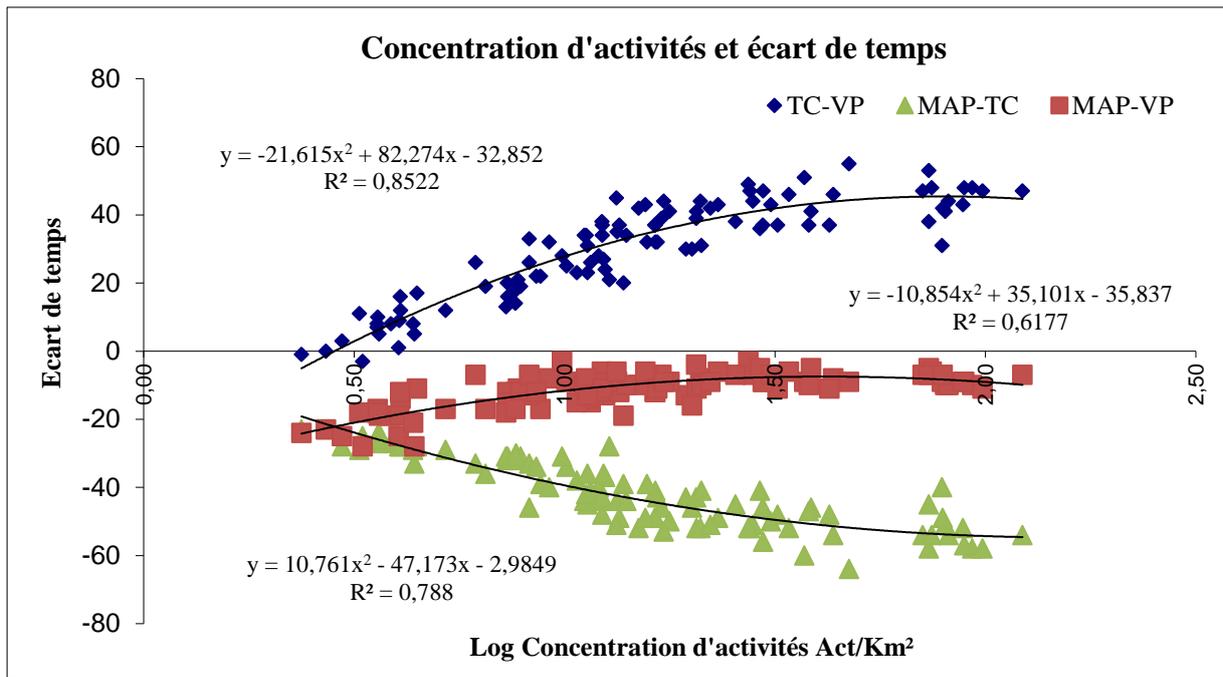
Graphique 92: distance moyenne entre les activités et parts modales résidentielles



Source : calcul de l'auteur

Aussi la concentration d'activité se substitue à la densité dans la relation à l'écart de temps. Or les activités justifient le motif à destination du déplacement, les coûts généralisés et le choix modal. Pour la partie qui renvoie aux densités (visite à un ami) la relation n'est pas valable. (Cf Graphique 93).

Graphique 93 : concentration d'activité et écart de temps



Source calcul de l'auteur.

La relation entre densités et parts modales vient de la proximité entre lieu d'habitats et d'activités. Les seuils de densités selon les parts modales n'existent pas en IDF. L'observation le montre. Pour la VP, les parts modales s'étendent sur l'ensemble des communes tout en se réduisant à Paris. Pour le TC, il existe des variations paradoxales de part modale selon les densités. Ainsi, les parts modales (0.22) sont atteintes avec une densité de 5Hab/Km² ou de 88Hab/Km² d'autres sont nulles avec une densité de 901hab/Km². Néanmoins, comment cette concentration spatiale modifie des temps ?

3-2) Les facteurs réticulaires du temps.

3-2-1) du temps aux facteurs réticulaires et énergétiques

Le temps est une portée selon une vitesse dans un réseau. Il traduit un rapport spatial ($T = P/V$). Le temps est un rapport dont le contenant est au numérateur (portée) et le contenu au dénominateur (vitesse). Dans un réseau, l'espace-temps (la vitesse) est contenu dans un espace (la portée). La portée est une surface traversée à l'intérieur d'un réseau dont l'une des dimensions est la distance parcourue. Elle renvoie à l'infrastructure du réseau et la vitesse à son fonctionnement. Le couple TC-VP illustre le passage de l'écart de temps aux facteurs réticulaires (Cf Equation 132)

$$\Delta T = T_{tc} - T_{vp} = P_{tc}/V_{tc} - P_{vp}/V_{vp} \quad (132)$$

Source calcul de l'auteur.

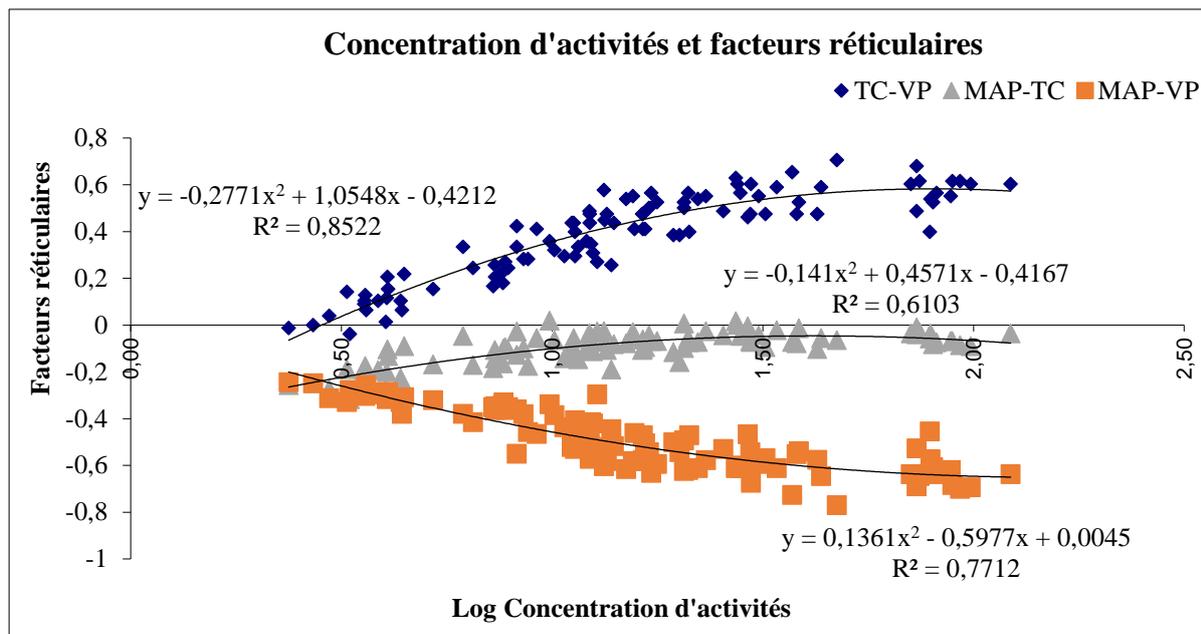
Cette équation peut s'écrire sous la forme (Cf Equation 133) :

$$F_r = P_{vp}/V_{tc} (P_{tc} / P_{vp} - V_{tc} / V_{vp}) \quad (133)$$

Source calcul de l'auteur.

La régression entre les facteurs réticulaires et les écarts de temps donne une constante de 60 ($R^2 = 1$). ΔT équivaut à F_r (facteur de variation réticulaire) (Cf Graphique 94).

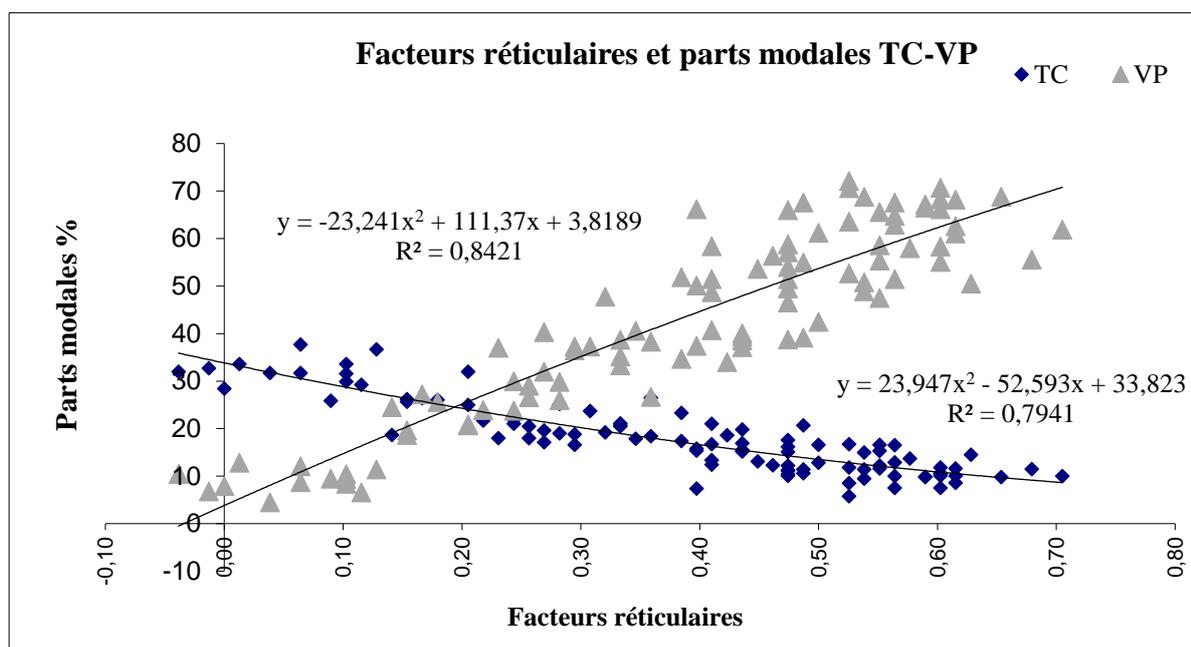
Graphique 94: distance moyenne activité et facteurs réticulaires mobilité résidentielle.



Source : auteur

Or le facteur réticulaire justifie la variation des parts modales (Cf Graphique 95) quel que soit les couples.

Graphique 95: relation facteurs réticulaires et parts modales



Source calcul de l'auteur.

Cette relation reflète alors la non-fongibilité des deux sous espaces à l'échelle locale. Elle montre aussi que les arbitrages des individus quelque-soit leur caractéristique propre sont modifiés puisque leurs temps le sont. Les flux déterminent l'individu moyen dans le réseau. Le milieu réticulaire modifie son arbitrage rationnel ce qui est valable pour toutes les fonctions d'utilité.

Si la relation entre espace et temps est connue par les modèles gravitaires ou des coûts généralisés, l'introduction de l'énergie était encore à faire.

Nous avons donc, au travers des parts modales, une relation statistique « espace-énergie » en IDF. Ensuite, la portée et la vitesse sont deux éléments de la consommation d'énergie. Néanmoins, cette relation montre aussi deux effets séparés de l'espace sur le réseau, l'un issu de la portée, l'autre de la vitesse, déterminants de l'efficacité énergétique de l'habitant pour les réseaux motorisés.

3-2-2) L'effet direct de la concentration locale sur les portées

« L'hypothèse de complémentarité » (MILAKIS, et alii (2015) nous explique que les formes globale et locale interagissent suivant les motifs de déplacement. Or localement, sur son échelle de mesure, la croissance des concentrations d'activité réduit les portées potentielles des déplacements des habitants des secteurs EGT. Dans la part de marche 91% ont une portée inférieure à 1 Km. En conséquence, la concentration d'activité modifie les portées et donc le temps de la MAP pour la mobilité interne ($R^2=0.82$) des secteurs EGT. Les parts modales de la MAP augmentent. L'effet est donc direct. De même, un certain nombre de personnes arrivent à Paris en VP avant de faire des courses en MAP du fait du rapprochement des activités. Aussi un tissu mixte n'encourage pas simplement dès l'origine l'usage de la MAP d'un habitant d'un secteur en rapprochant l'habitat et l'activité (appariement), mais aussi celle des non-résidents, s'ils migrent et qu'ils effectuent des déplacements dans le secteur de destination. La concentration d'activité conduit à l'usage de la MAP par l'intermédiaire des portées.

3-2-3) Effet induit de la répartition des activités sur les vitesses

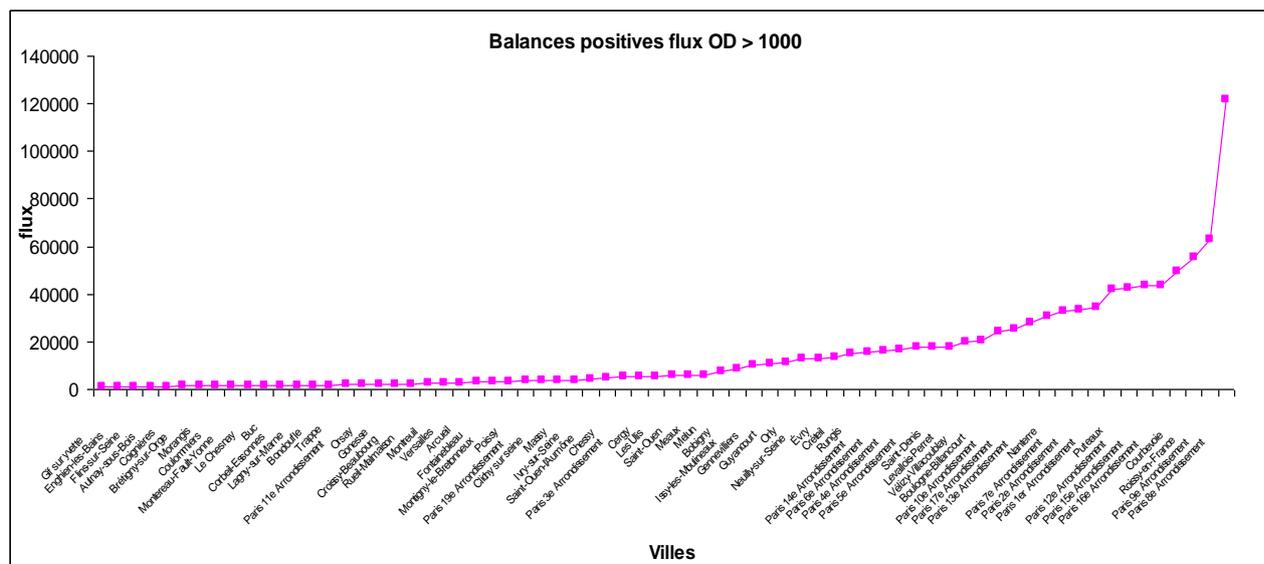
3-2-3-1) La question des flux

Dans les recensements, si les flux sont supérieurs à 100 dans une commune, ils sont recensés à l'origine (résidence) et à leur destination (lieu de travail). Le lieu à l'intérieur de la commune n'est pas spécifié. Certaines personnes exerçant des professions les amenant à se déplacer (chauffeur routier) sont comptées à la résidence. Les effectifs supérieurs à 500 sont « fiables » les autres moins. Nous obtenons une matrice origine destination avec les distances. Nous effectuons une matrice O-D des communes. Quelques « bizarreries » existe dans les fichiers, certains flux viennent des DOM-TOM. Quatre catégories de communes se distinguent :

- Les communes émettrices.
- Les communes réceptrices.
- Les communes « réceptrices-émettrices » si les flux reçus dépassent les flux émis.
- Les communes « émettrices-réceptrices » si les flux émis dépassent les flux reçus.

Un déséquilibre existe entre les lieux de réception et d'émission. Il existe 366 réceptrices (318 sur les données sectorisées) et 540 communes émettrices. Ensuite il existe 292 communes de type émetteurs-récepteurs dans les premières. Nous effectuons la balance des flux reçus et émis nous obtenons le graphique suivant pour les communes dont les flux reçus sont supérieurs à 1000 (Cf graphique 96).

Graphique 96: balance des flux > 1000



Source : auteur d'après recensement

Certains arrondissements parisiens captent une quantité de flux importante. Ainsi Paris 1^{ère} arrondissement reçoit les flux de 135 communes et en émet vers 7 montrant sa capacité d'attraction ce qui confirme le caractère mono-polycentrique de l'IDF. Néanmoins, d'autres communes ont une balance positive des flux reçus situés dans la première (Boulogne Billancourt, Saint Denis...) et dans la deuxième couronne (Cergy pontoise...). A la matrice OD des flux par commune, nous ajoutons des distances euclidiennes selon les mairies de chaque commune par l'intermédiaire de « Google MAP » pour les communes réceptrices des secteurs EGT. Nous avons choisi la mairie parce qu'il s'agit normalement d'un lieu d'activité généralement proche du « centre-ville ». Cette distance calculée n'est pas un parcours individuel mais une distance territoriale d'une commune à une autre. Nous faisons l'hypothèse que les individus parcourent les distances « mairie à mairie ». Nous effectuons alors le modèle gravitaire selon les populations sur l'ensemble des relations dont le nombre d'interaction (flux reçu) est supérieur à 3 (notre test a besoin d'au moins 4 variables pour être significatif) (Cf Equation 134) :

$$\text{Log} (\text{flux}/P_i P_j) = K \times \text{Log} (\text{DIST})_{ij} \quad (134)$$

$P_i P_j$ populations des lieux d'émission et de réception. DIST = distance entre les communes. Nous dissociions l'ensemble en deux : nombre de relation >3 soit 223 relations, nombre de relation >5 soit 202 relations. Nous contrôlons les résultats (Test T >5%) taux de détermination et normalité des résidus (test JB vérifiable (OK)). Nous obtenons alors les résultats suivants (Cf Tableau 181) :

Interactions	Test JB>5%	A>5%	<0,4	0,4<R ² <0,6	0,6>R ² >0,8	>0,8	Relation OK	Nbre total
>5	14	50	43	47	29	16	92	202
>3	14	68	43	47	29	18	94	223

Source : auteur

135 relations sont significatives sur 202 (70%) pour un nombre d'interaction > 5 et 137 sur 223 pour un nombre >3 (62%). A l'échelle communale la région IDF n'est plus monocentrique.

Sur ce nombre 43 ont un coefficient $R^2 < 0.4$ ce qui est très faible pour expliquer la variable Y. 51 ont un coefficient compris entre 0.4 et 0.6 ensuite 31 ont une régression significative et 17 situés hors de Paris très significatives. Les arrondissements parisiens ont un coefficient $R^2 < 0.4$ ou entre 0.4 et 0.6. Ensuite les coefficients de DIST varient entre -2.34 et -0.39 ce qui rejoint les modèles courants. La variation du coefficient montre que les communes n'ont pas la même capacité d'attraction. Des points d'attraction secondaires s'affirment (exemple villes nouvelles) outre Paris. Si nous supposons alors que les flux dépendent à la fois de la population active à l'origine (P_i) mais aussi de l'emploi au LT de la commune de destination. Nous réécrivons la relation sous la forme suivante (Cf Equation 135):

$$\text{Log} (\text{flux} / (P_i * (\text{Emploi au LT})_j)) = K \times \text{Log} (\text{Dist})_{ij} \quad (135)$$

Source : auteur

Nous obtenons les mêmes résultats que plus haut (Cf Tableau 182).

Tableau 182 : modèle gravitaire amendé.								
Interactions	Test JB>5%	A>5%	<0,4	0,4<R ² <0,6	0,6>R ² >0,8	>0,8	Relation OK	Nbre total
>5	14	50	43	47	29	16	92	202
>3	14	68	43	47	29	18	94	223

Source : auteur

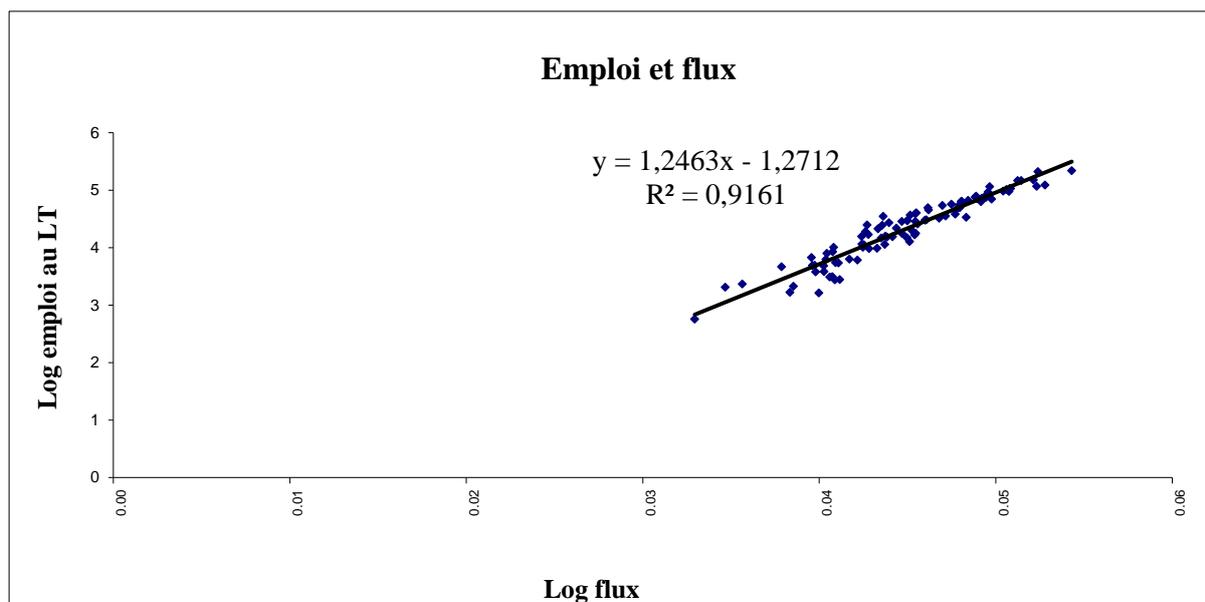
Dans le secteur récepteur les déterminants population active ou emploi au LT sont interchangeables. L'attraction des emplois qui justifie les relations constatées dans le modèle gravitaire. Nous ajoutons alors les flux récepteur et émetteur dans les secteurs sauf un dont les données manquent (Cf Equation 136).

$$\text{Flux des secteurs} = \Sigma \text{ des flux des communes} \quad (136)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous calculons selon chaque secteur les densités des flux des secteurs et nous changeons de métrique. 30% des secteurs EGT ont une balance emploi-actif positive et reçoivent des flux en PC en GC 12%. La relation entre croissance des emplois et des flux est un résultat attendu. (Cf Graphique 97)

Graphique 97 : emploi au lieu de travail et flux par secteur



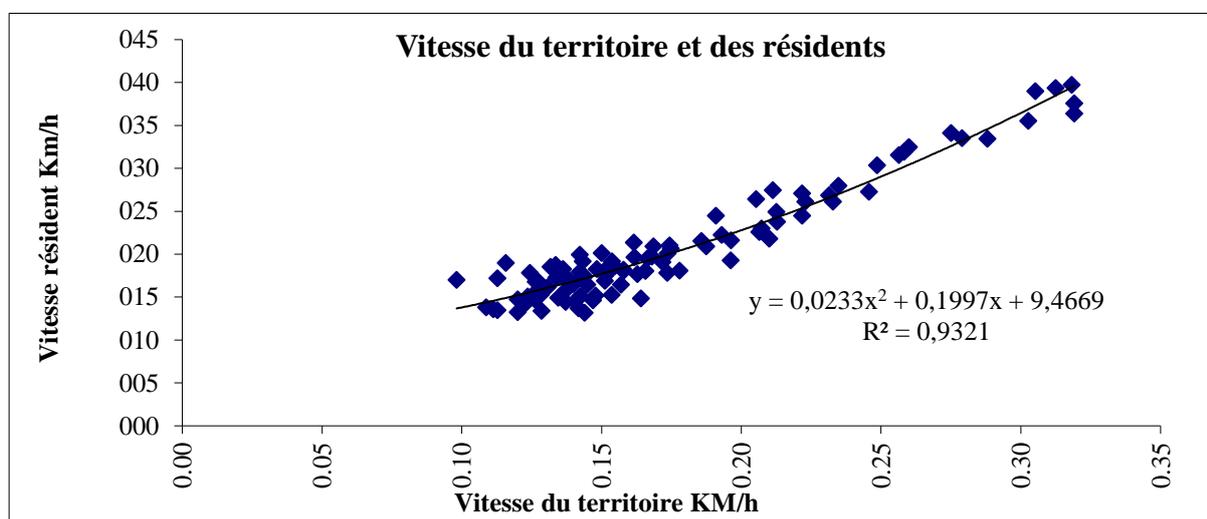
Source : calcul de l'auteur

Il vérifie l'hypothèse que nous avons posé. L'emploi au LT renvoie bien aux motifs de destination. Nous calculons alors les densités de flux par secteurs et nous changeons de métrique en log.

3-2-3-2) Effet des flux sur les arbitrages des résidents.

En VP, l'individu intègre un réseau routier, sa vitesse dépend de celles des autres conducteurs. La vitesse du territoire (non-résidents + résidents) détermine celles des résidents (Cf graphique 98)

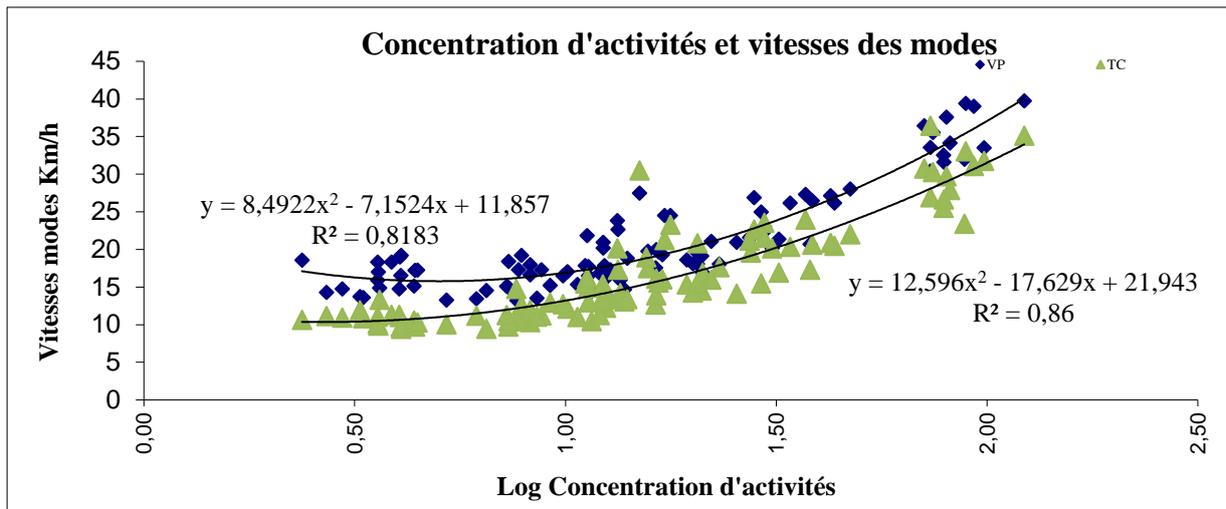
Graphique 98 : vitesse du territoire et des résidents VP



Source : auteur

Plus la concentration d'activité augmente plus la vitesse baisse, pour les TC et VP (Cf Graphique 99).

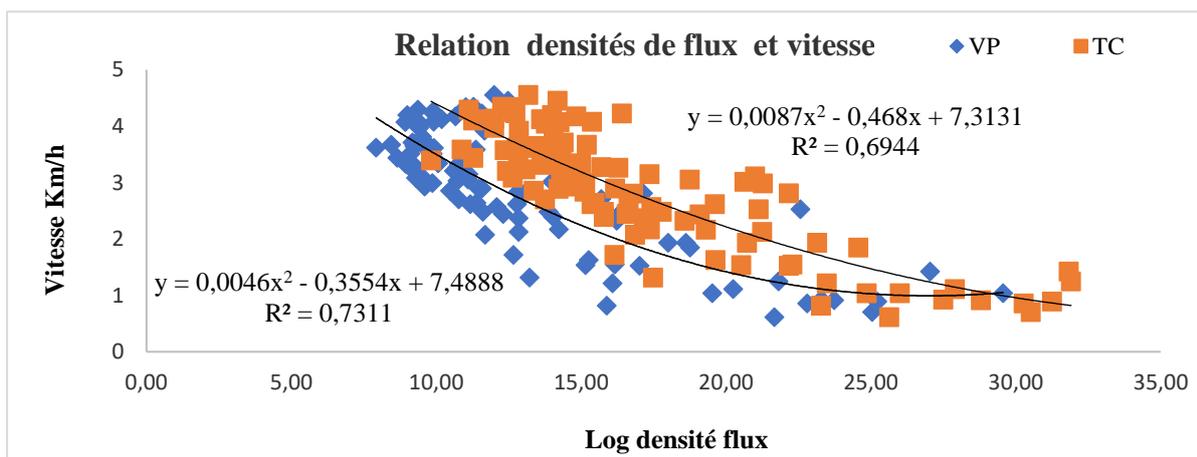
Graphique 99: concentration d'activité et vitesses des modes



Source : auteur

Or, la densité des flux augmente selon la concentration d'activité ($R^2 = 0.91$). La concentration de véhicules modifie la vitesse de déplacement des modes dans les secteurs concentrés (Cf Graphique 100).

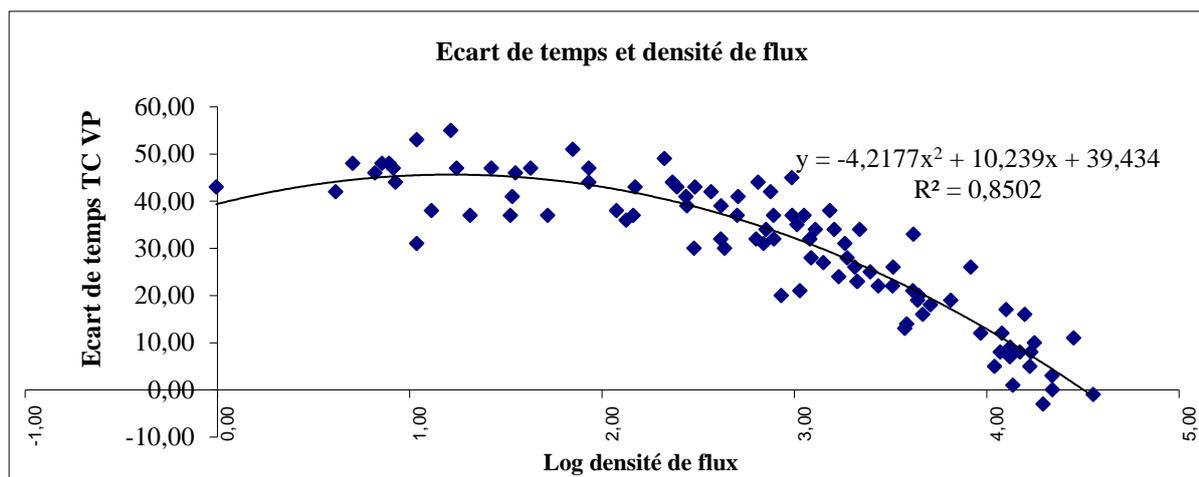
Graphique 100 : densité de flux et vitesse des modes



Source : auteur

La densité de flux reçus baisse les vitesses et déterminent l'écart de temps. Aussi les résidents dépendent des non-résidents dans l'arbitrage. La variation des vitesses des réseaux d'un territoire vient des résidents et des non-résidents. Dans les secteurs récepteurs, l'augmentation des flux détermine les arbitrages des résidents et donc leurs parts modales. (Cf Graphique 101)

Graphique 101: écart de temps VP et TC densité de flux



Source : auteur

Ainsi pour la mobilité d'échange la concentration d'activité favorise le TC ($R^2=0.87$) : la vitesse de circulation des VP faiblit, ce n'est pas le cas des TC en site propre ou protégé (couloir de bus) dont la vitesse reste stable conduisant alors à un transfert modal des habitants des zones de réception. En effet, si les portées sont supérieures à l'usage de la MAP, ils se reportent sur un mode motorisé. La congestion pour une distance de déplacement donnée dans un territoire spécifique explique le report.

3-2-2-3) Variation des flux

Pour une portée donnée, si les flux varient, alors les parts modales des véhicules motorisés varient indépendamment de la morphologie du réseau. Le samedi le volume de mobilité baisse d'un million de déplacement. (Cf Tableau 183)

Tableau 183 : nombre de déplacements Paris samedi				
Département	Interne	Reçus et émis		
		Paris	PC	GC
75				
Total	7,6	0	2,9	0,8
Somme totale	11,3			
Part de la mobilité d'échange	0,33			

Source : calcul de l'auteur à partir d'EGT 2010

Dans les EGT antérieurs, les flux des modes varient dans les liaisons. La mobilité interne baisse de 400 000 déplacements puisqu'un certain nombre de personnes ne travaillent pas. Le dimanche, cette baisse de flux est plus prononcée. Les mêmes éléments se retrouvent en couronne. Par rapport à un jour de semaine, la VP voit son nombre de déplacements augmenter quelque-soit les liaisons ce qui est consécutif à la variation des parts modales. Le dimanche cet élément se retrouve. Les mêmes éléments se retrouvent en couronne. Néanmoins, seul Paris et la liaison Paris GC voit leur nombre de déplacements augmenter (Cf Tableau 184)

Tableau 184 : déplacement en VP samedi vis-à-vis d'un jour de semaine par liaison.

	Paris-Paris	Paris-PC	Paris-GC	PC-PC	PC-GC	GC-GC	Autres	Ensemble
TC	-38%	-59%	-68%	-54%	-71%	-58%	33%	-53%
VP	17%	9%	24%	2%	9%	0%	95%	5%
2R	-45%	-65%	-80%	6%	-60%	-5%	n.s.	-25%
Marche	-17%	35%	n.s.	-37%	-62%	-34%	n.s.	-29%
Ensemble	-20%	-32%	-36%	-23%	-12%	-15%	84%	-19%

Source : EGT 2001

Nous ne disposons pas des données pour 2010 néanmoins tout comme en 2001 nous constatons une augmentation des parts modales en 2010 entre les JO ou les week-ends pour la VP à Paris. Réciproquement nous constatons une baisse part modale pour le TC (Cf Tableau 185)

Tableau 185 : part modale des résidents des voitures 2010.

Jours	SAM	DIM
Paris	+0,02	+0,11
Cœur d'agglomération	+0,14	+0,16
Agglomération centrale	+0,10	+0,26
Autres territoires	+0,05	+0,10

Source : auteur

Or les déplacements en VP sur la liaison Paris-Paris croît dans les EGT antérieurs. Or deux changements existent dans les réseaux de Paris :

- La vitesse de circulation de la VP plus rapide du fait de moindre flux.
- La vitesse de déplacement des TC plus lente avec des intervalles plus grands.

La variation des vitesses explique alors ce changement de part modale à l'intérieur de Paris. Ce n'est pas le cas pour les autres liaisons ou des éléments de configuration du réseau interviennent. Certes le changement de motif peut conduire à faire de la VP un élément de confort supplémentaire (exemple le coffre pour le motif achat qui croît le Week-end) mais il s'ajoute au fait que la VP est plus rapide et moins consommatrice de temps. Aussi les concentrations de flux des non-résidents modifient les arbitrages des résidents.

Cette relation montre l'effet des flux motif domicile travail sur les parts modales des modes pour l'ensemble des autres motifs. La variation en quantité (domicile travail) d'un motif de déplacement modifie les choix modaux des autres motifs. Il existe donc une interdépendance des motifs de déplacement. La répartition spatiale des activités avec des facteurs réticulaires modifie l'arbitrage et donc les choix modaux. Ces choix dépendent de l'attraction des lieux de réception. Ainsi, à Paris les flux reçus déterminent les vitesses et donc les choix modaux des résidents. Ces flux dépendent des lieux d'émission et d'échelles territoriales englobent des communes situées jusqu'à 40 Km. Elle interroge alors la conjecture de Mogridge.

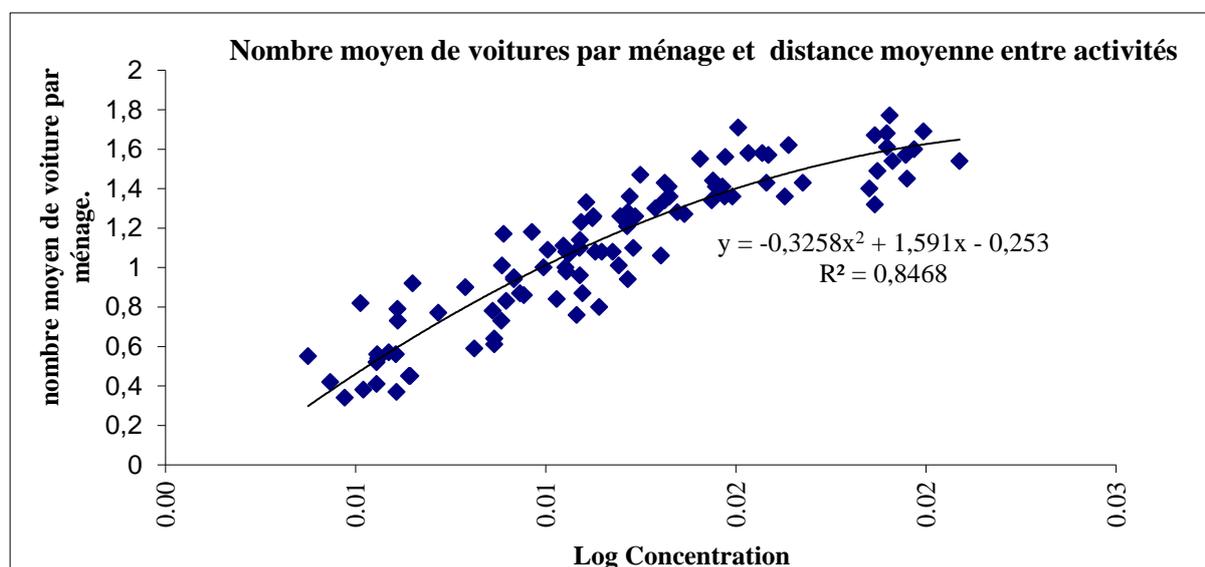
Si l'offre viaire à Paris augmente, alors le nombre de véhicules reçu au lieu de réception augmente, elle bénéficie aux résidents mais aussi aux non-résidents du lieu de réception. Il existe alors une augmentation de trafic VP contraignant l'offre de TC pénalisant alors les résidents utilisant les transports en surface. Si les réductions de vitesse de la VP impliquent un avantage pour le TC, elles ne pénalisent pas les résidents qui se transfèrent sur les TC mais pas pour les non-résidents en zone de réception si aucune offre de TC supplémentaire dans la zone d'émission n'existe. Leur condition de transport se dégrade donc sans possibilité de choix modal.

Enfin il y a interdépendance dans les arbitrages des motifs de déplacement. Dans les réseaux, les flux des motifs et les individus quelque-soit leur revenu s'y agrègent. La variation de la quantité de déplacements d'un motif modifie les arbitrages des autres, comme le montre la variation des parts modales des résidents parisiens. Cet effet induit est alors à petite échelle issue de la répartition des densités sur le territoire de l'IDF. Aussi, cet écart de temps devrait modifier la décision d'investissement des ménages.

3-3) Taux de motorisation et écart de temps.

Le taux de motorisation baisse avec la concentration d'activité. Néanmoins, la concentration d'activité interagit sur l'écart de temps qui explique le nombre de voiture du ménage (Cf Graphique 102)

Graphique 102 : nombre moyen de voitures par ménage et concentration d'activités.

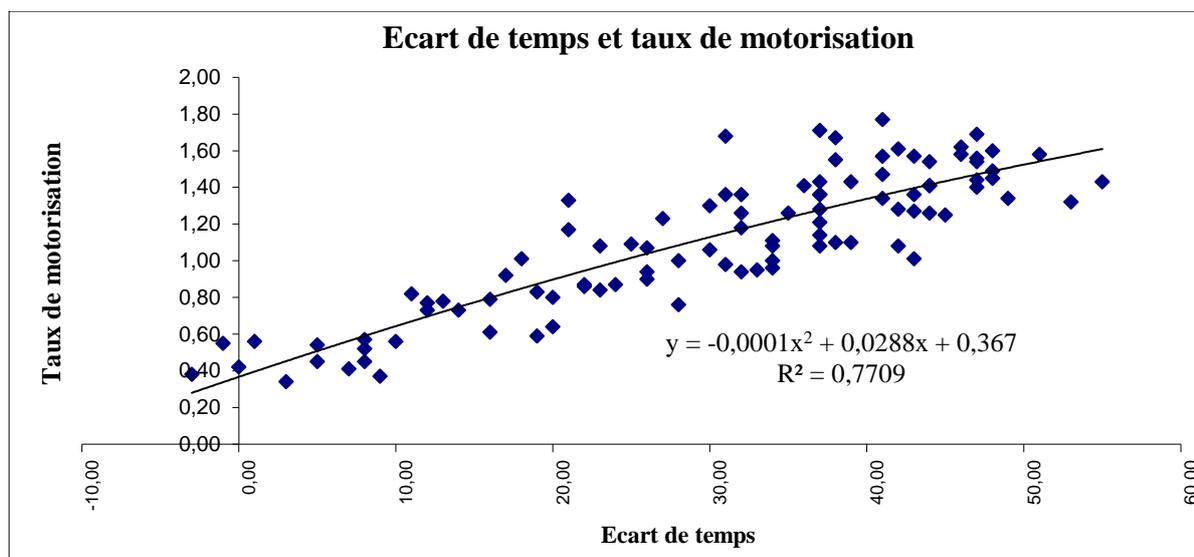


Source : calcul de l'auteur

Pour l'abonnement TC nous retrouvons une même relation avec des coefficients de régression plus faibles ($R^2 = 0.66$) ce qui s'explique par le fait qu'on peut être abonné et motorisé. Le nombre moyen de VP par ménage montre la capacité des individus de chaque ménage à choisir un mode. Le nombre d'abonnement décroît selon le nombre de voiture.

Les ménages arbitrent entre deux modes TC ou VP dans certains secteurs où l'abonnement se substitue à la voiture. Dans d'autres ils sont multi motorisés (Cf Graphique 103)

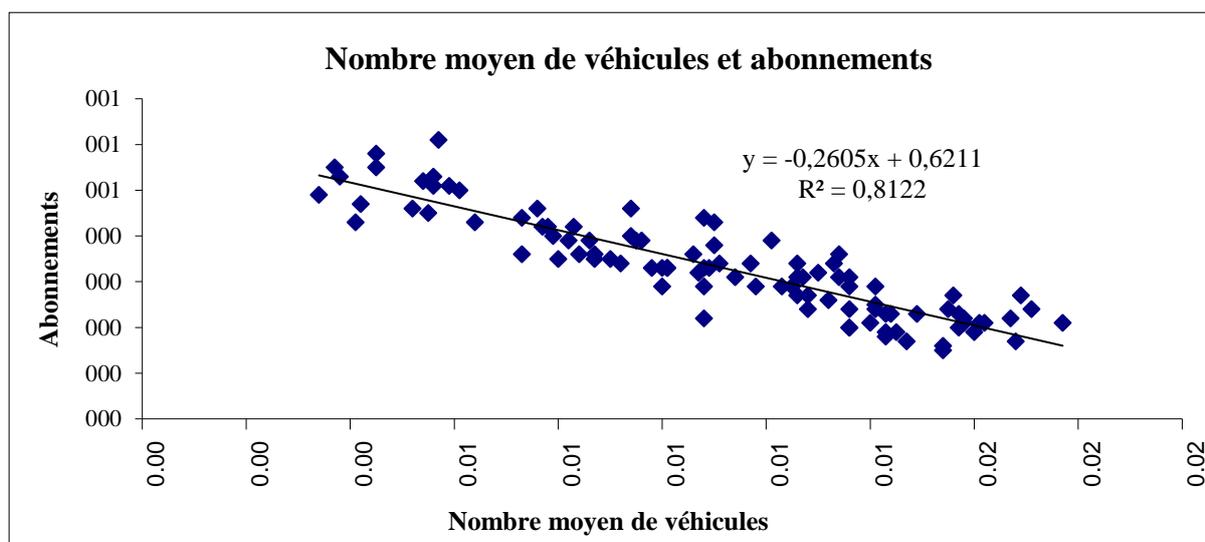
Graphique 103: relation écarts de temps et taux de motorisation



Source : calcul de l'auteur

Or si l'écart de temps croît la motorisation croît. (Cf Graphique 104)

Graphique 104 : nombre moyen de voitures et abonnements



Source : calcul de l'auteur

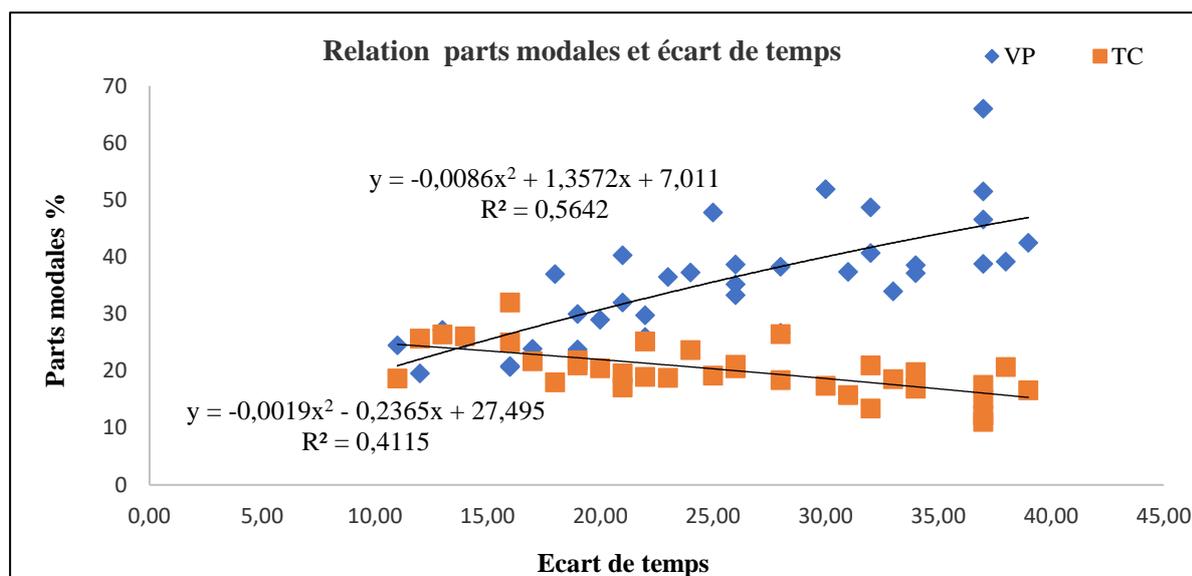
Hormis les véhicules d'entreprise utilisés, le nombre moyen de véhicule reflète l'investissement à l'achat. Sur les deux modes motorisés l'effet de l'écart de temps explique à la fois la modification des parts modales et les modifications des décisions d'investissement voiture ou abonnement. Les taux de motorisation impliquent une dispersion des parcs selon les espaces. Aussi, le revenu pour distinguer ceux qui sont contraints à la multi-motorisation, et ceux qui la choisissent, est aussi sans doute une variable même si la régression entre valeur du temps et taux de motorisation n'indique pas de relation. De plus, les véhicules à disposition sont des avantages en nature qui n'apparaissent pas forcément dans les revenus.

Une échelle plus fine à l'échelle des quartiers classés selon des niveaux de revenus serait nécessaire. Enfin les habitudes et « les modes de vie » seraient sans doute à examiner.

3-4) L'effet d'échelle et interaction spatio-réticulaire.

Pour Paris, la relation disparaît entre parts modales et facteurs spatiaux pour la VP et le TC. Les facteurs réticulaires du déplacement des habitants ne modifient plus les parts modales aux seuils de concentration les plus forts. Pour la première couronne, la relation entre facteurs réticulaires et parts modales est significative pour le TC et la VP, pour la MAP elle est très faible (Cf Graphique 105).

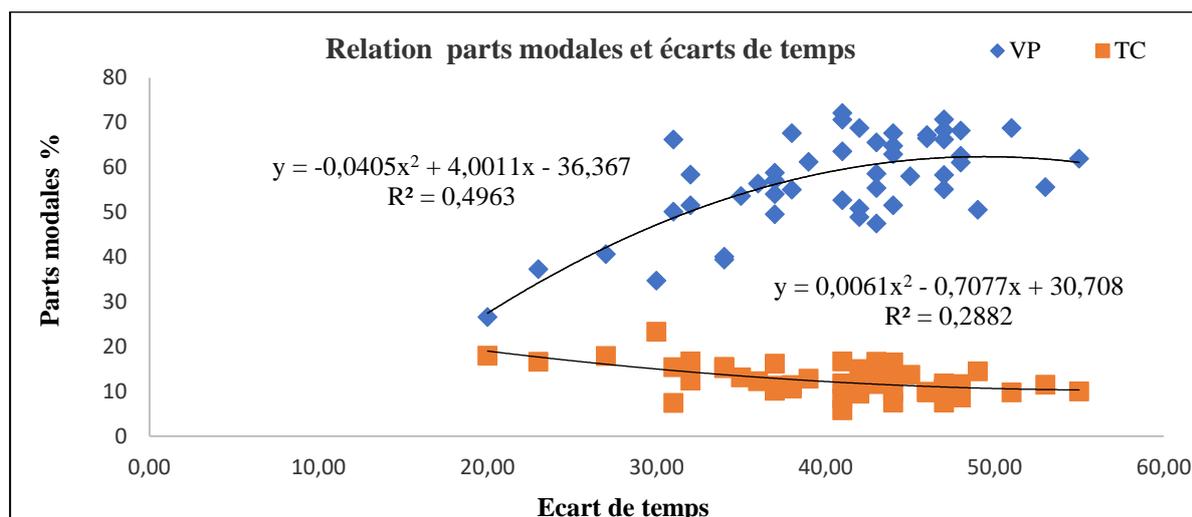
Graphique 105: écart de temps et parts modales première couronne VP et TC.



Source : calcul de l'auteur

Pour la GC, nous retrouvons les mêmes caractéristiques (Cf Graphique 106)

Graphique 106 : écart de temps et concentration d'activités grande couronne

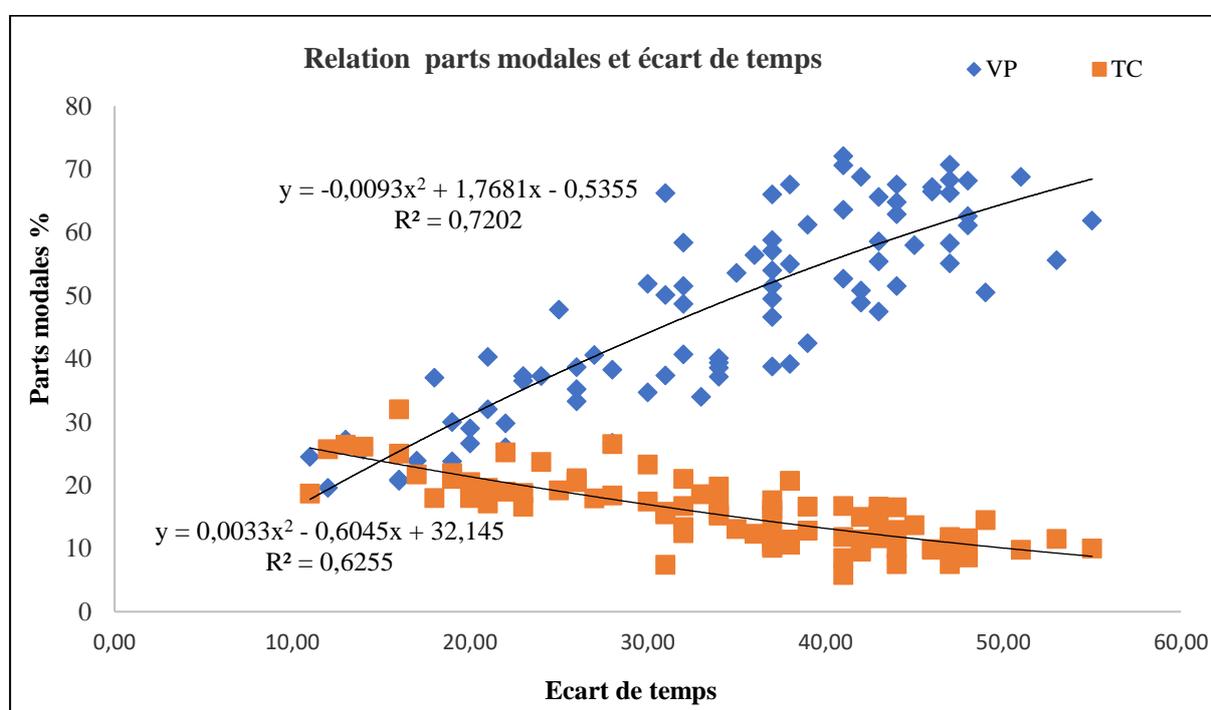


Source : calcul de l'auteur

La relation est plus faible que la première couronne pour les modes motorisés. Les relations établies régionalement s'estompent en couronne. Les flux issus de la polarisation expliquent la relation, ils ne concernent pas nécessairement les habitants de la couronne en cause.

Quantitativement, les zones analysées « ferment le périmètre » et les réseaux le franchissent. La répartition régionale montre des flux intégrant Paris. Ces flux externes modifient les circulations et uniformisent les vitesses du périmètre et donc la mobilité des habitants parisiens. Avec des portées similaires, cela implique de faibles variations des temps quelque-soit les modes, il est impossible de détecter l'effet des concentrations sur les choix modaux dans Paris. Un découpage plus fin réduit les distinctions dues aux interactions territoriales avec les autres secteurs puisqu'elles sont réticulaires. C'est moins le cas pour les couronnes, où de faibles relations existent puisque « les pics de densité » reproduisent partiellement le phénomène parisien. La différence morphologique des réseaux modifie la relation au mode TC puisqu'il n'existe plus en Grande Couronne. Si nous cumulons les deux couronnes la densité de flux redevient alors un paramètre pertinent qui explique cette variation ($R^2=0,71$) (Cf Graphique 107)

Graphique 107 : écart de temps et parts modales petite et grande couronne



Source : calcul de l'auteur

Les polarités secondaires de la région IDF renvoient à des concentrations d'activité qui à leur tour produisent des effets sur les vitesses de déplacement. En effectuant une analyse par couronne « nous cassons » donc des flux. Les effets de la polarisation visibles à l'échelle de la région ne le sont pas à d'autres. Cette disjonction est un frein pour l'analyse quantitative, mais sur une échelle pertinente, elle permet de comprendre les effets de la répartition des concentrations d'activités sur le fonctionnement des réseaux. Ainsi, à l'échelle de l'IDF, l'ensemble des flux à l'origine et à la destination est intégré ce qui permet de montrer cette relation.

Aussi, les flux doivent être compris dans leur intégralité pour estimer localement des valeurs de concentration d'activité conduisant à la concentration des flux dans les réseaux locaux. Nous constatons des variations selon le découpage en couronnes similaire à celle des densités.

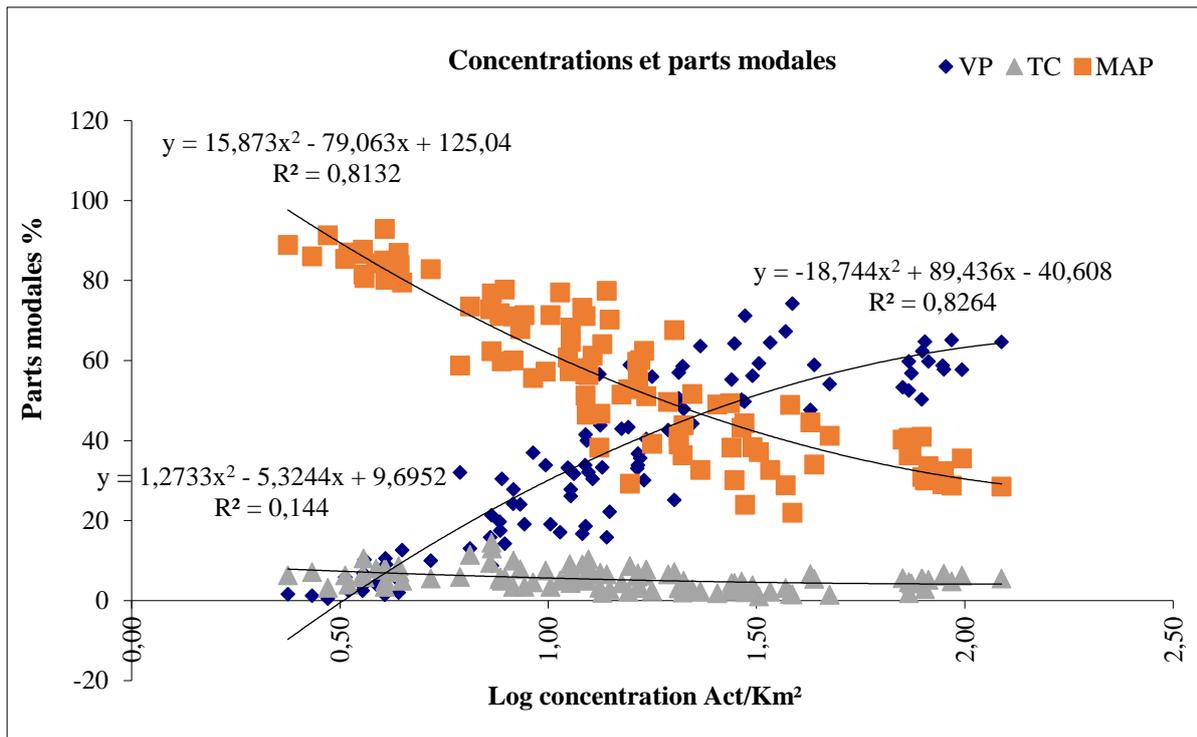
Or, les flux expliquent les relations. Les périmètres de régression, morcellent le territoire alors que les flux les franchissent ce qui implique que les valeurs restantes ne traduisent pas l'effet de la concentration d'activité sur l'attractivité des flux et donc les parts modales. En effet, ils sont régionaux et non locaux. Les réseaux additionnent les circulations et mélangent les résidents et non-résidents. L'effet induit en dépend. Si l'attractivité est forte l'accumulation des flux modifie les vitesses et donc les choix modaux. Une attractivité plus faible ou encore une voirie plus adaptée peut à son tour modifier l'effet induit ce qui implique une moindre congestion. Cette relation statistique n'est donc pas mécanique.

Prendre un autre périmètre et constater que la relation disparaît ne l'invalide pas, puisqu'il n'est pas forcément pertinent pour évaluer les interactions entre secteurs. Le réseau assure la passation d'une échelle à une autre du territoire. Les interactions issues des déplacements en IDF ne peuvent qu'être envisagées que régionalement afin d'intégrer les flux de déplacement à l'échelle pertinente des réseaux de transport dans le cadre de cette relation. En effet, les périmètres choisis intègrent ou non l'origine et la destination et l'effet de la réception des flux sur le fonctionnement des réseaux et donc l'arbitrage des habitants des secteurs du périmètre envisagé. L'échelle d'analyse doit donc être pertinente, puisque l'analyse quantitative du périmètre le ferme à l'influence des autres zones.

3-5) L'effet du maillage sur la spécialisation du TC

La portée de la VP augmente en milieu fortement dense. La concentration d'activité dans une zone n'empêche pas que des distances de déplacement soit fortes entre les zones justifiant l'usage de la VP en milieu dense et la croissance des portées. En effet, les répartitions d'activité dans les zones denses peuvent augmenter les portées. Pourtant la voiture prend des parts modales à la marche ce qui n'est pas le cas du TC dans la mobilité interne. Une différence existe donc entre les modes motorisés due à la spécialisation ou non des modes. (Cf Graphique 108).

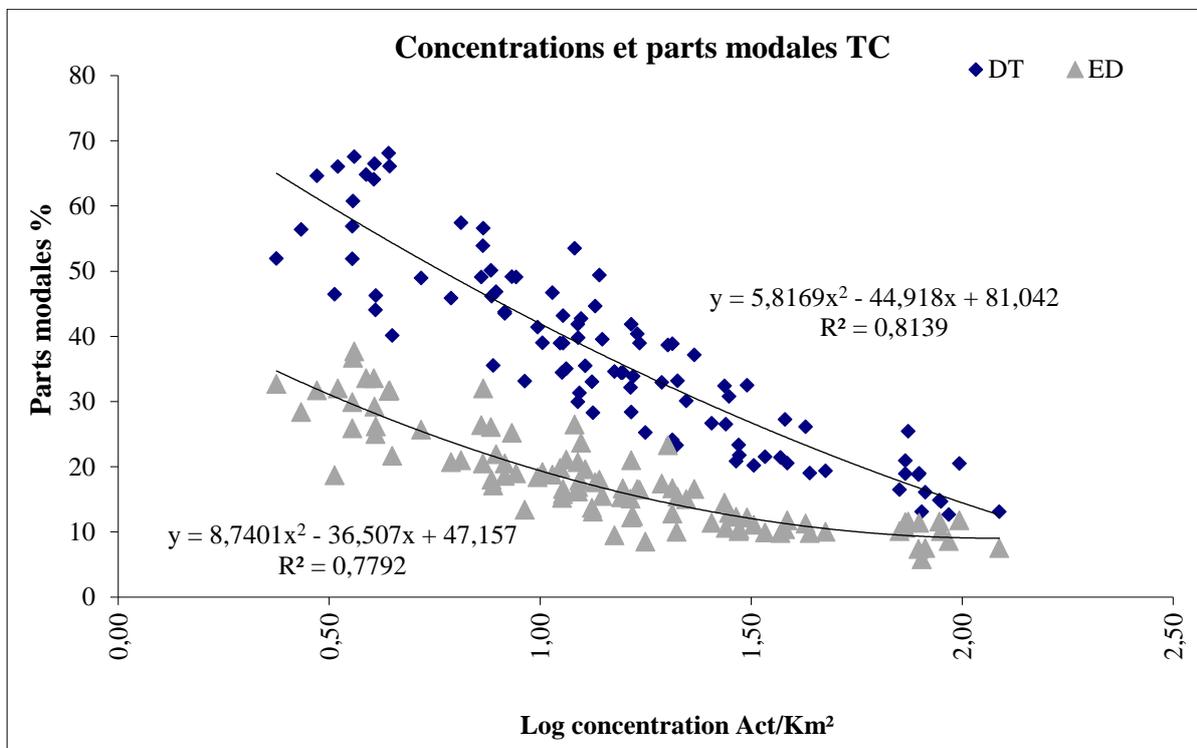
Graphique 108 : distance moyenne entre activité et parts modales mobilité interne



Source calcul de l'auteur.

La première partie montre la spécialisation du TC dans le motif domicile travail (DT). La courbe pour l'ensemble des déplacements (ED) diverge de celle du motif DT. Elles se rejoignent dans les zones de faible concentration. (Cf Graphique 109).

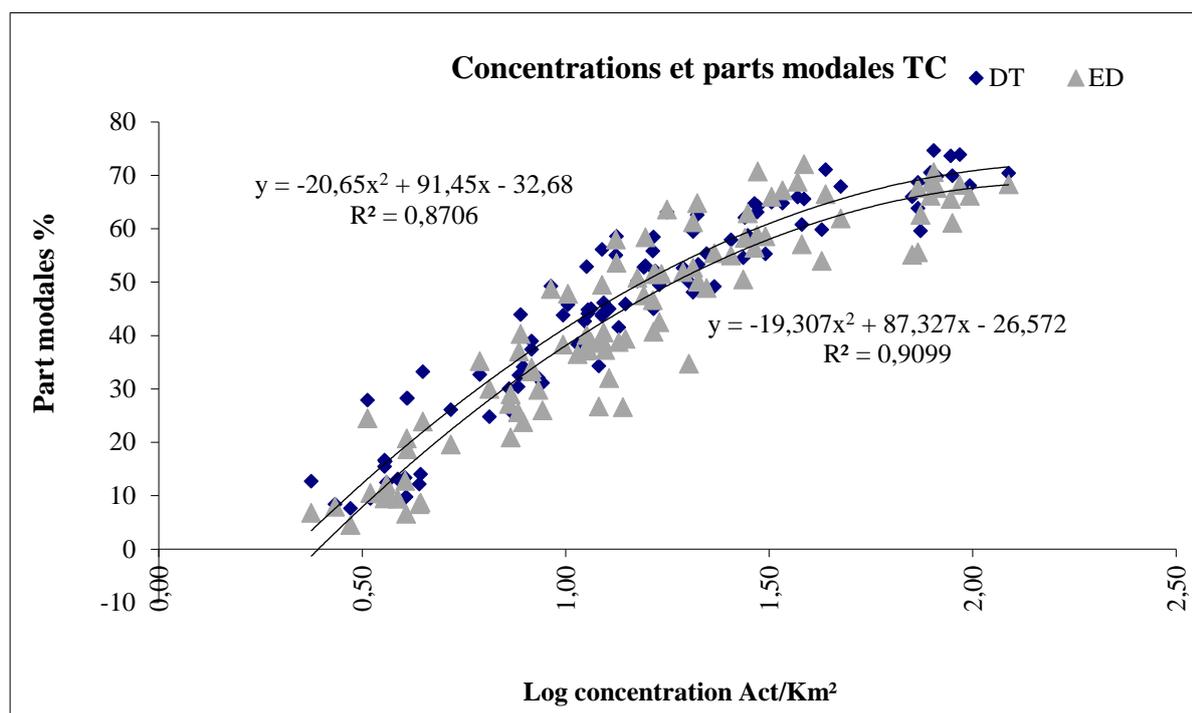
Graphique 109: concentration d'activité et motifs de déplacement TC



Source calcul de l'auteur.

Les relations sont similaires pour la VP contrairement au TC (Cf Graphique 110).

Graphique 110: part modale de la voiture et concentration d'activité.



Source : calcul de l'auteur

La VP n'est pas spécialisé par motif de déplacement contrairement au TC. La conséquence de cette non-spécialisation est que la VP se substitue à la MAP parce qu'elle s'adapte mieux à des contraintes spécifiques de l'individu dans l'usage de la marche (difficultés de déplacement...) ou liés à des motifs de déplacement, le transport des marchandises pour des achats, voire aux interactions entre territoire et réseaux (parking). Elle peut se substituer indépendamment des concentrations ce qui explique la plus faible relation du couple MAP -VP ($R = 0,61$) vis-à-vis des concentrations. Néanmoins, cette adaptabilité véhiculaire explique en partie la différence dans la compétition qui oppose la marche aux autres motifs de déplacements.

En effet, si les parts du TC sont plus importantes dans le déplacement domicile travail (+50% des parts en moyenne) que dans les autres, elles restent importantes dans l'ensemble des motifs de déplacement à Paris et en première couronne même les jours non ouvrables (Cf Tableau 186).

Tableau 186 : parts modales des résidents des TC 2010 non JO.			
	Jours	SAM	DIM
Paris		0,26	0,21
Cœur d'agglomération		0,22	0,13
Agglomération centrale		0,08	0,07
Autre territoire		0,04	0,04

Source EGT 2010

A la RATP, la longueur du réseau métro est de 200 Km celui du RER 115Km. Or le déplacement en RER est plus long qu'en métro malgré une longueur moins importante.

Aussi le RER offre une direction, sur sa longueur, le métro offre de nombreuses directions sur la sienne. En effet, le réseau RER est moins maillé que le métro. La portée dépend donc de la morphologie du réseau en termes de distance ou de direction. Or le réseau RER est plus spécialisé que le métro sur le motif domicile travail. Ce constat s'étend au réseau d'autobus qui est le plus maillé de tous et le moins spécialisé (EGT, 2010). Le maillage multiplie les directions des déplacements ce qui le déspecialise. La spécialisation par motif provient donc aussi de la configuration des réseaux vis-à-vis des activités. Cela explique la différence constatée vis-à-vis de la mobilité interne dans la relation directe à la concentration d'activité. Cela explique aussi le coefficient positif du couple MAP-TC dans la relation aux parts modales de la MAP. En effet, dans le milieu concentré, la part du TC croît dans la mobilité d'échange en même temps que celui de la MAP. C'est donc bien un effet du maillage que nous constatons avec le coefficient positif. Entre 1975 et 2008, sauf à Paris, les parts de la VP augmentent avec une légère baisse dans la dernière période. Les parts du TC stagnent avec une légère hausse à Paris dans le déplacement domicile travail (+50% des parts en moyenne) mais aussi dans l'ensemble des motifs de déplacement (Cf Tableau 187).

Tableau 187 : différence de part modale VP-TC					
Années	1975	1983	1991	2001	2008
Paris	-0,11	-0,1	-0,11	-0,14	-0,23
1 ^{ère} couronne	0,12	0,17	0,2	0,21	0,11
2 ^{ème} couronne	0,29	0,35	0,43	0,45	0,42
Ensemble	0,13	0,18	0,23	0,25	0,18

Source : calcul de l'auteur + EGT 2010

Or les différences des vitesses des déplacements des TC et VP sont similaires sur la période (Cf Tableau 188)

Tableau 188 : vitesse des modes Paris Km/h					
Années	1975	1983	1991	2001	2008
TC	10,53	11,44	11,61	11,60	11,25
VP	15,43	16,00	15,82	17,45	16,17
Différence	4,90	4,56	4,21	5,85	4,92

Source : calcul de l'auteur + EGT 2010

L'adéquation de la morphologie du réseau TC aux origines destination, c'est-à-dire aux portées des déplacements, s'est donc dégradée. En effet, le réseau ferré qui concentre la part principale de trafic est radioconcentrique. Avec le maillage des réseaux routiers, la VP est plus adaptée aux modifications des localisations des activités et des résidences ce qui justifie l'effet rebond. Localement, avec la concentration d'activité le maillage du réseau est plus important rendant le TC plus efficace ce qui justifie la « déspecialisation » du réseau métro.

4) Conclusion : la relation concentration d'activité choix modal comme interaction spatiale-réculaire.

Le fonctionnement des modèles 4 étapes implique la génération, la distribution le choix modal. Il existe plusieurs types d'approches du choix modal, celle du modèle GLOBAL est mobilisée du fait de nos travaux qui renvoie aux déplacements. Le choix modal dans ce modèle renvoie alors à une différence de coûts généralisés spécifique pour un déplacement dans un cadre statistique dit « qualitatif ». Les coûts généralisés sont l'addition des coûts reflétant deux éléments disjoints issus de la théorie du consommateur le prix et le temps de consommation qui devient un coût supplémentaire. Pour le premier, il existe une disjonction selon les modes. Pour la VP des coûts sont ressentis ou non. Dans l'usage, les coûts ressentis sont les coûts du carburant et du stationnement. Pour les TC les coûts sont ressentis, même s'ils ne reflètent pas le coût réel de fonctionnement. Les prix du temps renvoient à une valeur du temps que les salaires caractérisent de manière normalisée. Le temps de transport est alors la variable de quantité de temps qui y est associée. Elle varie selon des coefficients de confort qui expriment le ressenti des voyageurs. Les coûts du temps sont le produit des prix par les quantités. Dans les couts généralisés, les coûts du temps sont alors déterminants dans leur proportion aux coûts d'usage.

Nous les calculons par secteurs EGT dans un cadre quantitatif à partir de données issues de diverses institutions. Nous vérifions la proportion des coûts d'usages et des coûts du temps avant de vérifier l'existence de la relation entre parts modales et différence de coûts généralisés sur les secteurs EGT. Néanmoins, il n'existe pour les modes motorisés qu'un couple significatif alors que les deux le sont pour la MAP. Pour cette dernière, il existe alors un coefficient positif vis-à-vis du TC qui interroge et peut renvoyer à un effet spatial.

Nous mettons en relation les densités et les différences de coûts généralisés. La différence de temps entre les modes est en relation avec les densités. Néanmoins, la densité ne renvoie qu'à la marge à un motif de déplacement. De même, comment l'espace peut modifier des temps ? Nous établissons la relation entre densité brute et d'emploi au LT en IDF que nous déclinons en concentrations d'activités. Les relations concentration d'activité et efficacités sont similaires à celles de la densité justifiant la relation puisque l'activité justifie le motif de déplacement. Aussi, il n'existe pas de seuil de densité d'habitants pour les modes parce que l'arbitrage à l'origine est déterminé par la destination. Nous déclinons les différences de temps qui sont des facteurs réculaires du déplacement (portée et vitesse). Deux effets direct et induit de la concentration des activités ressortent. La portée renvoie à la répartition territoriale des activités et la morphologie réculaire. L'effet direct modifie la grandeur des portées ce qui modifie les parts modales du mode non motorisés. La concentration des activités et des habitants réduit les portées, conduisant à vitesse donnée, à une baisse des temps.

Pour l'effet induit, la vitesse renvoie au fonctionnement réculaire. Or, la croissance des flux la modifie expliquant la variation des parts modales à Paris en JO ou non.

Nous vérifions l'hypothèse que la destination du flux modifie l'arbitrage des habitants du lieu de destination. Or, il y a interdépendance des vitesses. La variation des flux entre les jours ouvrables où non ouvrables pour la VP à Paris modifie les parts modales par la vitesse. Les parts modales du motif domicile travail influencent la circulation et donc les arbitrages des autres motifs. Nous étudions l'effet de la concentration d'activité sur le taux de motorisation. Nous montrons alors une relation entre différence de temps et taux de motorisation. La décision d'investissement dépend aussi de la différence de temps ce qui renvoie au choix modal.

Néanmoins, dans les milieux fortement concentrés, le mode non motorisé se substitue aux modes motorisés ce qui interpelle puisque le TC est aussi favorisé par la concentration. Nous nous intéressons alors aux morphologies des réseaux TC et VP et montrons que le maillage « désécialise » les motifs de déplacement. La forte spécialisation du TC le défavorise dans la mobilité interne et le concentre dans la mobilité d'échange. Aussi la densité peut-elle l'efficacité énergétique des déplacements en IDF au travers des choix modaux ? Non. En effet :

1. Elle ne renvoie qu'à un motif de déplacement marginal « visite à un ami ».
2. Elle est fongible avec les concentrations d'activité qui elles renvoient à des motifs de déplacement liés aux activités.
3. La concentration d'activité se substitue donc à la densité dans la relation entre parts modale et densité.
4. La concentration d'activité comme les densités est en relation avec l'écart de temps ce qui renvoie à une portée sur une vitesse.
5. La portée est modifiée à grande échelle par l'effet de la concentration au travers de leur diminution. Elle conduit à l'usage de la MAP.
6. La vitesse est modifiée à petite échelle par l'effet conjugué de la répartition des activités des et des flux. Cela justifie alors l'investissement dans la VP dans les faibles concentrations puisque la vitesse de la VP augmente vis à vis du TC.
7. Nous reproduisons la disparition de la relation constatée sur les densités selon les échelles. L'effet de la répartition explique que la relation disparaît selon les couronnes puisque les flux ne dépendent pas nécessairement de la couronne en cause même s'ils modifient le fonctionnement des réseaux d'une autre couronne.
8. Le maillage désécialise les motifs de déplacement et augmente donc la part modale.

Aussi la forme urbaine issue des activités *est bien un des facteurs* qui modifie le fonctionnement des réseaux et donc la variation des coûts du temps puisqu'elle se substitue à la densité dans la relation avec les parts modales. L'efficacité énergétique est donc modifiée par le fonctionnement des réseaux piétons et motorisés. Pour ce dernier, il existe une relation « espace-énergie » spécifiée tant sur la morphologie, la portée, que celle du fonctionnement la vitesse. Néanmoins, si les densités ne modifient pas les parts modales à petite échelle, un autre facteur peut modifier à grande échelle les trafics et donc les efficacités énergétiques réticulaires à proximité des stations.

Conclusion section 1 : quel effet de la densification sur le trafic ?

La densité d'habitants reflète une production de l'espace. Dans un marché foncier, la rente d'enchère détermine alors les localisations selon les coûts de transport et des aménités. Les forces d'attraction et de dispersion expliquent la densité d'activité. L'intervention publique peut se substituer à ce marché et déterminer des zones développement. Cette production de l'espace conduit alors pour les activités et les habitants à densifier le territoire. L'indicateur densité comprend plusieurs contenus et contenants ce qui en modifie les mesures et la signification. La densité brute reflète une concentration des habitants répartie uniformément dans une surface. Elle se différencie de la forme urbaine plus complexe à appréhender. Nous classons deux types de démarche dans la qualification. Une démarche statique avec le sol comme base de travail. Nous y retrouvons les modèles issus des densités renvoyant à leur répartition. Une seconde, dynamique, renvoie aux flux et à leur polarisation, ce qui conduit à classer 4 types de forme urbaine.

La relation densité et efficacité énergétique est incertaine. Elle dépendrait d'une forme spécifique la forme monocentrique et serait sensible aux effets d'échelle. Nous montrons que malgré une modification de la forme urbaine, cette relation se maintient dans les communautés de communes d'Île de France grâce aux parts modales. Nous supposons que la densité modifie les coûts généralisés du déplacement. Nous questionnons la relation entre parts modales et coûts généralisés par un modèle de coût agrégé adapté aux secteurs EGT. Nous montrons :

1. La relation entre concentrations d'activité et densités qui explique l'existence de la relation entre densité et parts modales. Or les activités contrairement aux habitants sont le principal élément causal du déplacement. Il n'existe pas de seuil de densité comme le montre les observations en IDF.
2. L'effet direct et induit des concentrations d'activité sur les variables spatiales des temps de déplacement. Pour l'effet direct la concentration d'activité réduit les distances de déplacement ce favorisant le mode le plus lent (la MAP). Le fait que le TC soit aussi favorisé provient de l'effet induit qui dépend des flux de déplacement dans les réseaux et modifie les vitesses de la VP. Pour une portée donnée, les flux reçus dans la zone de réception modifient les arbitrages de leurs habitants. La variation des flux modifie les arbitrages dans les zones de réception, il existe donc une interdépendance des motifs de déplacement.
3. La variation des facteurs réticulaires du déplacement modifie alors les décisions d'investissement des ménages au travers du taux de motorisation.
4. Les variations de la relation sont dues à l'interdépendance des territoires et des réseaux que reflète la relation. Elle disparaît dans les couronnes du fait de la variation des flux, lorsque l'on modifie les échelles géographiques d'observation. Néanmoins, si la concentration d'activité a des effets direct et induit cela ne signifie pas que mécaniquement son augmentation modifie les variables spatiales de déplacement.

En effet, les emplois (activités) induisent une concentration des flux qui modifie les arbitrages. La quantité d'emploi et les formes du réseaux modifient à leur tour les vitesses en au travers de la quantité de flux et des voiries. Les espaces réticulaires motorisés et aréolaires sont non fongibles parce que les premiers renvoient aux temps alors que les seconds renvoient à l'espace. Le réseau n'est pas une échelle du territoire mais une dimension différente. Une surface ne s'intègre pas dans un trait.

La forme réticulaire influence donc les arbitrages de l'individu rationnel qui évalue son temps sans penser à la concentration d'activité de son lieu de destination. L'influence de l'espace et du réseau, le milieu urbain, est une « main invisible » très visible qui ne s'oppose pas à l'hypothèse de rationalité économique. En effet, l'individu arbitre à l'intérieur d'un milieu urbain donné son temps de transport selon ses contraintes propres. Les espaces réticulaires et aréolaires sont des données avec lesquels il arbitre selon ses capacités individuelles.

De même, la relation « espace-temps » cache au travers des variables du temps une relation « espace énergie » pour les réseaux motorisés, puisque la portée et la vitesse sont deux éléments de consommation d'énergie et donc d'efficacité énergétique. Néanmoins, cette relation « espace-énergie » concerne la concentration d'activité et non la densité. Or si les parts modales ne dépendent pas de la densité, la première partie a montré que, dans les milieux très denses, l'efficacité énergétique réticulaire se modifiait au travers du trafic.

Si les densités brutes ne modifient pas les parts modales, il existe alors une autre variable qui modifie les trafics. Aussi comment la densité les modifie ?

Section 2 : Quel impact d'une densification sur le système de TC ? Réciproquement, quel impact de l'offre TC sur une possible densification, à proximité des stations, efficace énergétiquement ?

Introduction :

Selon les planificateurs des villes nouvelles, la densité justifie l'idée de zone où le TC ne serait pas développé. Historiquement, cette idée se justifie pleinement. En l'absence de mode alternatif, les TC avaient un avantage certain à la densification qui remplit les capacités des véhicules. Aussi, dans les zones non denses la voiture est privilégiée, et dans les zones denses le TC apparaît comme efficace. Néanmoins, la perspective urbanistique actuelle privilégie les réseaux ferrés comme ossature de l'aménagement urbain (DUPUY, 1991). De nombreux auteurs et organismes publics justifient la nécessité de densifier les alentours des réseaux de TC (POUYANNE, 2004). L'approche aréolaire est devenue réticulaire. L'intensification urbaine devient alors la nouvelle stratégie de développement urbain à proximité des réseaux à l'exemple du projet du grand Paris. Néanmoins, l'aménagement interroge ce qui justifie, par ailleurs, l'usage de méthode multicritère pour le déterminer à proximité des gares comme « node place » (LEYSENS, 2011). Les modèles LUTI tentent de modéliser les évolutions des villes, mais ils se basent souvent sur des modèles 4 étapes pour déterminer les évolutions des mobilités. Ils ne disent rien des effets de la modification de l'habitat à proximité des gares. Il apparaît alors un premier point aveugle dans les estimations : l'effet de la densité locale, à proximité des stations, sur les trafics. Or cette proximité conduit à l'accessibilité qui, à grande échelle, réduit le temps d'accès à la station, qui est l'interface du réseau vis-à-vis du territoire. La marche à pied renvoie alors à la proximité et donc au type d'espace susceptible d'être franchi dans une zone à proximité pour un voyage réalisé. A partir de ces éléments, nous pouvons envisager l'effet de la densité sur les entrants des stations et donc le trafic.

Ensuite, il reste à envisager l'effet de l'offre de transport sur la densité ce qui constitue un retournement de perspective. Elle serait un élément favorable à la densification (DREIA, 2011) auprès des gares du réseau ferré. Néanmoins, dans les calculs de saturation, cet aspect n'apparaît pas à grande échelle, alors que le taux de remplissage maximum est atteint. Ensuite, cette offre conduit à une efficacité énergétique qui varie et il apparaît un taux de remplissage minimum dans les modèles qui renvoient à l'égalité des consommations unitaires des modes TC et VP. Aussi, il existe deux limites dans la densification « sobre » énergétiquement à partir d'une offre de TC, les taux de remplissage minimum et maximum. C'est à partir d'une offre que nous définissons alors les seuils de densité selon l'efficacité énergétique. Cet aspect peut s'envisager grâce aux taux de remplissage ;

En effet, cet indicateur combine trafic et offre. A partir d'un trafic théorique, c'est-à-dire un taux de remplissage nous pouvons alors calculer une densité. L'hypothèse que l'efficacité énergétique du mode soit préservée vis-à-vis de la VP, intervient alors comme une variable de contrôle dans ce modèle. Cela nécessite alors d'étudier l'interaction du taux de remplissage et de la consommation spécifique du réseau ferré parisien dans la variation de l'efficacité énergétique TC vis-à-vis de la VP.

1. Chapitre 7 : Les TC comme outil d'aménagement de l'espace : accessibilité et développement territorial au travers de l'offre de transport.
2. Chapitre 8 : Effet des densités d'habitants sur le trafic autour des stations : une étude à Paris.
3. Chapitre 9 : Existe-t-il des limites de densité autour des stations pour lesquelles le TC présente un avantage énergétique par rapport aux autres modes ?

Chapitre 7 : Les TC comme outil d'aménagement de l'espace : accessibilité et développement territorial selon l'offre de transport.

Introduction ;

La densification à proximité des stations du réseau ferré est un des enjeux majeurs de l'aménagement actuel du territoire en IDF. Or notre étude montre que la densification ne change pas significativement les parts modales qui dépendent d'abord des concentrations d'activité à l'échelle régionale en jour ouvrable. Néanmoins, cela ne signifie pas que la densification ne change pas les trafics à « très grande échelle » c'est à dire à proximité des stations. Cette variation scalaire pourrait expliquer que « la densité favorise le transport en commun » (PASSALACQUA, 2011) à « l'échelle réticulaire » tout en étant fautive à l'échelle intercommunale avec les parts modales.

Le TOD (Transit Oriented Development) conceptualise un retournement de perspective urbanistique. Cette approche contrairement à la précédente est, « à grande échelle », autrement dit à proximité des stations. D'une conception qui densifie des territoires en instrumentalisant les réseaux ferrés chargés de les relier, nous passons à un aménagement qui les privilégie, à partir des gares ou des stations. Le projet du grand Paris illustre cette approche en IDF, mais un déséquilibre dans les aménagements apparaît. Aussi des approches, comme « node place », évaluent les potentiels d'intensification des gares, mais elle ne quantifie pas l'effet de la densité sur le trafic. Le point commun du projet est la proximité des aménagements et du réseau. Elle renforce l'accessibilité individuelle à l'émission du déplacement. La station est alors le lieu de l'interaction des formes statiques (densités) et dynamiques (usages) à grande échelle. Dans les modes précédents l'accès, la MAP traduit l'effet de la proximité entre l'activité ou l'habitat dans l'usage du réseau. Nous pouvons alors supposer que les entrées en marche en sont l'effet sur le trafic. Ensuite, une relation d'induction semble exister entre offre et trafic ce qui justifie alors l'existence d'une inférence selon laquelle une offre importante favoriserait la densification. Les modèles 4 étapes ne permettent pas cette appréhension à grande échelle à proximité des stations ou des gares du réseau. Néanmoins, cette offre a nécessairement une limite haute que nous traduisons par le taux de remplissage. Elle a aussi une limite basse. Selon les modèles existants, (IMPACT BEED...) il existe un taux minimal de remplissage à ne pas dépasser, afin que, dans des conditions techniques données, l'efficacité énergétique du TC soit plus importante que celle de la VP. Ces modèles intéressent d'abord les réseaux routiers. Pour les réseaux ferrés un point de complexité s'y ajoute, l'existence d'une composition des consommations spécifiques en dehors du véhicule. Trois étapes structurent le chapitre.

La première montre la stratégie TOD, le projet en IDF et sa déclinaison pour envisager une intensification proche des gares en IDF. Elle montre la difficulté qu'il existe de prévoir le potentiel d'intensification à proximité des gares.

La seconde renvoie à une deuxième revue de littérature reliant la proximité à l'accessibilité et au fait que l'effet aréolaire c'est à dire de l'espace de proximité sur le trafic se traduit par la marche dans le mode précédent l'accès aux stations dans le réseau ferré parisien.

La dernière montre l'induction entre densité et offre de transport et ses limites.

1) L'aménagement local comme problème complexe.

1-1) Le TOD.

Le Transit Oriented Development aurait son origine aux USA, il se traduirait par « aménagement en liaison avec le transport en commun » (STRANSKY, 2019). P Calthorpe l'aurait introduit en 1993. Il traduit un aménagement coordonné des transports et de l'aménagement à partir des réseaux de TC. Néanmoins, selon cette définition, on peut aussi considérer que les aménagements de Delouvrier pour les villes nouvelles sont aussi des TOD. Trois dimensions le spécifieraient (CERVERO & KOCKELMAN, 1997) (Cf Figure 43).

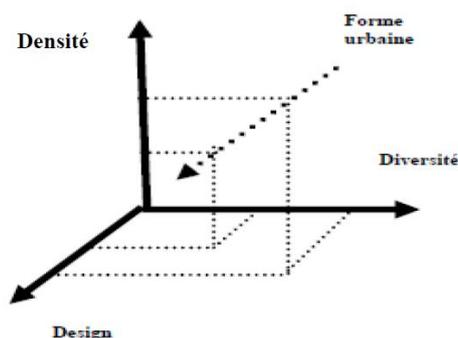


Figure 43: forme urbaine

Source allaire 2007

La densité (« density »), de la population, de ménages, de logements ou d'emploi. La diversité (« diversity »), représente les usages du sol (habitation, emplois, mixité...). Le « désign » renvoie au dessin local de la ville et à la place des réseaux dans le territoire (densité de route...). Il peut traduire des ruptures dans l'agencement avec la forme du réseau de voirie (Coupures etc...). Cette approche est complétée en 2010 par d'autres dimensions (PELE, 2018). L'accessibilité aux destinations est la facilité à se rendre aux différents lieux de destination. La distance aux TC (« distance to transit »), mesure l'accès au réseau de TC. Le management de la demande (« demand management ») plus complexe à estimer. Un autre indicateur serait la démographie qui renvoie à la part des logements. L'intérêt du concept encore flou est qu'il catalyse un ensemble d'actions qui visent à aménager à partir d'infrastructure de transport un aménagement urbain durable. Plusieurs villes appliquant la méthode TOD (Transit Oriented Développement) ont expérimenté, avec des résultats divers, la densification locale (LEYSENS, 2011) auprès des gares ferroviaires.

Avec les interactions des réseaux et des territoires, l'urbanisme intègre les réseaux non plus comme des objets techniques au service de l'architecture spatiale, mais comme des unités de l'aménagement urbain. Il s'agit donc d'un retournement de perspective urbanistique puisque les attendus du SDAU de 1965 assujettissait les réseaux aux aménagements du sol, selon une coordination réseau et transport, tournée vers l'automobile (BONIN & TOMASONI, 2015) dans les milieux non denses. Aujourd'hui l'appropriation de l'espace s'effectuerait avec la mobilité urbaine (CONESA, 2010) et non par l'habitat.

L'interaction des espaces réticulaires et aréolaires est déterminante dans la « ville creuse » (MAUPU, 2006) qui renvoie à une nouvelle utopie urbanistique issue de cette conception. Le réseau devient le squelette de la densification. Le pôle d'échange conjugue l'approche réticulaire et aréolaire. L'interconnexion ne le définit pas (RICHER & PALMIER, 2012) puisqu'elle renvoie à une capacité d'attraction issue d'un regroupement fonctionnel : transport, services et urbain. La fonction transport du pôle relie plusieurs réseaux et vitesses de transport (MENERAULT, 2008). Il regroupe plusieurs échelles de déplacement : échelle internationale avec les pôles aéroportuaires, échelle nationale et régionale avec les gares tout en s'insérant dans le l'espace. Si l'image du nœud suggère l'entrelacement des lignes, le pôle d'échange renvoie à une interaction ville/réseau élément hybride cumulant des fonctions urbaines et transport et de service ce qui fait débat. En effet, l'espace est-il un véritable lieu de transaction ? (MENERAULT, 2008). (Cf Figure 44)

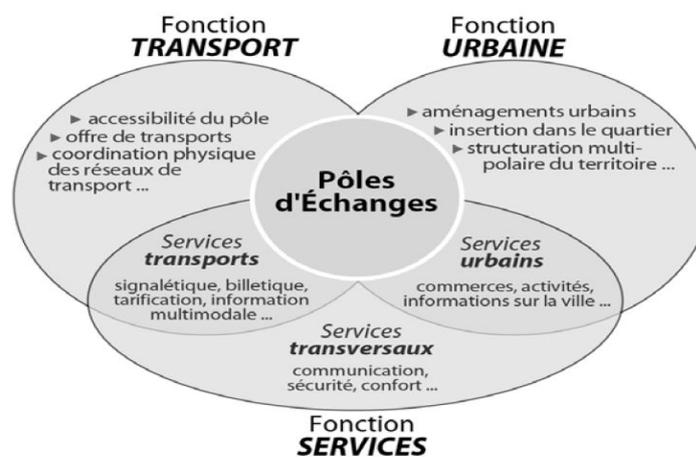


Figure 44 : pôles d'échange.

Source : Menerault

Dans cette hypothèse, le pôle urbain n'est pas « simplement » une gare, un lieu de passage, mais une centralité réticulaire avec une organisation urbaine avec plusieurs échelles d'interaction entre l'espace aréolaire et réticulaire. Trois scénarios « d'urbanisme réticulaire » émergent (BIEBER & al, 1993), (MENERAULT, 2008).

Le scénario saint simonien, qui vise un urbanisme de grands projets à vocation tertiaire soucieux des rentes foncières. Trois plateformes peuvent alors composer le pôle d'échange

- Une à vocation urbaine et régionale. Principalement ferroviaire.
- Une seconde visant une portée nationale et internationale aérienne.
- Une troisième reliant les deux plateformes autoroutières ou ferroviaire.

Le scénario californien privilégie les logiques marchandes et la circulation automobile. Les parcs relais seront donc privilégiés. Situés en amont des points de congestion, ils visent à diminuer les effets de la circulation automobile tout en apportant une clientèle supplémentaire aux transports publics.

Le scénario rhénan repose sur une forte compacité et une mixité du bâti. Il exprime une demande articulée sur la montée des droits (à l'environnement, au transport) et parie sur une alternative à l'automobile. Le maître mot est « mixité fonctionnelle », les diverses activités attachées à la vie urbaine (emploi, vie culturelle et sociale) sont proches. L'attractivité du réseau ferré de TC est basée sur la qualité de service, la fréquence, et le maillage. La voirie est partagée en sa faveur. Une diversité de lieux de taille plus réduite que les pôles d'échanges est privilégiée. La recherche de « multipolarité » l'accompagne. Les pôles d'échange deviennent de véritable « cône de densification ». Elle porte alors le nom « d'intensité urbaine » qui renvoie à des éléments qualitatifs de la densité. Elle mélange plusieurs approches et notions comme la centralité ou la qualité urbaine avec la densité (Cf Figure 45).

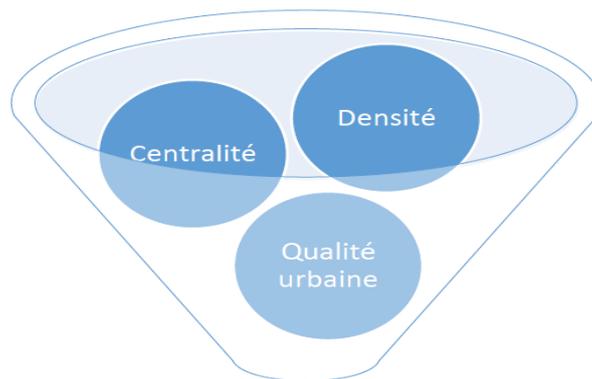


Figure 45 : intensité urbaine.

Source Charneau

Nous retrouvons alors les éléments attachés à cette notion, « mixité sociale et fonctionnelle », densification « non brutale », réalisation d'espaces verts, « polycentrisme en réseau », « micropolarité ».

1-2) Le projet d'aménagement en IDF : un exemple du TOD ?

Le schéma directeur de l'aménagement IDF fait de la coordination des transports et de l'aménagement le levier principal de la future organisation spatiale en IDF (NESSI, 2012). Dans cette perspective, deux types de projet doivent être identifiés :

1. Les projets de prolongement des lignes de transport qui n'appartiennent pas au grand Paris.
2. Les projets qui appartiennent au grand Paris.

Le schéma de transport vise à promouvoir les TC et les moderniser. Plus d'une quarantaine de projet concernant les bus les tramways ou les RER sont programmés pour fin 2025 en date théorique. Une nouvelle organisation territoriale est donc projetée à partir de la construction d'un réseau permettant une densification à proximité des nouvelles dessertes. (Cf Figure 46).

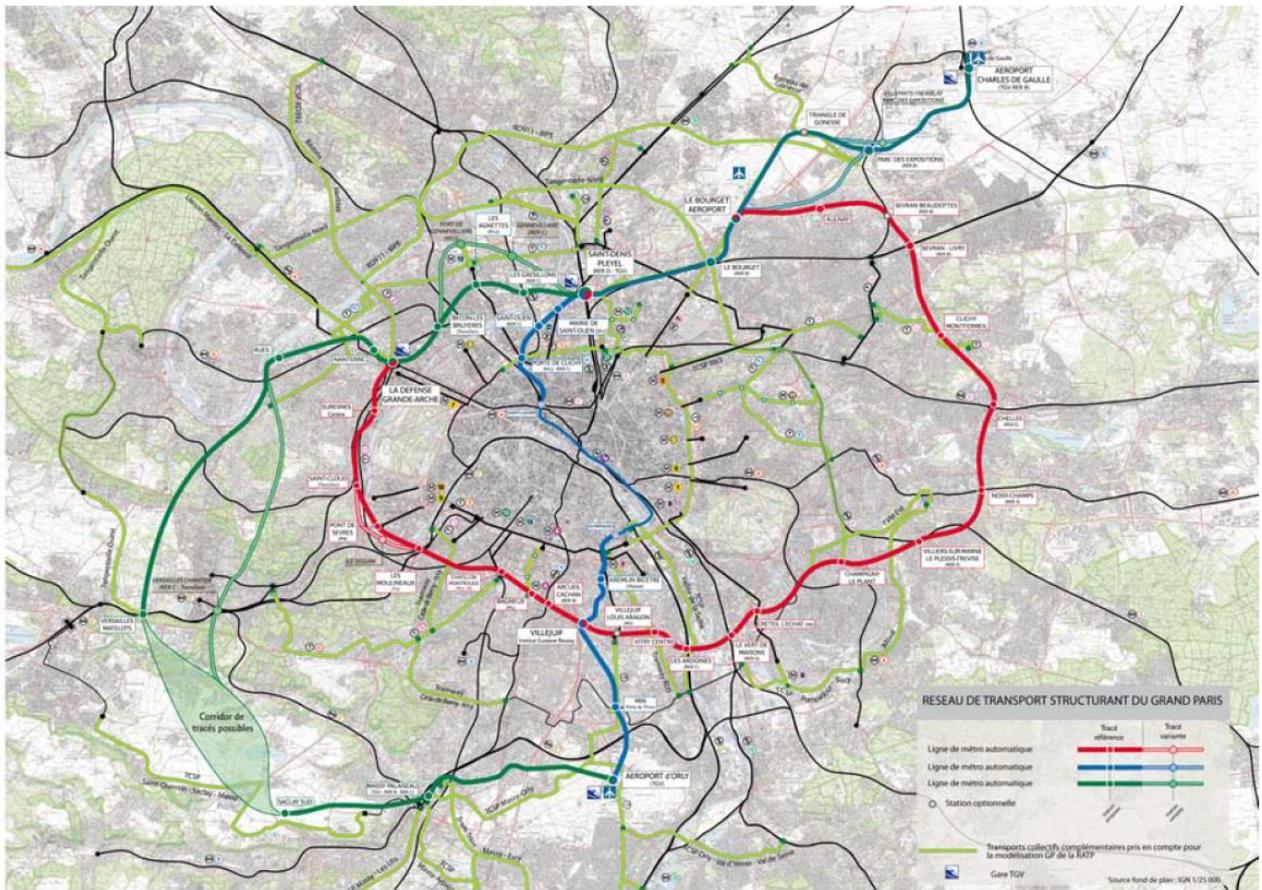


Figure 46 : métro du grand Paris

Source : SGP

Ces projets amplifient le rôle des TC au-delà de la mise en œuvre de nouvelle infrastructure de transports. Les réseaux structurent les territoires dans une approche combinée. L'attractivité du territoire parisien, avec des pôles de compétitivité reliés par un réseau de TC soulageant l'existant, est favorisée. Elle s'accompagne d'un programme de renouvellement et de réhabilitation de l'habitat en couplant activité et habitat : « la mixité fonctionnelle ». Tous les quartiers du Grand Paris Express sont mixtes fonctionnellement à des degrés divers excepté les aéroports et certaines gares comme Chelles. Un certain nombre de logements principalement insalubres et sociaux (APUR, 2017) sont démolis. Des incitations fiscales accompagnent le renouvellement urbain à proximité des nouvelles gares. Néanmoins, la distribution des activités montre un déséquilibre important. De nombreuses activités sont situées à l'ouest de Paris et leur renouvellement amplifie le déséquilibre (SCHORUNG, 2021) tant du point de vue des quantités que du type d'activité puisqu'un déséquilibre existerait entre les activités de bureau et les autres (CCIF, 2015) Leur implantation privilégie l'Ouest et accentue le déséquilibre territorial est ouest. L'ouverture des zones d'activité privilégie les pôles déjà bien pourvus (La Défense gresillon...). Les surfaces d'activités les plus importantes ont été autorisées entre 2000 et 2013 dans les quartiers de gare GPE de La Défense. Aucun plan d'activité à l'est ne semble être envisagé. Les débats du SDAU de 1965 entre ceux favorables à la « centralité tertiarisée » ou à la décentralisation, ressurgissent (STEINBERG, 1981).

De même, la réalisation des projets urbains le long du métro et de la ligne 15 progresse lentement de l'ouest vers l'est (SCHORUNG, 2021). Enfin, en prenant principalement le réseau ferré comme base, le résultat est une densification dépendante de son faible maillage en grande couronne.

Ensuite, la rente foncière fait débat. Si celle-ci ne semble pas augmenter avec l'implantation des gares, un consensus émerge pour dire qu'il faut investir maintenant (APUR, 2017). Or le projet grand Paris de TC sur la petite couronne concerne les milieux denses (6327Hab/Km²). La hausse des prix du foncier (MYSWEETIMMO., 2020) est de 30% en IDF et 36% et 37% à proximité des lignes. Le différentiel dépend des villes (Aulnay sous-bois, la Courneuve) selon leurs caractéristiques. Les chartes promoteurs (ORF, 2014) visaient à limiter son essor, mais elles ne concernent que les logements neufs. L'effet d'une gentrification similaire à celle de Paris (CLERVAL, 2008.) en petite couronne est donc possible. Les objectifs du TOD (mixité sociale redistribution économique...) ne sont pas nécessairement remplis (Cf figure 47).

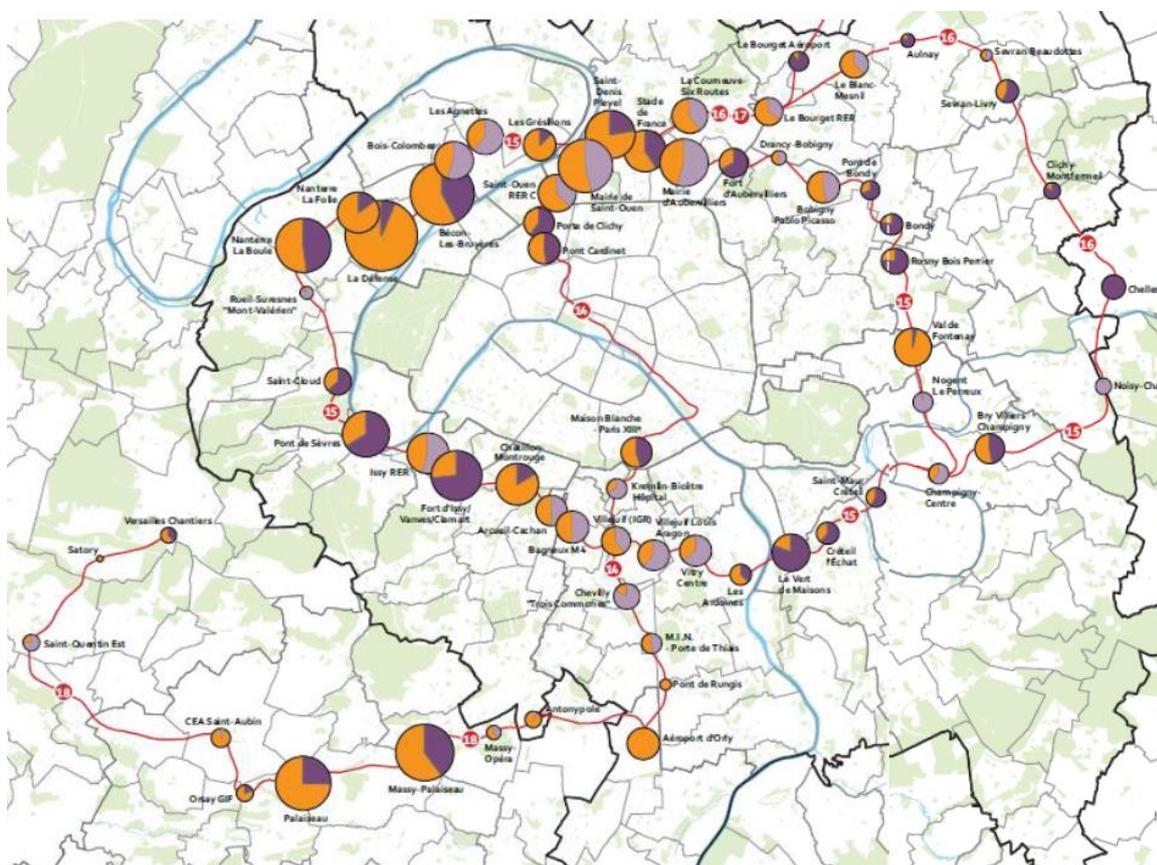


Figure 47 : parts d'activité et de résidence dans les gares du grand Paris

Source : APUR

Ce déséquilibre justifie alors d'envisager des potentiels d'aménagement différenciés selon les gares.

1-3) La méthode node place.

Plusieurs approches multivariées existent pour déterminer les différentes configurations des gares favorables à la densification (CASET, 2019). Nous nous concentrons sur la notion node-place utilisée en IDF. Elle est conçue comme un "potentiel humain d'interaction physique" (BERTOLINI, 1999). Trois situations se distinguent dependency, accessibility, stress.

Elle a inspiré les dimensions de la forme urbaine (CASET, 2019) Au sommet de la ligne se trouvent les zones « stressées », où l'intensité et la diversité des flux de transport et des activités urbaines sont maximales. (Cf Figure 48)

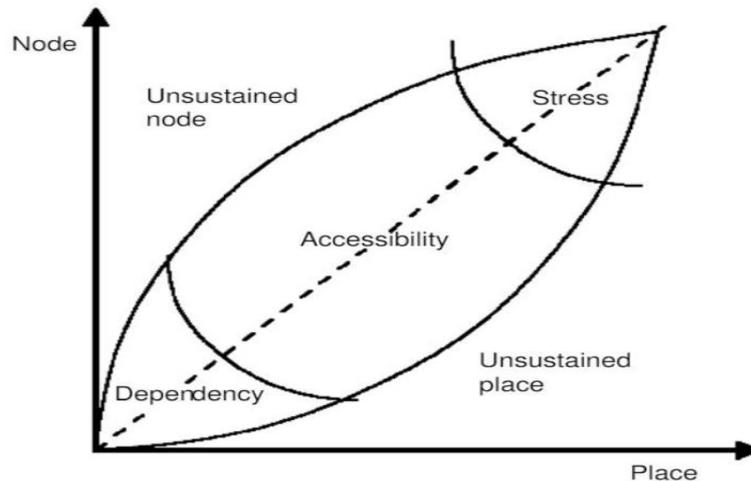


Figure 48: la méthode node-place.

Source : Bertolini

Cela indique que le potentiel d'interaction humaine physique est le plus élevé (nœud fort) et que cela a été réalisé (endroit fort). Cependant, ce sont également des endroits où les grandes concentrations de flux et d'activités signifient qu'il y a une chance tout aussi grande de conflits entre les revendications multiples sur un espace limité. Au bas de la ligne du milieu se trouve une deuxième situation idéale typique, représentée par les zones « dépendantes ». La lutte pour l'espace est ici minimale, mais la demande de services de transport des résidents de la région, les travailleurs et les autres utilisateurs et la demande d'activités urbaines de la part des voyageurs sont si faibles que l'offre ne peut être maintenue que par l'intervention de facteurs autres que l'accessibilité. Enfin, deux situations « déséquilibrées » peuvent être identifiées. D'un côté, en haut à gauche du diagramme, il y a les nœuds « non souillés », des zones où les installations de transport sont relativement plus développées que les activités urbaines. De l'autre côté, en bas à droite du diagramme, il y a les « nœuds souillés », où l'inverse est vrai. La conséquence est que les nœuds du haut peuvent faire l'objet d'une intensification urbaine plus prononcée que ceux du bas. La notation node place renvoie à 2 éléments l'activité du réseau et la configuration spatiale locale. Néanmoins, les indicateurs spatiaux ne sont pas nécessairement les mêmes ce qui est moins le cas de l'approche par nœuds où la mesure de l'accessibilité est majoritairement retenue. Une des représentations de la méthode node place, le Butterfly model (CASET, 2019) décline les indicateurs du TOD. De trois axes initiaux désign, densité diversité nous passons à six.

La dimension Active travel La dimension des déplacements actifs mesure l'accessibilité à la gare pour les modes de déplacement « actifs » (ici, nous incluons la marche et le vélo).

La dimension public transport renvoie au service par le transporteur mais aussi dans le cadre de la région étudiée aux nœuds centraux.

1. Les rabattements en voiture (car).
2. La mixité locale.
3. La densité d'habitant et d'activité classés suivant plusieurs types d'emploi.

La dimension car comprend la capacité d'usage de la VP à proximité de la gare (Parking réseau de route...) (Cf Figure 49)

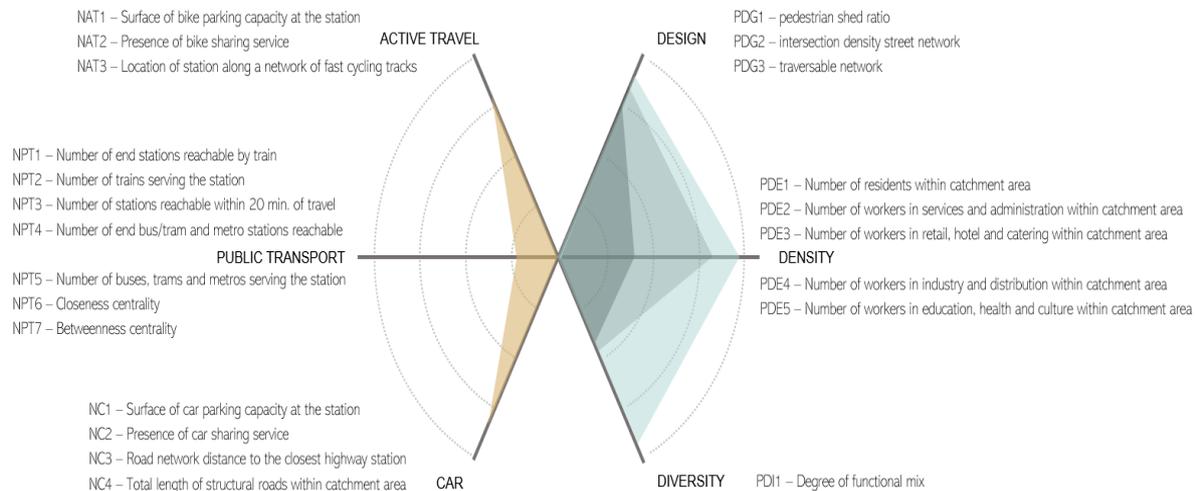


Figure 49 : la méthode butterfly

Source : Caset

Aux dimensions du sol, s'ajoute donc celle du réseau des modes. L'interaction des deux dimensions réseau et territoire s'effectue localement, c'est-à-dire à grande échelle, pour classer favorablement ou non un secteur de gare à densifier. Cette approche présente des difficultés dans l'interprétation des résultats puisque « la cohésion du nœuds et du lieu est plutôt modéré » (CASET, 2019) ce qui implique alors de rechercher des critères distinctifs à partir des certaines variables Avec le TOD, il n'existe donc pas de stratégie commune d'aménagement du territoire autour des différentes stations RER (...) les parties prenantes ne sont pas très pressées de résoudre ces problèmes en prenant des décisions difficiles dès maintenant. Ils préfèrent passer le seau à la prochaine génération de décideurs car les travaux seront réalisés vers 2030 » (CASET, 2019).

Une étude sur la région IDF constate les mêmes problèmes (IAU, 2017) de mesure. Cette étude portait sur l'ensemble des gares de la région IDF afin d'examiner leur potentiel de densification (intensification) à proximité des gares des TC en mode ferré. Les chutes d'intensité se détectent en s'éloignant de la gare et certaines sont sous employés par exemple le nœud de transport de Juvisy. Néanmoins, selon l'auteur la variation de la forme urbaine de proximité d'espaces verts fait varier le classement de la gare qui peut alors passer d'un équilibre fort à un équilibre modéré ou renvoyer à l'extérieur de la zone. Des analyses de terrains évaluant au cas par cas doivent compléter l'analyse globale (Cf Figure 50).

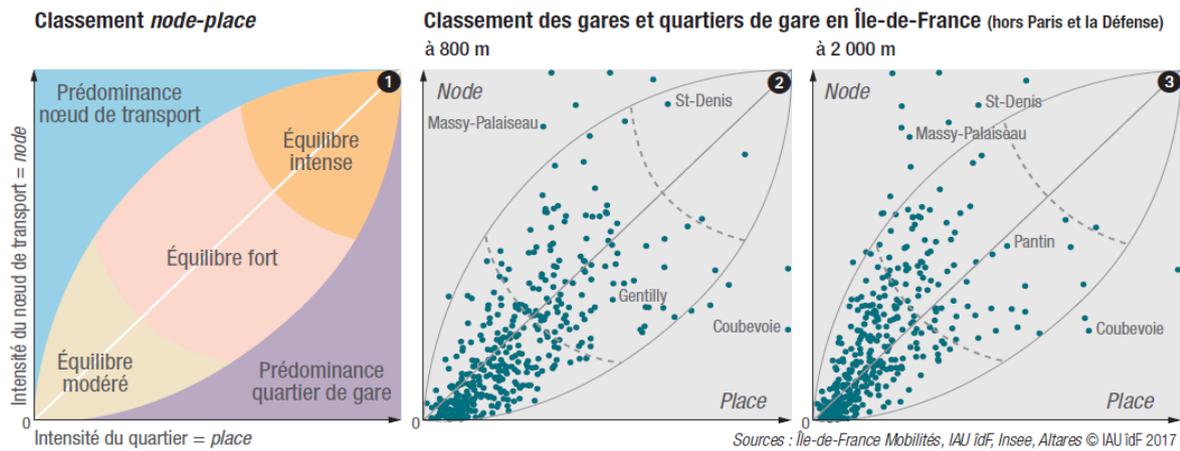


Figure 50 : classement node-place

Source IAU

Cette difficulté est inhérente à une forte confusion issue de la mauvaise spécification des relations entre l'espace réticulaire et aréolaire. En effet, les effets des densités sur les déplacements ne sont pas similaires. Si la densité d'activité modifie les parts modales ce n'est pas le cas des densités brutes. De même, nous ne connaissons pas l'effet de la densité sur le trafic et donc l'offre de transport puisqu'elle s'ajuste comme le montre l'évolution du trafic et de l'offre sur longue période de la RATP exposé en partie 1. Une interaction entre les variables existe, même s'il peut exister un poids dans les indicateurs, ils ne suffisent pas à classer les gares puisque le fonctionnement du réseau vis à vis du territoire n'est pas clairement spécifiée. La notion d'intensification est donc floue (CHARMEAU, 2015). Cette difficulté théorique renforce alors sans doute les possibilités d'inadéquation entre les objectifs projetés et les réalisations que nous constatons.

En effet, les dimensions du sol c'est-à-dire la réserve foncière, sont à l'origine de cet outil (place). Mais elles sont imprécises puisque l'on mélange des activités et des habitants alors que leurs effets sur les trafics sont différenciés. Une concentration d'activité sera un des facteurs qui modifiera la part modale d'un autre territoire. Une densité ne la modifiera pas sauf s'il y a « appariement », c'est à dire proximité des habitants et d'emploi, cet aspect modifie alors la part modale en termes de MAP et non d'usage des TC. Ensuite, cette méthode statique ne quantifie pas l'effet de la densification sur le trafic à proximité de la gare. Elle ne le fait qu'au travers de l'accessibilité qui serait alors un facteur favorable à l'équilibre. Elle ne désigne pas non plus en quoi la quantité d'offre de transport public serait un facteur favorable à l'aménagement à proximité des gares.

Néanmoins, elle montre que la disponibilité foncière « place » n'est qu'un des facteurs de la densification. L'usage des constructions dépend en partie des capacités à utiliser un mode transport et en particulier le TC à proximité ce qui d'une part renvoie à l'accessibilité au réseau et d'autre part à l'offre de transport vis à vis de la densification. Nous exposons donc ces deux éléments.

2) La marche à pied comme marque de la proximité spatiale à l'échelle réticulaire

2-1) La proximité du réseau comme point de convergence des projets d'aménagement en IDF.

Pour un ensemble d'auteurs, la proximité rend compte d'une échelle d'éloignement/rapprochement entre deux acteurs, selon différentes natures (PRALY & al, 2009). La distance n'est pas seulement métrique, mais aussi culturelle, cognitive, etc. Une typologie des proximités est élaborée. De manière consensuelle, une distinction est faite entre, d'une part, la « proximité géographique », et d'autre part, la « proximité organisée ». La « proximité géographique », encore appelée « proximité spatiale » ou « physique » correspond à la séparation dans l'espace entre deux personnes. Elle peut donc se traduire en distance métrique ou horaire, et tient compte des spécificités des terrains sur lesquels elle s'applique. La « proximité organisée » est la distance relationnelle entre deux personnes en termes de potentiel de coordination. C'est « la capacité qu'offre une organisation de faire interagir ses membres » (RALLET & TORRE, 2004).

Un des objectifs de l'intensification est de permettre un accroissement des trafics en IDF voire un changement de mode en faveur du TC. D'ici 2030, 90% des 13,5 millions de Franciliens habiteront dans un rayon de 2 km autour d'une gare (CCIF, 2015). Les gares des futures lignes (prolongement métro, grand Paris express) sont les points de densification de construction de logements (70 000, 2/3 dans l'agglomération parisienne). Aussi « la stratégie Newman » de densification (DUPUY, 2002) est effectuée à proximité de service de transport et d'équipement de qualité. Un périmètre d'environ 800 mètres serait préférable selon plusieurs études internationales (HOSTIS, 2016) dans cette conception de la coordination entre TC et de localisation des habitats et des activités. La densification en IDF renverrait à un périmètre de rayon de l'ordre de 1000 m autour d'une gare ferroviaire ou d'une station de métro, existante ou à venir, et de 500 m autour d'une station de TC en site propre existant ou à venir (DREIA, 2011). Un périmètre de 700 mètres constituerait le périmètre d'analyse de la méthode node place (LEYSENS, 2011). Cette faible surface réduit les portées d'accès aux stations. Aussi la proximité envisagée est une proximité spatiale entre l'habitat et l'accès au réseau soit à une « accessibilité locale et aréolaire » puisque nous sommes à grande échelle.

2-2) L'accessibilité.

L'accessibilité est l'accès *potentiel* à un ensemble d'opportunité depuis un lieu donné (MERCIER, 2008). Elle désigne une *mobilité potentielle* (RICHER & PALMIER, 2012). Elle prend plusieurs échelles (Régionales, locales...), elle renvoie à la séparation des activités humaines, à la capacité du système de transport à les relier (GEUR & WEE, 2004) et donc de l'aptitude d'un usager à utiliser le transport (BANOS & THEVENIN, 2010). L'accessibilité (MILLION, 2015) peut être étudiée sous de nombreuses modalités (distance, temps coûts généralisé...), elle peut donc être dynamique et renvoyer à la vitesse (DELAUNAY, 2019). Ainsi, l'approche gravitaire est un indicateur d'accessibilité (GLEYZE, 2001).

L'accessibilité, peut se décliner dans les graphes selon les coûts généralisés (GLEYZE, 2001). Elle se décline aussi avec des isochrones avec plusieurs types de zones (Cf Figure).

1. Une zone de 300 mètres autour de la gare, échelle de la contiguïté (parvis), repère ses activités, la perception de « sortie de gare », ses fonctionnalités avec son infrastructure.
2. Une zone parcourue à pied de 15 minutes, l'échelle de la proximité (« quartier »), de la gare différente de celle du (ou des) commune(s) qu'elle intègre ;
3. Une aire d'attraction 15 minutes en autobus soit 2.5 KM, l'échelle du réseau de proximité, des synergies sont observées et/ou encouragées entre pôles.

Nous passons alors à grande échelle du temps à l'espace-temps. Les figures révèlent l'écart entre le périmètre théorique ($r=1000m$ pour une surface approximative de 314 hectares) et réel (5mn à pied) différents pour chacun des pôles. La présence de coupures, consommatrices d'espace, pénalise son accessibilité. Sa zone d'influence peut être optimisée avec le réseau viaire en termes d'accessibilité en MAP ou d'autres modes (vélo) (Cf Figure 51)

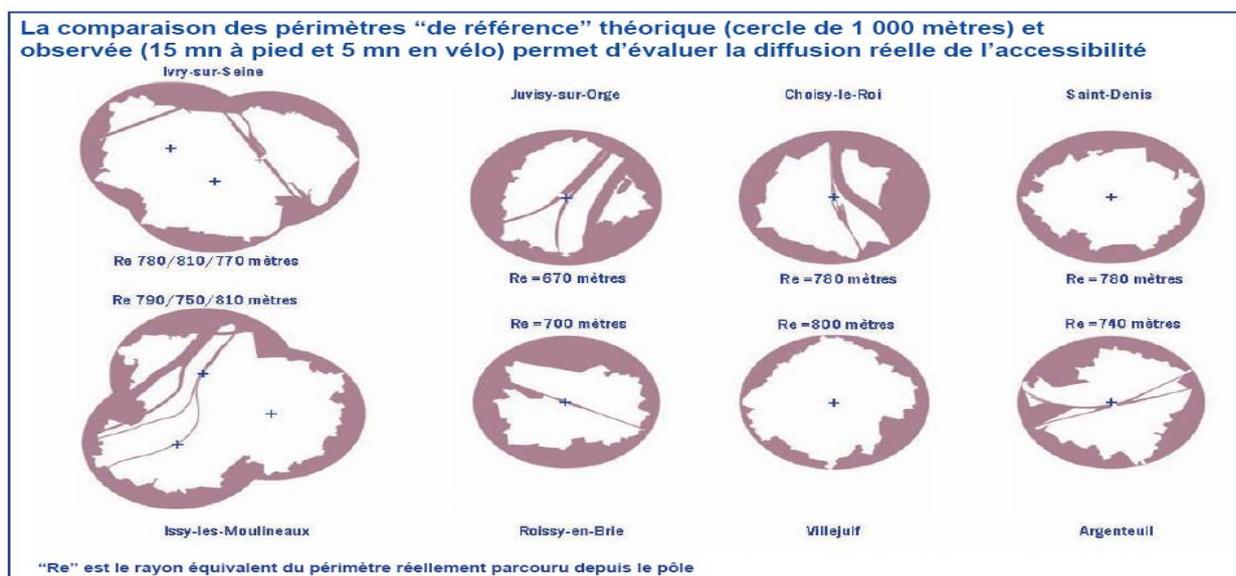


Figure 51: rayon d'accès observé.

Source DREIA

Néanmoins ces évaluations n'intègrent pas l'offre de transport.

2-3) Accessibilité et chaîne de déplacement.

2-3-1) Les échelles de la chaîne du déplacement.

La chaîne du déplacement comporte trois étapes (MILLION, 2015). (Cf Figure) :

1. Etape 1 L'émission du déplacement est la transition du domicile au point d'accès au réseau (station, gare, arrêt de bus).
2. Etape 2 le voyage chaîné ou non.
3. Etape 3 La réception du déplacement est la transition entre le point d'arrivée réticulaire et l'accès au lieu de destination. (Cf Figure 52)

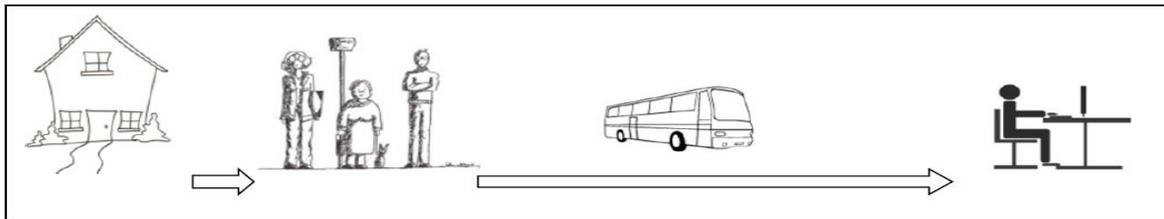


Figure 52 : la chaîne du déplacement TC

Source : Million

Il y a dans cet enchaînement une variation des échelles scalaires. Les étapes 1 et 3 renvoient aux accès aux espaces réticulaires à **grande échelle** qui sont les parcours en dehors du réseau de TC. L'étape deux renvoyant à une petite échelle. La chaîne de déplacement représente l'interaction de la grande et petite échelle. La petite étant l'autobus, la grande la maison et le bureau. Elle renvoie alors à des temps (Cf Equation 137).

$$T_d = T_e + T_v + T_r \quad (137)$$

T_d = temps du déplacement T_e = temps de l'émission T_v = temps du voyage T_r = temps de la réception. Le temps de déplacement à l'émission (T_e) ou à la réception (T_r) dépend de la proximité spatiale existante entre le réseau et l'habitat ou entre le réseau et l'activité. L'approche multicritère (« EDF » Equivalent Doorstep Frequency, fréquence équivalente à la porte) chiffre les transitions à l'émission ou la réception (RICHER & PALMIER, 2012) grâce aux temps à grande échelle. Pour le transporteur l'intervalle modifie l'offre, pour l'individu il modifie son temps. La MAP du point d'intérêt à la station de TC est le mode de la séquence à l'émission du déplacement. Les zones de 300 à 620 mètres regroupent des habitats ou des activités La proximité spatiale réduit les temps parcourus en MAP vers les stations. Dans le temps d'émission ou de réception, deux éléments apparaissent (Cf Tableau 189) :

Tableau 189 : approche multicritère d'accessibilité.

Transport collectif et stations de TC (« SAP ») dans les limites de 640 m pour les bus et 960 m pour le ferroviaire autour d'Euratechnologie		(1) Temps de marche du point d'intérêt à la station de TC (distance en mètres)	Fréquence de passage à la station de TC entre 8h15 et 9h15	Temps d'accès total = Temps de marche (1) + temps d'attente moyen (« SWT »)	INDEX D'ACCESSIBILITE (Indice d'équivalence « EDF » avec pondération sur les fréquences)	
Métro ligne 2	Canteleu	6 min 30 (520 m)	41	7 min 58	3,76	TOTAL DE 7,76 (LEVEL 2)
Bus ligne 72	Gallieni	3 min 45 (300 m)	7	10 min 2	2,99	
Bus ligne 73	Quai de l'Ouest	7 min 45 (620 m)	6	14 min 45	1,02	

Source : Richer et Palmier

Le temps lié du « point d'intérêt » à la station et le temps d'accès total qui intègre le temps d'attente moyen. La fréquence indique le nombre de dessertes dans chaque direction ou mission. Le temps d'accès total additionne les temps de marche et d'attente, avec une pondération, comparant les fréquences d'une ligne. Ce point d'intérêt est la destination finale ou initiale. Le point d'accès au réseau est l'interface des espaces aréolaire et réticulaire.

2-3-2) La station ou la gare

2-3-2-1) la station (gare) simple

Dans la théorie des graphes, la station représente un sommet (GLEYZE, 2001). Si elle peut être un espace de service avec les boutiques intégrées, dans le fonctionnement du réseau, la station est le point d'arrêt permettant l'entrée et la sortie des voyageurs et l'accès aux véhicules. Cette station est donc le lieu par lequel le voyageur accède à un véhicule et passe d'un plan spatial à un espace-temps (MARGAIL, 1996). La station est alors l'espace de transition entre l'espace géographique et réticulaire dans l'approche de la mobilité urbaine. Elle est une interface. En tant qu'élément du territoire, la station est le lieu de convergence des personnes ayant choisi le mode. En tant qu'élément du réseau, elle est le point de départ du voyage. Ce rassemblement implique un cheminement local dont le temps est inclus dans le temps du déplacement. Elle suppose alors une capacité d'attraction du mode et donc un choix modal. Sa conception dépend des flux intégrés dans son fonctionnement et des normes de sécurité en vigueur afin de permettre son évacuation. Le dimensionnement des quais est directement en lien avec les flux de la ligne. S'ils ne sont pas absorbés, le temps de stationnement dans les quais et l'accumulation provoque un inconfort et une difficulté dans les gestions des flux à l'entrée de la station. De même, un sous-dimensionnement des quais provoque « des congestions » nuisant aux échanges avec les trains. Ensuite, selon le degré de confort, diverses options de surface peuvent être envisagées pour limiter la densité dans l'occupation des quais. Ces normes de confort classées de A à F (DE TILIERE & VIAUD, 2012) impliquent différents coûts dans la réalisation

2-3-2-2) La station (gare) de correspondance.

Dans le voyage, la correspondance est le changement de direction permis à l'endroit des nœuds des lignes. Le fonctionnement de la station de correspondance est différent de la station simple. Elle regroupe des flux externe et interne.

1. Les flux externes renvoient au déplacement du voyageur entrant ou sortant de la station.
2. Les flux internes renvoient au déplacement du voyageur qui passe d'une ligne à l'autre.

Une partie des flux passant dans cette station ne correspond pas aux flux du territoire. A l'intérieur du nœuds, il existe des entrants, mais aussi des correspondants changeant de ligne. De manière externe, les correspondances multiplient à partir des points d'émission les lieux d'arrivée potentiels. Ce type de station est « une interface duale » dont les flux internes à la station, c'est-à-dire qui ne vont pas vers la sortie, mélangent les résidents et les non-résidents. Les origines du trafic d'une station d'une ligne ne sont pas nécessairement issues de son territoire d'implantation. Il y a donc une indépendance partielle dans l'origine, densité ou réseau, entre les trafics des résidents et des non-résidents.

La méthode des « zooms nodaux » (GLEYZE, 2001) intègre les trafics entrants réels. Les différents flux sont représentés avant d'attribuer des clefs de répartition. (Cf Figure 53)

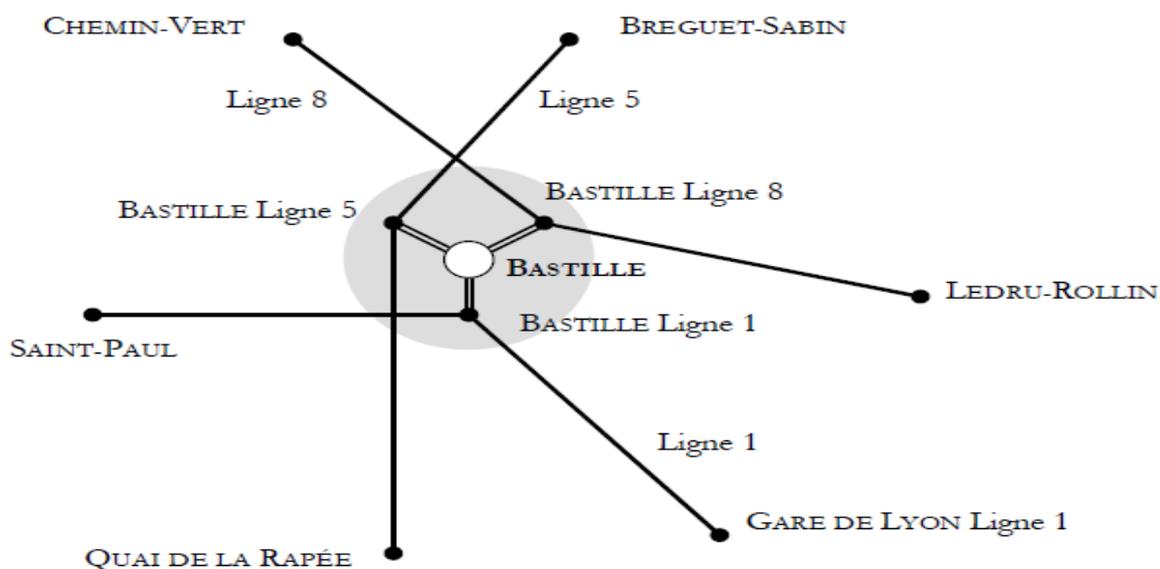


Figure 53 : correspondance Bastille

Source : Gleyze

2-4) La marche à pied comme effet de la proximité dans le réseau

La réduction des portées d'accès au réseau réduit le temps consacré à l'émission tout en permettant l'usage de la MAP. Elle renvoie alors à la « marchabilité » (STRANSKY, 2019). Dans nos données, nous disposons du mode et l'origine spatiale des entrants en termes d'arrondissement pour la journée des stations. C'est l'émission du déplacement pour prendre le transport choisi. (cf Tableau 190).

Mode/origine spatiale des entrants.	PARIS XIII	PARIS XIV	PARIS XV	TOTAL
AUTOBUS – AUTOCAR (TC)	68	63	79	210
VOITURE – TAXIS (VP)	0	90	43	133
MARCHE A PIED (MAP)	0	16955	22	16977
TOTAL	68	17108	144	17320

Source : RATP

Pour les stations de métro, la prééminence de la MAP s'affirme sur la quasi-totalité du réseau à l'exception des gares avec des taux allant de 90% à 100%. Les stations aux portes de la ville de Paris et les gares ont un pourcentage moins élevé que les autres stations dans le nombre d'entrants avec la marche comme mode précédent l'usage. Une différence existe entre les réseaux ferrés. Si l'origine du trafic métro renvoie à la MAP, ce n'est pas le cas du RER interconnecté avec des flux locaux (autobus) ou régionaux (RER SNCF) sur les branches de son réseau. En effet, d'autres modes d'accès existent (autobus etc...) (cf Tableau 191). Néanmoins, la part de MAP dans les stations du RER de Paris (67 à 94%) est pour certaines similaires à celle des stations de métros, et en tout cas bien supérieures à la moyenne des RER.

Tableau 191 : parts des entrants dans les réseaux ferrés.

Part des entrants métros					
Entrants	Marche à pied	S.N.C.F	Autobus	Tramway	Voiture Deux Roues
6h00-21h00	3 590 300	413 600	260 000	21 650	62 900
	83%	9,50%	6%	0,5%	1%
Part des entrants RER					
Entrants	Marche à pied	S.N.C.F	Autobus	Tramway Orlyval	Voiture Deux Roues
6h00-21h00	653 150	302 300	170 850	18 500	52 100
	55%	25%	14%	1,5%	4,5%

Source : auteur

Or les fréquences du réseau sont inchangées, c'est donc l'effet de la proximité spatiale qui modifie le mode précédent l'accès. La MAP est donc « l'effet aréolaire » de la proximité de l'activité ou des habitants et des stations ou des gares. Contrairement à l'accessibilité, qui est un potentiel d'accès à grande échelle que le temps détermine, l'accès est réalisé et la MAP le traduit. Cela est alors parfaitement cohérent avec la démarche et les approches de l'accessibilité potentielle à grande échelle au « point d'intérêt » qui est la station. Néanmoins, ce mode d'accès n'indique rien des effets de la densité locale sur les entrants dans les stations. Elle ne fait qu'indiquer que l'utilisateur utilise la MAP du fait qu'il est à proximité de la station. Dans notre approche, les temps d'émission et de réception n'intègrent pas les temps d'attentes. Il s'agit du temps de marche du point d'intérêt à la station du TC qui est de plusieurs sortes. Il existe donc un effet de la proximité qui est parfaitement identifiable avec la MAP. Néanmoins, celui de l'effet de la densité locale sur la quantité d'entrants et donc le trafic est lui largement ignoré y compris dans les données à notre disposition puisqu'elles ne reflètent que l'usage d'un réseau et les modes d'accès précédent cet usage.

3) La question de l'offre

3-1) Trafic et offre.

3-1-1) Une relation d'induction.

L'effet du trafic sur l'offre est remarquable dans l'évolution qu'a enregistré la RATP ces cinquante dernières années. En effet, le taux d'occupation est resté stable alors que le trafic n'a cessé de croître. Cette stabilité est due aussi aux augmentations d'offre issues du progrès technique, à l'exigence de l'autorité organisatrice, et aux accroissements d'infrastructure. Certains suggèrent une relation d'induction entre l'offre et le trafic. Outre la réalisation des infrastructures, qui aurait des effets positifs sur la croissance du transport, la croissance pour une infrastructure donnée de l'offre conduirait à l'augmentation du trafic (FREBAULT & DALMAIS VAN STRAATEN, 1988) (QUINET, 1995). Son facteur de qualité pourrait être alors déterminé par la capacité à desservir des lieux dans un temps donnée ce qui renvoie à l'accessibilité (GENDRE-GRAND PIERRE, 2006). Il existe donc une induction forte entre offre et trafic, comme le montre les études. Aussi il n'est pas étonnant qu'avec une politique en faveur du TC à proximité des gares, il existe une induction de l'offre à la densification.

3-1-2) Offre et densification locale

Plusieurs facteurs sont mis en évidence (DREIA, 2011). Ils renvoient à l'offre de transport dans la croissance de la densification à proximité des gares nous y retrouvons aussi des éléments du TOD.

1. Le pôle gare permet-il d'atteindre en 30mn un nombre important d'emplois ou à une population importante d'arriver en 30 mn ?
2. L'utilisation des TC pour les navettes domicile/travail dépasse-t-elle celle de la VP ? A plus de 10% le pôle est très attracteur.
3. La gare est-elle un lieu de rabattement ? Plus la gare est desservie et intermodale plus le potentiel de densification est important.
4. La fréquence de desserte de la gare en heure de pointe favorise-t-elle la densification ? Plus la fréquence est élevée plus le potentiel de densification est important.
5. La qualité de service de la desserte en bus en heure de pointe à partir de la gare est-elle favorable à la densification ?
6. Le service de TC en week-end par rapport à la semaine favorise-t-il la densification ? Plus un service est important plus elle est favorable.

Plusieurs éléments renvoyant à nos travaux interagissent dans cette formalisation des facteurs « favorables à la densification ».

La première est une surface d'emploi « située à 30 minutes » autrement dit la jonction d'un pôle attracteur située à plusieurs kilomètres à 6 kilomètres pour une pseudo-vitesse moyenne de 12km/h en termes de déplacement. La densification renforce donc pour une part modale donnée la concentration d'habitants à proximité de la gare.

Le second est la spécialisation du TC. La densification doit être importante si l'effet de la spécialisation du TC l'est. Nous retrouvons un motif, le domicile travail, et le TC, plus compétitif dans la captation des parts modales sur ce motif que la VP. L'idée est alors de renforcer la spécialisation au travers de la densification.

Le troisième renvoie au rabattement, c'est à dire aux capacités réticulaires d'irriguer diverses surfaces en augmentent les vitesses.

Les trois derniers renvoient eux à l'offre de transport. Néanmoins, rien n'indique comment cette offre permet une plus forte densification, ni quelles gares pourraient être plus densifiées que d'autres à proximité. A dire d'expert, elle est différente selon des réseaux de TC (PRUD'HOMME & al, 2000). Au-dessus d'une densité d'activité humaine (DAH) de 300 hab + emploi /hec, le métro ou le RER s'imposent. Entre 120 et 300, le tramway et le métro léger sont des bonnes solutions. L'agence d'urbanisme de Toulouse (AUAT , 2007) évalue entre 56 hab + emploi/hec et 213 hab+ emploi /hec, les DAH pour mettre en œuvre un tramway et entre 133 et 142 hab +emploi/hec pour le métro.

D'après V. Piron, la zone de pertinence des transports lourds souterrains (métro et RER) se trouve entre le centre-ville et la limite DAH=200. Ensuite, les technologies adéquates pertinentes sont celles des bus et des tramways.

En deçà de la limite $DAH=100$, le transport routier doit être privilégié (MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, 1997). Il existe donc selon les modes une variation des densités. Cela renvoie alors à la capacité et donc à l'offre de transport. Dans les valeurs énoncées, ou leurs limites, les contenus ne se recoupent pas. Elle en montre plusieurs. La DAH est un indicateur d'habitats et d'activités. Néanmoins, pour les déplacements domicile travail, les habitants et les emplois renvoient à un lieu d'émission et de réception disjoint ; la DAH mélange les deux. Or c'est la relation entre les densités d'habitat et d'activité qui justifie les déplacements pas leur cumul. La DAH ne semble donc pas appropriée. Ces valeurs ne sont donc pas utilisables dans une approche de la densification à proximité des stations pour la densification locale réticulaire. Il n'existe donc pas d'éléments qui évaluent comment la croissance de l'offre permettrait celle de la densification.

3-2) La question de la saturation

3-2-1) Des modèles de prévision de charges à l'échelle régionale.

Cette partie fait largement référence à l'ouvrage collectif « modéliser la ville sur les modèles d'interaction spatiale » (ANTONIN & al, 2011). Dans cet exposé, seules les principales caractéristiques des modèles utilisés en simulation en première partie nous intéressent, la deuxième les questionne théoriquement renvoyant à des éléments déjà exposés en deuxième partie de notre mémoire. Les modèles représentent de manière simplifiée la réalité afin d'élaborer des concepts voire d'établir des prédictions au travers de simulation. Les approches LUTI (Land Use Transport Interaction) sont issues des USA et visent à modéliser ces interactions dans un environnement complexe. Elles intègrent l'individu avec des approches de la time-géography ou des modèles 4 étapes. Plusieurs types d'approche existent (top down bottom up). Ils visent à prédire le futur des infrastructures de transport et leur utilisation, en lien avec la forme et l'expansion de l'habitat et des activités humaines qui en découlent, et vice-versa ; ils évaluent ces projections au regard des objectifs concrets du développement durable (émissions de polluants, qualité et mixité du voisinage résidentiel, impacts environnementaux, etc.). Plusieurs outils font l'objet de recherche en France. Certains (SIMAURIF, SIMBAD¹) sont en lien avec des outils importés des USA (URBANSIM). Ils sont basés sur une approche cellulaire fixe (SIMAURIF, PLAINSUD) ou multiscalaire (MOBISIM). MOBISIM combine trois types d'approche l'approche multi agent (SMA) de comportement, un modèle 4 étapes (mobilité réticulaire), et une mobilité cellulaire résidentielle, qui combine emplois et résidences (ANTONIN et Al 2011). Le modèle SIMAURIF combine un modèle 4 étapes avec une affectation statique (DAVISUM) des TC et un modèle d'affectation dynamique routière (METROPLIS). Il se combine avec URBANSIM déterminant les mobilités résidentielles, celle des emplois, celle des projets urbains et enfin des prix du foncier.

¹ La signification des acronymes est donnée dans la table des abréviations.

Il a été utilisé en IDF pour évaluer la tangentielle nord. Le modèle SIMBAD combine un modèle 4 étapes, un modèle de fret et, enfin, s'ajuste sur URBANSIM. Le modèle PIRANDELLO se base sur la théorie de l'accessibilité (KOENING, 1974) dans un cadre statique d'équilibre général simplifié pour le rendre compréhensible. Les hypothèses d'emplois de résidence et de circulation des modes sont intégrées. Le projet PLAINSUD questionne à son tour l'accessibilité. Il renvoie aux isochrones d'accès au lieu du réseau avant de s'interroger sur les coûts généralisés du transport et donc aux modèles gravitaires. De fait, il combine un élément local, le déplacement initial entre le lieu du domicile et le réseau de transport, et l'aspect plus général, le déplacement jusqu'au lieu de destination au travers des « masses attractives ».

L'ensemble de ces modèles vérifie la réalité et permettent des simulations selon des scénarios dans le développement d'une ville (BONIN & TOMASONI, 2015). Néanmoins, leur architecture est complexe, gourmande en données. Certains ne s'intéressent qu'aux déplacements contraints. Même si leurs approches initiales sont différentes, les modèles dynamiques utilisent les modèles 4 étapes dans leur itération tel GLOBAL (RATP). Les scénarios socio-économiques précédant la mise œuvre prévoient une croissance de la population dans un certain nombre de zones. Ils impliquent donc une croissance de la densité. Néanmoins, la distribution s'effectue de manière zonale (cellulaire) c'est-à-dire de manière uniforme localement. Ce modèle, est d'abord un modèle d'interaction à petite échelle basé sur la distribution des flux. A grande échelle, cette distribution des flux devient mécaniquement illisible du fait de la réduction des distances entre zones. La sélection des flux, issue de la distance, disparaît ce qui invalide l'usage de ces modèles à grande échelle. Aussi, le modèle ne fait pas de prévisions « au niveau d'une infrastructure donnée » (SGP, 2010) *c'est-à-dire à partir du fonctionnement d'une infrastructure donnée*. Il méconnaît donc totalement les limites à offre donnée de la densification à grande échelle sur le trafic ce qui apparaît totalement cohérent avec la logique interne du modèle.

3-2-2) Offre et saturation : le taux maximum de remplissage.

Le modèle GLOBAL anticipe les charges selon une croissance de la population et des activités dans les zones que les nouvelles infrastructures de transport irriguent (SGP, 2010). Il calcule des trafics qui proviennent de la variation des parts modales et implicitement des augmentations d'activités et d'habitants prévues dans les scénarios impliquant le projet du Grand Paris. (Cf Tableau 192)

Tableau 192 : évolution des emplois et des habitants par pôle

	Emplois 2005	Population 2005	Croissance emplois 2005-2030	Croissance population 2005-2030
Roissy Villepinte Tremblay	167 000	176 000	+160 000	+60 000
Le Bourget/Clichy-Montfermeil	110 000	443 000	+70 000	+170 000
dont secteur Le Bourget	45 000	178 000	+50 000	+85 000
dont secteur Clichy-Montfermeil	65 000	265 000	+20 000	+85 000
Plaine St Denis	285 000	644 000	+150 000	+130 000
La Défense (pôle élargi)	461 000	564 000	+160 000	+120 000
Noisy - cité Descartes	138 000	443 000	+70 000	+80 000
Saclay (pôle élargi)	281 000	429 000	+130 000	+190 000
Vallée des biotechnologies	313 000	727 000	+100 000	+190 000
Orly Rungis	133 000	242 000	+90 000	+75 000
Seine Aval	57 000	147 000	+30 000	+50 000
TOTAL POLE GRAND PARIS	1 945 000	3 815 000	+960 000	+1 065 000
Île-de-France hors pôles	3 417 000	7 620 000	+40 000	+435 000
TOTAL ILE-DE-FRANCE	5 362 000	11 435 000	+1 000 000	+1 500 000

Source : DREIA

Il existe un effet report du réseau existant vers le nouveau réseau diminuant la charge moyenne de certaines lignes telles que la ligne A (-20%) et permettant à l'offre de transport des nouvelles lignes d'être dans « la norme ». La part modale augmenterait de 4 points à l'horizon 2025, si le contrat de plan est respecté avant 2025. Cette croissance ne concerne pas que le Grand Paris, dont l'absence ou la présence modifierait de 0,5 point la part modale des TC en 2025, et de 1 point en 2035.

Il existe donc des interactions entre les projets dans la répartition des trafics et donc des charges moyennes qui se répartiraient grâce au tracé du métro du Grand Paris. Elles éviteraient des tronçons centraux parisiens empruntés aujourd'hui par de nombreux voyageurs. De même, elles impliqueraient une charge supplémentaire sur les bouts de lignes. Le risque de saturation serait faible à « long terme » jusqu'en 2035 sauf sur la ligne 13 et 14 (RATP 2010). Le taux de correspondance du réseau ferré est d'un tiers et n'est pas intégré dans les calculs. Néanmoins ces chiffres sont affectés d'une marge de sécurité de 15% (SGP, 2010), qui peut être, renvoient aux effets croisés des correspondances potentielles entre les deux réseaux. Le déchargement d'une ligne du réseau correspondant au chargement d'une autre. Cette charge est d'abord un flux horaire à l'heure de pointe du matin. (cf Figure 54)

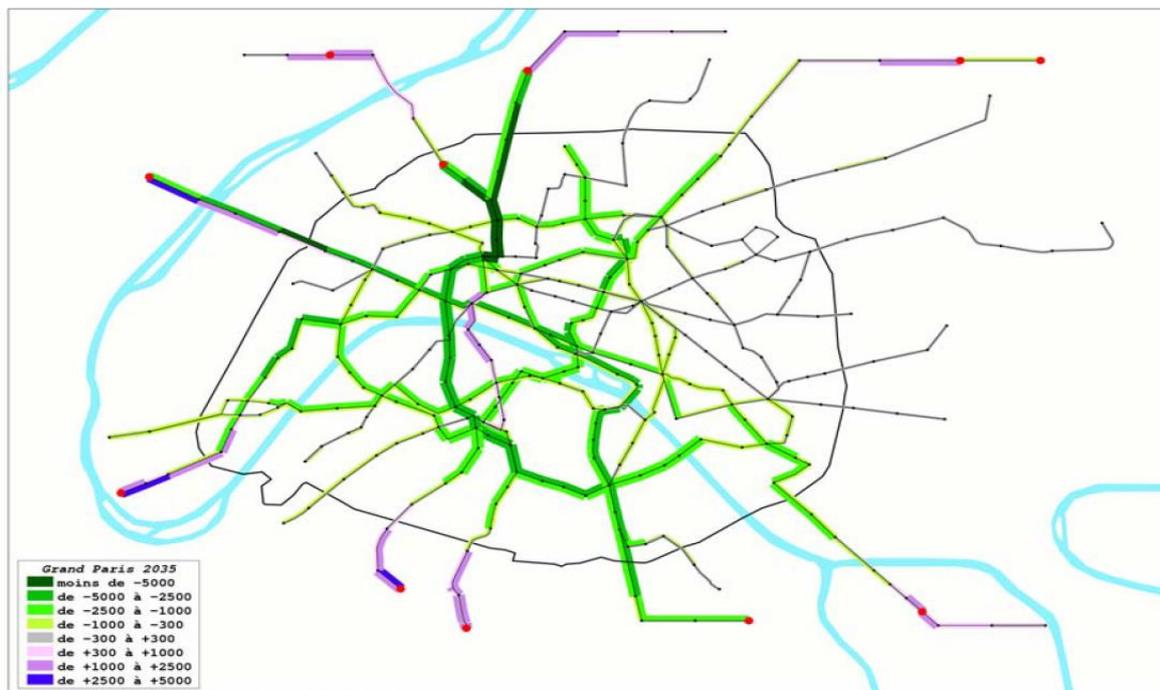


Figure 54: grand Paris et charge voyageur.

Source : DREIA

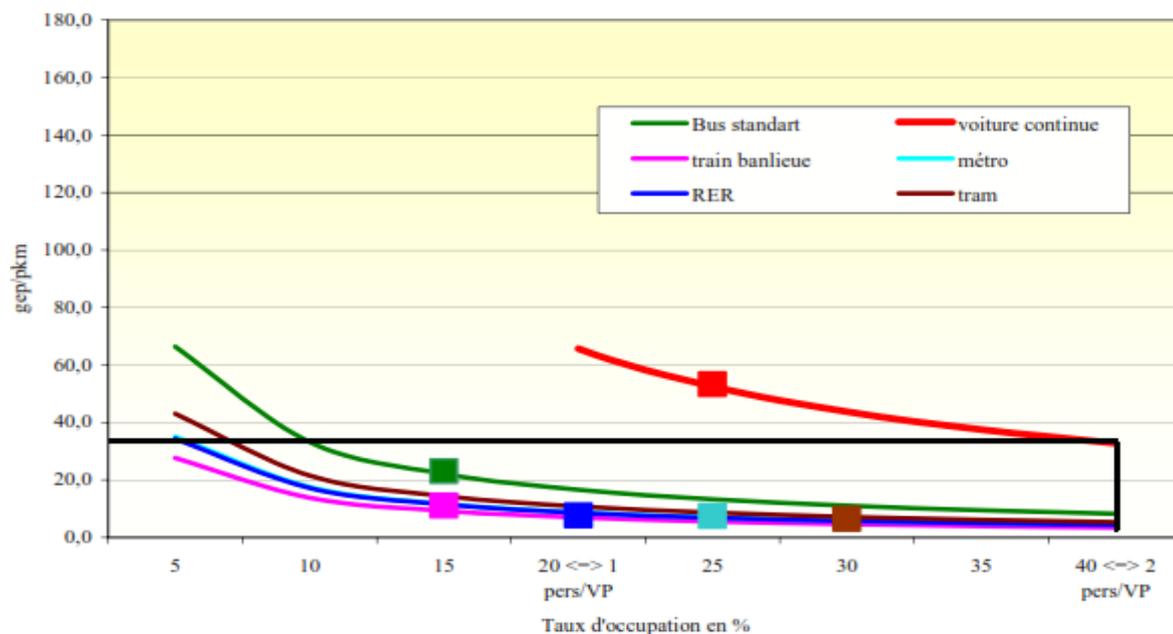
Cette estimation est faite à partir des parts modales et d'une densification de zones permettant le calcul de transfert de charge. Or l'effet de la densité locale à grande échelle est ignoré. Si la densification locale favorise le trafic, la notion de saturation ne peut reposer uniquement sur la variation des parts modales selon une densification à petite échelle, en oubliant celle due aux densités à grande échelle. Si la proximité renforce l'usage du TC la quantité de personnes peut lui nuire. En effet, si les capacités d'offre sont insuffisantes par rapport aux trafics alors la ligne est perturbée et les intervalles aussi.

Or la saturation est basée sur l'offre, mais pas sur le remplissage des véhicules. Le calcul est fait avec un taux d'occupation de l'espace de 4 voyageurs au m² ce qui est démenti dans la réalité puisque le taux de remplissage du matin l'excède. Or, c'est le taux d'occupation qui varie et qui modifie les temps de confort et donc de choix modal. Aussi, le véritable seuil de saturation est le taux de remplissage maximum des véhicules et non une mesure abstraite de flux horaires. Dépasser ce seuil de saturation, implique alors une modification des temps de transports, voire des choix modaux, totalement dépendant des densifications locales. Or si l'objectif du TOD est d'aménager tout en modifiant les mobilités, l'approche par la disponibilité foncière est insuffisante. En effet, l'usage des constructions dépend en partie des capacités à utiliser un mode transport et en particulier le TC à proximité. Il est donc nécessaire de spécifier l'interaction à grande échelle, c'est à dire à proximité des stations, l'effet de la densification d'habitants sur le trafic et l'offre ce qui induit alors la question de la relation entre densité et efficacité énergétique.

3-3) Le taux minimum de remplissage des modèles énergétiques.

L'effet de la variation du taux d'occupation sur les consommations unitaires à l'énergie utile est modélisé sur le logiciel IMPACT (Version 1) pour deux véhicules représentatifs. (ENERDATA, 2004). (Cf Graphique 111)

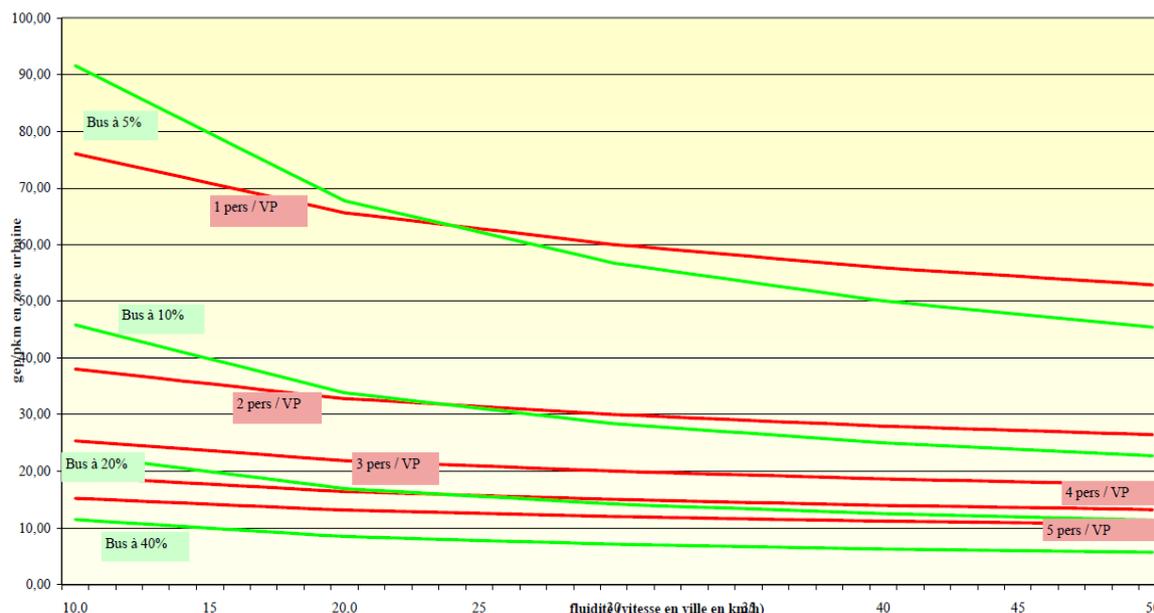
Graphique 111: taux minimum d'occupation



Source : Enerdata

Dans l'abaque, la capacité des autobus est de 112 personnes, le taux d'occupation de 10% correspond à 11 passagers. Pour un taux de 40% (2 personnes pour la VP), la VP est plus économe que les TC à 10% (bus), 5% (RER) ou 7% (Tramway). Néanmoins, les entreprises (RATP et SNCF) ont fourni les éléments de consommations unitaires. Cette variation renvoie donc à une diminution de trafic pour une offre donnée. Pour un taux de remplissage VP donné, un taux minimum d'occupation garantit l'efficacité énergétique TC, à consommations spécifiques constantes, lors de la simulation. L'évaluation est donnée en pourcentage, ces deux indicateurs n'étant pas identiques. Il varie selon la vitesse. Dans certains cas, taux à 40%, le TC est plus économe que la VP, s'il est inférieur, alors une vitesse faible le désavantage systématiquement. Le taux d'occupation minimum est donc le seuil de compétitivité énergétique du TC, pour un service et une consommation spécifique donnée (Cf Graphique 112)

Graphique 112: influence de la vitesse sur le taux minimum.



Source : Enerdata

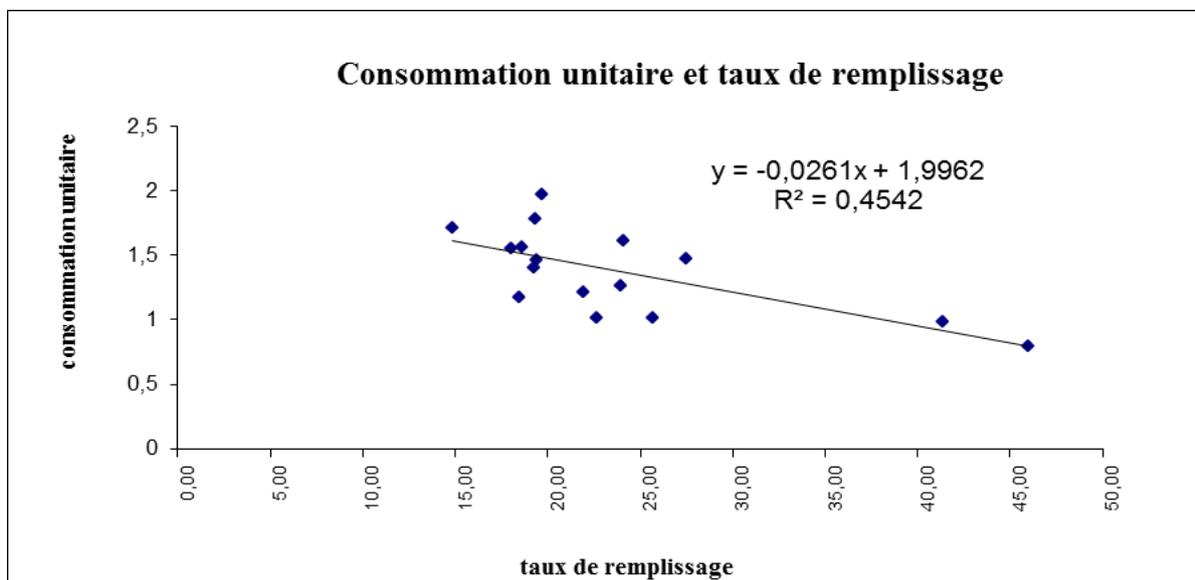
Néanmoins, ces évaluations suggèrent que la consommation spécifique est invariante ou ne varie que selon le véhicule ce qui n'est pas le cas des réseaux ferrés.

3-4) Spécificités du réseau ferré.

Les véhicules des réseaux ferrés sont une « charge roulante ». La charge électrique des trains n'est pas constante. En effet, la courbe d'évolution du courant d'un train en mouvement se caractérise par une succession d'appels et de renvois sur la ligne de contact (démarrages et freinages), espacées de périodes de faible charge (charge des auxiliaires des véhicules) correspondant aux arrêts et aux courses utilisant l'inertie (SEILER & LEDUC, 2011). La puissance moyenne ne représente que 15 à 20 % de la puissance de pointe. De même, ces charges nécessitent une désynchronisation des appels de puissance, afin d'éviter une disjonction par une puissance demandée trop importante. Cette désynchronisation est appelée « foisonnement ». Elle optimise la régénération. Cette gestion de la répartition des charges « fait partie du métier » des gestionnaires de réseaux de transport et de distribution d'électricité. Elle peut faire l'objet d'optimisation utilisant l'intelligence artificielle (LESEL, 2016). Cette caractéristique de « charge roulante » nécessite donc des infrastructures électriques adaptées, évaluées avec un logiciel, tel MARCADET, qui calcule la consommation d'un train à l'heure de pointe dans l'exploitation d'une ligne. Aussi, la consommation spécifique des véhicules d'un réseau ferré ne varie pas de manière similaire à celle des réseaux routiers. Pour les autobus, les consommations de la ligne sont égales à la somme des consommations des véhicules dont la composition ne varie pas, validant leur utilisation dans IMPACT par exemple. En effet, la somme des consommations des véhicules est égale à la consommation totale. Ils peuvent tous démarrer en même temps sans que cela ne pose trop de problème. Le retrait d'un véhicule baisse d'autant la consommation.

Ce n'est pas le cas d'un train, surtout si sa suppression opère une désynchronisation dans la régénération des énergies de freinage. Une panne de courant influence tous les véhicules alors qu'une panne d'essence n'en affecte qu'un. Il existe une interdépendance des flux énergétiques entre les véhicules dans les réseaux ferrés, qui n'existe pas dans les réseaux routiers. Ensuite, dans le réseau ferré RATP, la relation est assez faible entre taux de remplissage et la consommation unitaire renvoyant aux consommations spécifiques ($R^2 = 0.45$), 32% de l'énergie consommée ne vient pas de la circulation des véhicules. La composition de la consommation spécifique change, puisqu'une partie renvoie à une consommation indépendante du véhicule. Certes, les réseaux routiers utilisent de l'éclairage, mais leur extinction n'empêche pas leur fonctionnement. Pour le réseau ferré de TC, des voyageurs ne peuvent pas sortir dans des stations dans le noir. Aussi la consommation spécifique du métro parisien se compose de deux parties séparées : les facteurs techniques hors des véhicules et ceux des véhicules. Certains sont modifiés avec l'offre de transport d'autres non. (cf Graphique 113)

Graphique 113: consommation unitaire et taux de remplissage RF



Source : calcul de l'auteur

Cette caractéristique implique que la variation de l'offre de transport modifie l'efficacité énergétique des réseaux ferrés différemment des réseaux routiers dans des conditions qu'il reste à établir.

4) Conclusion de l'état de l'art.

Au travers de TOD, le réseau devient le médiateur de la forme urbaine. Aujourd'hui les zones de densification urbaine se pensent à partir du réseau. Les densifications sont locales. La méthode node-place, comme d'autres méthodes multivariées, n'estiment pas une valeur de densité mais une densification à proximité de la gare selon des critères multiples incluant l'activité, des habitants ou de l'offre. La notion d'intensification renvoie à deux types d'éléments :

Des éléments du sol avec des contenus différents, l'activité et les habitants n'ayant pas les mêmes effets sur les déplacements. Des éléments du réseau placé sur une même échelle d'évaluation alors que l'espace réticulaire ne constituent pas un espace similaire à l'espace aréolaire.

Or les modèles 4 étapes ne renvoient pas à une densification aux abords de la gare. En effet, leur modèle d'interaction a certes, pour origine, une densification, mais aussi une distribution de flux entre zones à petite échelle. Ils ne renvoient pas à une densification locale, c'est-à-dire à une distribution de flux entre zone à grande échelle. Ils sont incapables de prévoir les effets d'une modification du tissu urbain sur les trafics à partir du fonctionnement d'une infrastructure. Il existe donc un point aveugle dans les valeurs de densités possibles auprès des gares. En effet, la seule disponibilité des terrains ne suffit pas densifier, si la conséquence est l'incapacité pour le système de transport d'absorber ce trafic.

Or la proximité auprès du réseau est une constante du projet. Elle a pour conséquence la réduction du temps d'accès aux réseaux de TC dans une surface proche de la gare ou des stations qui sont alors l'interface réticulo-spatiale permettant le passage de l'espace statique, où l'individu se meut à faible vitesse, à l'espace dynamique de forte vitesse, où l'on est statique, en usant du véhicule pour se déplacer. Cela se traduit alors dans les stations du réseau ferré parisien par un mode spécifique à l'entrée des stations : l'usage de la marche à pied où « marchabilité » dans le mode précédent l'accès dans les stations, qui sont l'interface entre les ensembles réticulaire et aréolaires. Néanmoins, elle ne spécifie rien concernant la densité à proximité puisqu'elle ne fait qu'indiquer de l'effet de la proximité sur l'usage au travers d'un mode spécifique la MAP.

Or l'offre varie selon le trafic. Néanmoins, aucune estimation fondée concernant l'effet de l'offre sur la densification n'existe à ce propos. Aussi la notion de saturation interroge puisque les effets de la densité locale sur les trafics n'est pas prise en compte. De plus, les taux de remplissage apparaissent fixés (4 voyageurs/m²) pour évaluer l'offre dans les simulations, ce qui ne renvoie pas aux réalités constatées et, en particulier, à l'existence de la variation du taux de remplissage selon les heures ou les jours. Or il existe un seuil de saturation défini par le taux maximum de remplissage.

Ensuite, les résultats des modèles de simulation basés sur l'efficacité énergétique des réseaux routiers montrent l'existence d'un taux minimum de remplissage.

Aussi deux taux de remplissage apparaissent

1. Le taux de remplissage maximum ou seuil de saturation pour une offre donnée.
2. Le taux de remplissage minimum ou seuil de compétitivité énergétique pour une offre donnée.

Or ce taux dépend du trafic pour une consommation spécifique constante pour une offre constante. Néanmoins, la consommation spécifique varie dans les réseaux ferrés puisqu'il y a une consommation d'énergie qui ne dépend pas des véhicules. Elle ne varie pas de la même manière selon l'offre entre les réseaux routier et ferré. Deux problèmes apparaissent alors :

1. Le premier est celui de l'effet de la densité sur le trafic à proximité de la station.
2. Le second, au travers de taux de remplissage, est celui de l'offre sur la densité selon une efficacité énergétique donnée.

Chapitre 8 : Effet des densités d'habitants sur le trafic autour des stations : une étude à Paris.

Introduction

Avec la déconnexion de la relation densité part modale, le fondement même d'une densification favorable au trafic interroge. Néanmoins, trois étapes distinctes existent dans le déplacement non chaîné, le temps d'émission, le temps de voyage et le temps de réception. Pour un déplacement donné, qu'il soit chaîné ou non, le temps d'émission ou de réception est le même, seul le temps du voyage change. Ces flux ont des modes spécifiques, ils peuvent venir d'un autre mode motorisé ou non. Ces temps qui relient l'espace des résidents à celui des réseaux sont extérieurs aux flux internes.

Nous supposons que les entrées en marche sont l'effet de la proximité sur le trafic. Or le nombre d'entrants dans une station dépend des parts modales et du nombre d'habitants. Le cumul des habitants et la proximité des stations, impliquent donc un usage important de la marche dans le mode précédent l'accès dans les stations du réseau ferré de la RATP. Néanmoins, les parts modales sont indépendantes des densités, c'est-à-dire de la concentration d'habitants, à l'échelle locale dans le périmètre régional. Nous posons alors l'hypothèse qu'à l'échelle réticulaire, la concentration d'habitant modifie le trafic pour une part modale donnée. La concentration d'habitants agirait donc comme une variable indépendante des choix modaux issus de la structure spatiale des déplacements (portée et direction) à cette échelle. Néanmoins, il reste à vérifier cette hypothèse.

Cette vérification suppose alors de modifier l'échelle d'étude à double titre.

- Les réseaux ferrés RATP sont différents dans leur rapport aux modes précédents l'accès. Il nous faut donc déterminer le réseau le plus adapté de ce point de vue, mais aussi du milieu plus ou moins dense que ce réseau traverse. Le réseau ferré parisien RATP, c'est à dire à l'intérieur de Paris, est alors le plus adapté.
- Ensuite, les secteurs EGT parisien ont un périmètre trop important vis à vis de notre objet d'étude qui repart des stations aussi il nous faut les dissocier selon les arrondissements afin de pouvoir vérifier si les densités modifient bien les trafics selon les habitants.

Néanmoins, en prenant le réseau ferré parisien nous nous heurtons à une deuxième difficulté : sa faible spécialisation et donc l'absence de liens entre le voyage et l'habitat. Un certain nombre de voyageurs font des boucles de déplacement à partir de lieux d'activités qui ne renvoient pas à leur habitat. Aussi cette vérification implique d'identifier un motif de déplacement qui permet de relier directement le voyageur à l'habitant.

Aussi en établissant à partir de nos données, un lien entre habitant et trafic nous pourrions déterminer les densités moyennes autour des stations. Nous définirons la notion de densité de ligne. L'effet du maillage sur les densités à proximité du réseau peut alors être envisagé.

Ce chapitre comporte trois items :

- Le premier sont les éléments de méthode qui traduisent l'hypothèse et les précautions méthodologiques envisagés pour la vérifier.
- Le second met en œuvre la vérification.
- Le troisième décline les conséquences de cette relation entre densité et trafic ce qui permet alors d'établir un certains nombre d'indicateurs et en particuliers les densités moyennes des stations et les densités de ligne. Nous pouvons simuler l'effet du maillage sur les densités d'habitants à proximité, autrement dit une interaction réticulo-spatiale, pour un trafic donné.

1) Méthode

1-1) L'hypothèse de recherche

La densité est une accumulation de personnes dans un espace. Elle ne traduit aucune proximité, ni accessibilité locale entre le réseau et les individus. Néanmoins, plus elle est grande plus le nombre d'habitants dans la forme locale augmente, le nombre de personnes avec une accessibilité forte grandit pour des périmètres fixés. (Cf Figure 55) :



Figure 55 : densité accessibilité

Source : auteur

Ces deux éléments ne renvoient pas aux mêmes déterminants :

1. L'accessibilité et la proximité renvoient à une émission dans la chaîne de déplacement.
2. La densité renvoie à une accumulation moyenne d'habitants dans un espace statique.

L'accessibilité aréolaire se traduit par l'usage de la MAP à l'entrée des stations. Dans l'usage du mode TC, ce n'est pas toujours le cas. Le rabattement se substitue à la MAP dans l'usage du TC. Aussi, ce n'est pas « la densité » qui permet l'usage du TC c'est à dire le choix modal. Ensuite, la MAP traduit l'effet de la proximité spatiale sur les temps de déplacement avec la réduction du temps d'émission du déplacement due à la baisse des portées. Mais ce temps d'émission n'est pas le déterminant du choix puisqu'il ne représente qu'une partie du temps de déplacement. La part modale est donc fixée, pour l'individu selon son motif à destination c'est-à-dire l'activité qu'il projette.

Dans la chaîne du déplacement, à l'émission, la densité augmente le nombre de personnes dans le périmètre situé entre l'habitation et l'arrêt. A l'entrée de la station, le trafic des stations est donné par Entrants des stations (E) = $\alpha \times \text{Hab}$ (α = part modale, Hab= nombre d'habitants) renvoyant à une densité puisque $E/1\text{km}^2 = (\alpha \times \text{Hab}) / 1\text{km}^2$ soit $D(t) = \alpha \times D$. Or, la densité d'habitant (D) ne modifie pas les parts modales à petite échelle qui dépendent des temps de déplacement et non d'émission. Densifier à proximité d'une gare réduit, pour un ensemble de personnes, la distance d'accès aux réseaux à l'émission du déplacement. L'accessibilité au TC se renforce pour ces habitants, ce qui peut augmenter le trafic, *indépendamment des parts modales par la concentration d'habitants*. Il reste à vérifier l'hypothèse, de l'effet du nombre d'habitants sur le nombre de voyages dans le réseau ferré. Nous sommes alors dans une approche empirique et statique.

1-2) Un mode le réseau ferré parisien RATP.

La MAP traduit l'effet de l'accessibilité entre l'habitat et le réseau. Néanmoins, les entrants d'une station ne viennent pas obligatoirement à pied. Ceux qui viennent en bus, avant d'entrer dans la station, ne renvoient pas à un effet de la proximité spatiale sur le trafic. Or le RER ne reçoit que 55 % de trafic en MAP. L'influence de la marche décroît significativement pour les stations des branches du RER A 26% et B 20%, 45% des trafics du RER proviennent d'autres réseaux régionaux. Dans sa partie parisienne, la part de MAP du RER devient plus importante que les autres modes (>80%). Or la morphologie du réseau ne se modifie pas. La modification des modes d'accès au réseau n'est due qu'aux territoires desservis. Une forte densité auprès des gares du RER à Paris existe, contrairement à la banlieue, où elle est moins forte. Dans les branches, le rôle majeur des rabattements modifie la structure des trafics. L'effet de la densité sur le trafic devient invérifiable. Aussi, pour mesurer l'effet de l'accumulation des habitants sur les trafics, il reste alors nécessaire d'avoir un milieu où l'accessibilité est forte ce qui se caractérise par la MAP dans le mode précédent l'accès. Il nous faut donc un territoire qui le permette en l'occurrence Paris. C'est donc le métro qui est choisi et nous y intégrerons les stations du RER dans Paris, afin de nous permettre de vérifier notre hypothèse. Notons alors qu'il manquera les stations de la SNCF situées dans Paris (RER C et D) et les stations de métro situées en banlieue. Les deux périmètres, réticulaire et aréolaire, sont donc cohérents.

1-3) Un motif spécifique le trajet domicile travail.

Un voyage n'est pas un déplacement, un habitant n'est pas forcément un voyageur. L'accroissement de la MAP à l'entrée du réseau, n'est pas simplement due qu'aux densités d'habitants, mais aussi aux concentrations d'activité de la ville. En effet, les trafics concentrent des voyages des non-résidents d'un secteur qui effectuent une activité dans un autre secteur. Aussi, il reste nécessaire d'identifier un trafic type qui pourrait renvoyer à un déplacement que nous pourrions identifier à celui d'un habitant parisien. Cet habitant pouvant être relié à une densité. Néanmoins, le métro est faiblement spécialisé, les motifs de déplacement varient. Or, nous connaissons, grâce aux recensements, la part modale à l'émission de la « navette » par arrondissement. A l'émission, il n'y pas de différence entre le déplacement « à voyage non chaîné » ou « chaîné ». Aussi, les déplacements motifs domicile travail sont spatialement connectés à l'habitant donc à la densité. Selon les données par arrondissement d'origine, nous pouvons donc identifier, pour les arrondissements, le lien entre les déplacements et les trafics pour le TC ferré parisien à l'émission. Il nous faut donc choisir ce trafic spécifique dont le motif est le même.

1-4) Les données

Nous reprenons les données du recensement concernant les déplacements domicile travail et les données de trafic RATP enquêtée (TJRF). Nous dissociions donc les secteurs EGT selon les arrondissements constituant alors un nouveau changement d'échelle dans l'étude.

Les données des appareils de contrôle sur Paris dans une période donnée 06h00-09h30 correspondent à l'émission du déplacement domicile travail puisque la part de trafic pour ce motif est de 78%. Notre démarche sera quantitative et répond aux mêmes critères qu'évoqués précédemment.

2) Vérification de l'hypothèse.

A l'entrée du réseau, l'émission du déplacement ayant pour origine le domicile égale un voyage. La mobilité à voyage non chaîné d'un mode est des entrants des stations soit (Cf Equation 138).

$$\text{Mobilité} = \text{Entrants des stations} = \alpha (\text{part modale}) \times \text{Habitants (138)}$$

Source : auteur

Nous vérifierons :

1. L'hypothèse selon laquelle les densités ont bien un effet sur les entrants des stations.
2. L'adéquation du trafic et du déplacement à l'émission.
3. L'heuristique de la répartition des trafics à l'émission avec la cohérence entre les déplacements et les trafics que nous calculerons.

2-1) La matrice de répartition.

Selon les données de déplacement à pied nous effectuons une matrice de répartition des entrants avec l'origine spatiale locale des entrants. Nous avons donc une matrice M_{ij} avec en i les stations et le nombre d'entrants et en j les arrondissements. Nous donnons Abbesses et Alesia. Ce sont les premières stations dans l'ordre alphabétique ce qui évite de présenter la matrice des stations (Cf Tableau 193).

Stations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ABBESSES																		6194		
ALESIA														16955	22					

Source : calcul de l'auteur

Nous effectuons une proportion du nombre d'entrants selon les totaux de la station. Pour Abbesses les entrants viennent du 18^{ième}. (Cf Tableau 194).

Stations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ABBESSES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ALESIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,999	0,001	0	0	0	0	0

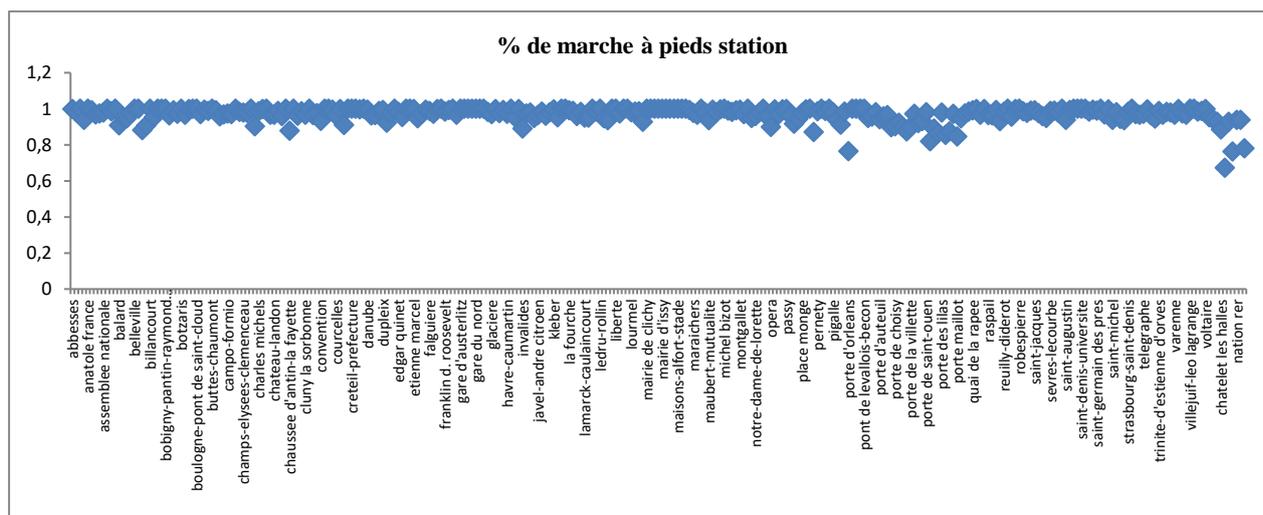
Source : calcul de l'auteur

Pour Alésia nous obtenons 0.999 des entrants venant du 14^{ième} arrondissement et 0.001 du 15^{ième}.

2-2) Les parts de trafic à pied dans les stations.

Selon l'enquête TJRF, dans chaque station un certain nombre de personnes viennent à pied et d'autres non. Nous calculons donc un **coefficient C** qui est le ratio entre le nombre d'entrants total et le nombre d'entrants à pied. (Cf Graphique 114)

Graphique 114: coefficient C métro + RER à Paris



Source calcul de l'auteur

En effet, d'autres modes d'accès existent. Or nous voulons examiner l'effet de la proximité qui s'exprime avec la MAP. Il faut isoler cet aspect dans les entrées par station. Elle est alors très forte. Celles qui ont le moins de pourcentage sont Saint-michel et Luxembourg, toutes les stations ne figurent pas sur l'abscisse du graphique. Cette accessibilité par station ne correspond pas à celle du réseau. En effet, elle renvoie à des points spécifiques internes aux réseaux et ne mesure pas l'effet de leur dispersion dans le territoire c'est à dire du maillage ;

2-3) La variation des parts de marche à l'entrée des stations pour le motif domicile travail.

Les clefs de répartition par station, selon l'accès local, sont obtenues statistiquement par l'ensemble des trafics. Les appareils de contrôle donnent pour les douze mois de l'année des trafics entrant par station. La moyenne des jours ouvrable du mois de janvier est isolée, c'est un mois à « faible taux de tourisme » proche du trafic résidentiel. Les données de l'enquête TJRF recourent les moyennes des trafics par station avec des appareils de contrôle ($R^2=1$). La majorité du trafic domicile travail est dans la tranche 06h00-09h30. Pour les gares incluses dans les stations de métro, nous appliquons 21% des entrants quotidiens mesurés dans la station (motif domicile travail). En effet, le nombre d'entrées mesuré des appareils de contrôle excède le nombre d'habitants dans certains arrondissements. Elles captent un trafic hors de la région parisienne. (Cf Tableau 161)

Tableau 194 : part de trafic réseau ferré domicile travail dans le total des trafics.

Heures	Domicile-Travail	Travail-Domicile	Autres motifs obligés	Motifs non obligés	Part Domicile-Travail dans le total
6h00-9h30	1 158 600	26 600	218 750	74 050	21%
Part	78%	2%	15%	5%	1
9h30-16h30	506 950	380 500	421 850	691 750	9%
Part	25%	19%	21%	35%	1
16h30-21h00	106 800	1 163 000	255 350	541 150	2%
Part	5%	56%	13%	26%	1
6h00-21h00	1 772 400	1 570 100	895 900	1 306 950	5 545 350
	32%	28%	16%	24%	1

Source : RATP

Néanmoins, nous ne savons pas pour ces entrants issus des appareils de contrôle (E) qu'elle est la part de marche à l'entrée. Le coefficient C (cf ci-dessus) l'estime pour la station (Cf Equation 139) :

$$E \times C = \text{entrant à pied } (E_p) \quad (139)$$

Source : calcul de l'auteur

Néanmoins, leur nombre varie entre la moyenne de la journée (92%) et celle située dans la tranche située 06h00 -09h30 (85%) Aussi nous multiplions C de chaque station par 85/92 (Cf Tableau 195).

Tableau 195 : part moyenne métro MAP trafic domicile travail 06h00-09h30.			
Marche	Autobus (y compris tram)	Voiture	Total
85%	13%	3%	1
Part moyenne métro trafic domicile travail MAP			
Marche	Autobus (y compris tram)	Voiture	1
92%	7%	1%	

Source : calcul de l'auteur

2-4) La variation des motifs de trafic

Entre 06h00 et 09h30 78% des motifs sont pour le trajet domicile travail. Ce pourcentage (K) de nos entrants à pied matinaux spécifie dans le trajet matinal, le voyage domicile travail. (Cf Equation 140)

$$E_p \times K = E_{pdm} \quad (140)$$

Source : calcul de l'auteur

2-5) Répartition des correspondances par station dans la matrice de répartition.

Pour chiffrer la correspondance nous partons du ratio (E/U) de chaque ligne (Cf Tableau 196) :

Tableau 196: entrants et correspondants par ligne																
Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B
Entrants	484900	269850	295800	441900	293000	285800	381300	295700	384800	136750	139650	275500	139150	239150	739100	457800
Correspondants	227150	196100	150850	236500	150650	261450	172900	143050	160500	74500	88250	105600	118650	118650	283350	166400
Utilisations	712050	465950	446650	678400	443650	547250	554200	438750	545300	211250	227900	381100	257800	257800	1022450	624200
ratio E/U	68%	58%	66%	65%	66%	52%	69%	67%	71%	65%	61%	72%	54%	50%	72%	73%

Source : calcul de l'auteur

Pour une station en correspondance avec la ligne 1 nous réservons donc 68% à la ligne 1 et 32% à l'autre ligne. Pour une station avec deux correspondances nous sommions les deux taux et nous effectuons leur moyenne afin d'estimer, pour la station, la part de trafic entrant dans la station qui peut être attribuée. Ainsi pour la station Jussieu, qui est une correspondance entre les lignes 10 et 7, nous avons fait la répartition suivante pour la ligne 7 (Cf Equation 141) :

$$T_{xe7j} = T_{xe7} / (T_{xe10} + T_{xe7}) \quad (141)$$

Source : calcul de l'auteur

Taux d'entrant de Jussieu ligne 7 est égal au taux d'entrant de la ligne 7 divisé par la somme des taux d'entrant de la ligne 7 et 10. Nous obtenons les entrants à pied de la station (Cf Equation 142).

$$E_{pdm} \times T_{xeli} = \text{Entrant à pied brut de la ligne } i \text{ de la station } j \quad (142)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous affectons les stations selon les lignes (Cf Equation 143).

$$\Sigma(E_{pdm} \times T_{xeli}) = T_{pbli} \quad (143)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous répartissons ligne par ligne. La matrice de répartition renvoie pour chaque ligne et arrondissement les trafics entrants des résidents des arrondissements. (Cf tableau 197).

Tableau 197 : trafic domicile travail

A/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	Σ A
1	1489	0	121	1655	0	0	1119	164	0	2	268	146	0	219	1829	27	7037
2	91	0	2056	1257	3	0	339	646	798	0	26	35	0	32	148	0	5432
3	294	0	1601	695	612	0	34	2060	646	0	1367	0	0	6	195	0	7509
4	3014	0	51	417	470	0	908	502	0	4	978	0	0	31	369	145	6890
5	156	0	83	2482	330	0	2869	0	0	2069	22	0	0	88	27	2585	10712
6	22	0	0	3063	0	260	18	0	0	1330	2	1373	361	2	20	481	6931
7	11	0	0	1695	0	69	25	2211	255	614	0	1466	1344	1	0	0	7691
8	1928	2120	2395	0	0	295	318	322	2645	0	0	1598	2037	1047	1257	0	15964
9	2	2281	2356	169	5	0	2531	735	2789	0	0	3555	1163	479	1164	0	17227
10	0	3180	346	4068	4523	0	6989	1110	1144	0	1327	0	6	0	0	0	22694
11	1120	5825	4657	0	3413	253	10	2903	13187	0	2871	0	0	209	3	0	34452
12	6286	566	0	0	661	7653	3	9059	780	43	0	0	0	4489	926	0	30467
13	1	0	0	46	3337	9941	10354	0	0	337	0	0	0	11402	1502	467	37386
14	0	0	0	11014	0	3438	14	0	0	11	0	1033	9177	0	0	4314	29002
15	0	0	0	764	0	9795	0	9182	0	7308	0	12305	1775	0	0	0	41128
16	2452	2022	155	0	0	3620	0	0	12069	2559	0	169	336	116	400	0	23899
17	3707	5157	7159	0	0	59	0	0	0	0	0	82	9021	56	892	0	26133
18	0	6270	0	8803	340	0	376	0	0	0	0	12197	3457	0	13	0	31455
19	0	2586	2	13	8735	0	13439	146	153	0	6786	155	11	0	0	0	32026
20	2419	5711	11468	0	0	138	31	3	5452	0	5023	0	0	0	313	0	30559
Σ L	22994	35718	32450	36141	22430	35521	39377	29043	39919	14276	18672	34114	28689	18178	9058	8019	424597

Source : calcul de l'auteur

Les colonnes somme (Σ) reflètent les trafics des lignes et arrondissements. Elles montrent les effets aréolaires sur le plan des arrondissements et la répartition réticulaire sur le plan des lignes. Elles dissocient alors les valeurs dans les espaces. Pour le 1^{ier} arrondissement, les totaux des lignes est de 7037 entrants, ce qui correspond l'effet des choix modaux des habitants sur les lignes du réseau. Pour la ligne 1, le total des arrondissements est de 22994, c'est la traduction des choix des habitants des différents arrondissements dans l'espace réticulaire.

2-6) Des hypothèses vérifiées

Nous calculons la quantité de déplacements affectables au réseau ferré sous l'hypothèse 1 voyage =1 déplacement à l'émission. Dans la totalité des trafics 21% viennent du domicile-travail soit 309 millions de voyage. Or les apports de l'autre mode représentent 12% (autobus) ce qui conduit à 273 millions de voyages pour le réseau ferré.

Sous l'hypothèse que le trafic autobus a les mêmes proportions de trafic domicile travail que le réseau ferré nous obtenons deux parts de trafic domicile travail (273 et 90). Nous négligeons l'apport de l'autobus à la SNCF dans Paris, la part du réseau SNCF correspond à 54 millions de voyages calculés à partir des entrants à Paris (259 millions). La part de trafic du réseau ferré RATP représente 66% (273/411) dans le trafic global. (Cf Tableau 198).

Trafic	Total	Domicile travail	Corrigé des apports	Part du trafic.
Métro-RER	1479	309	273	0,66
Bus	448	90	90	0,21
SNCF	259	54	54	0,13
Total	2186	453	417	1

Source : calcul de l'auteur

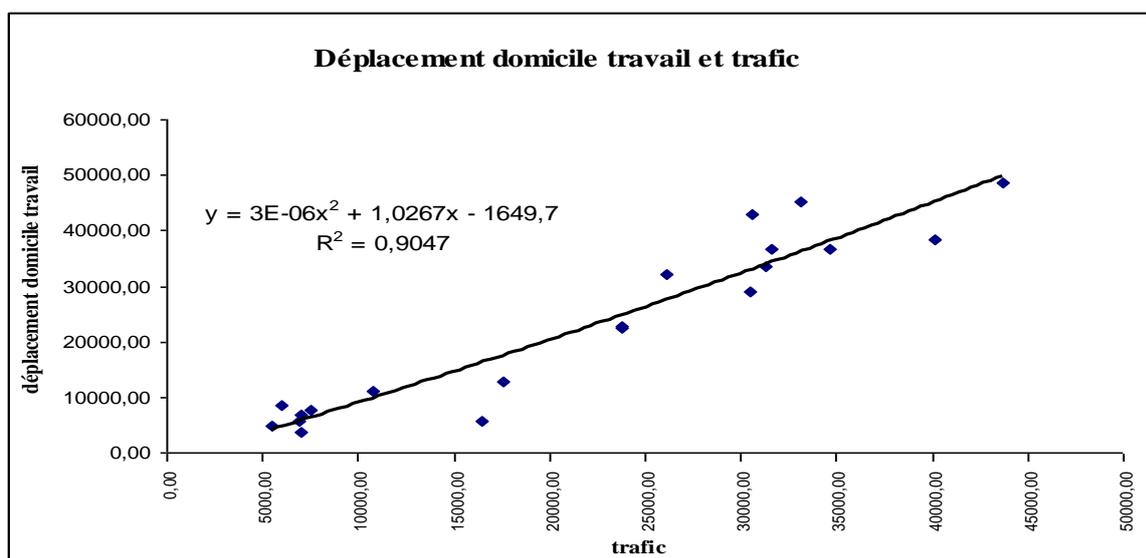
Nous calculons les déplacements domicile travail des arrondissements de Paris issu des recensements dans le réseau ferré (Cf Equation 144) :

$$\text{Mobilité domicile travail TC} \times 0,66 = \text{Trafic réseau ferré RATP (Paris)} \quad (144)$$

Source : calcul de l'auteur

Nous comparons les résultats issus de la matrice de répartition et celle des déplacements des recensements. La forte relation entre l'émission des voyages et des déplacements pour le trajet domicile travail confirme notre hypothèse. Les parts modales dépendant du motif à destination, la variation à l'émission dépend des concentrations d'habitants. L'égalité ne se vérifie pas. Le décalage temporel, la présence d'autres motifs de déplacement dans le trafic ou encore l'absence des gares SNCF située dans Paris peuvent l'expliquer. (Cf Graphique 115).

Graphique 115: déplacements et voyages domicile travail par arrondissement



Source : calcul de l'auteur

Si nous désagrégons par ligne, nous ne retrouvons plus de relation entre mobilité et trafic « L'effet dimension » se reproduit. En effet les lignes dissocient la part modale de l'arrondissement en plusieurs parties déterminées par les temps de parcours vers l'activité. L'attraction de ces dernières renvoie à une surface localisée déterminée par des temps ce qui conduit à nous intéresser aux effets du maillage sur les trafics à l'échelle des stations.

3) Maillage et densité d'une ligne du réseau ferré parisien.

3-1) Station et accessibilité réticulaire.

Nous appelons zone d'attraction, la capacité d'une station à capter des trafics issus de la MAP selon les arrondissements. Ainsi, la station Madeleine capte des trafics des 1,2 8,9 et marginalement du 7. Les flux principaux viennent du 8^{ème} qui représente la principale surface limitrophe de la station si nous traçons un cercle. Ils se distribuent selon les arrondissements d'émission (Cf Figure 56).

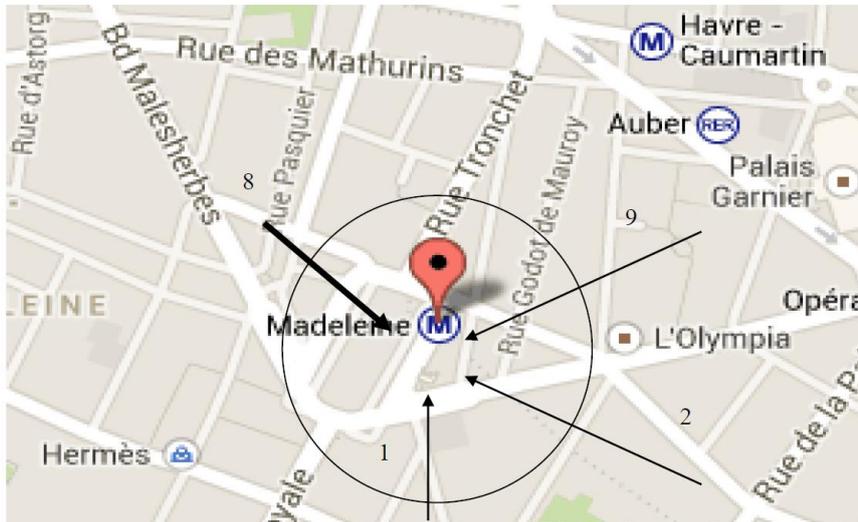


Figure 56: flux d'entrants Station Madeleine.

Source : calcul de l'auteur

La station Barbès-Rochechouart, accueille des trafics issus des, 9^{ème}, 10^{ème} et 18^{ème} (Cf Figure 57).

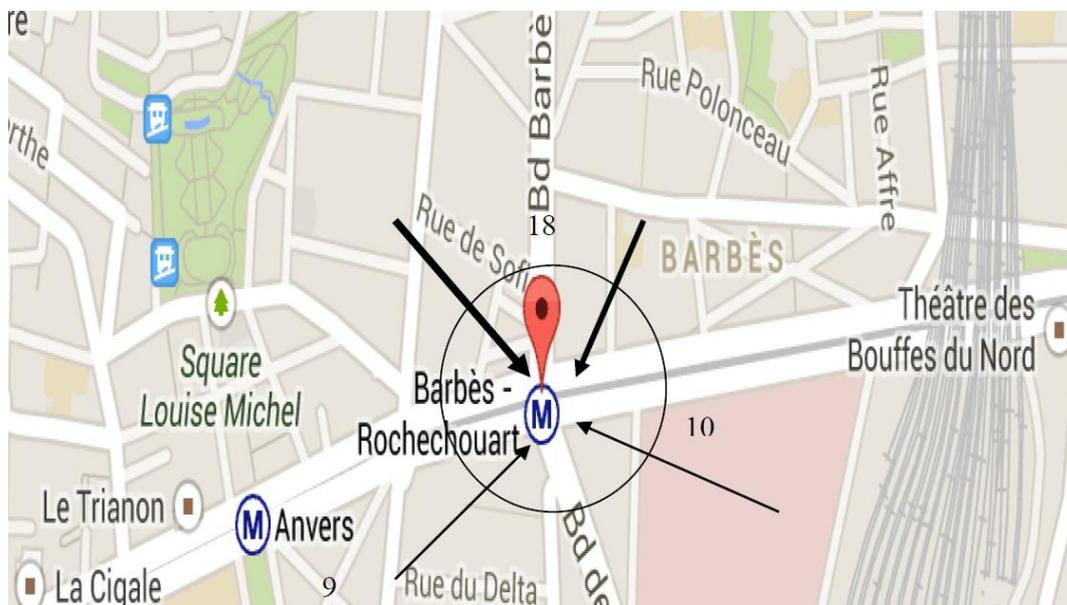


Figure 57 : flux entrants Barbès Rochechouart.

Source : calcul de l'auteur

Elle capte un trafic limitrophe majoritairement portée par le 18^{ème}. Le nombre de station implique des recouvrements de zone puisque la distance entre Anvers et Barbès est environs de 520 mètres. Nous distinguons deux effets.

1. La localisation de la station dans un arrondissement.
2. Le rayonnement de cette station qui accueille des entrants d'autres arrondissements.

Si la station Barbes Rochechouart située dans le 18^{ème}, vaut pour 1 en termes d'infrastructure mais pour 3 (9 10 18) en termes de « rayonnement ». Une station interagit avec plusieurs arrondissements, la compter et l'affecter dans un seul, selon son adresse, ne reflète pas la réalité de son rôle dans le trafic réticulaire. En attribuant la localisation de la station dans un arrondissement spécifique par les flux majoritaires provenant de celui-ci, nous obtenons le chiffre de 330 stations réparties dans Paris. La distribution dans les arrondissements (total) ou les lignes (total lignes) est distinguée. (Cf Tableau 199).

Tableau 199 : nombre de stations réelles

L/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	Total
1	5	0	0	2	0	0	4	0	1	0	1	1	0	1	2	0	17
2	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	8
3	0	0	2	0	0	0	0	3	3	0	2	0	0	0	1	0	11
4	3	0	0	1	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	2	0	10
5	0	0	0	1	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	2	3	13
6	0	0	0	5	0	0	0	0	0	4	0	3	0	0	1	0	13
7	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	12
8	4	2	2	0	0	1	1	1	1	0	0	2	4	2	2	0	22
9	0	1	2	0	0	0	3	2	2	0	0	4	0	0	1	0	15
10	0	1	0	4	1	0	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	13
11	0	2	3	0	3	0	0	1	2	0	3	0	0	0	1	0	15
12	3	1	0	0	1	6	0	5	7	0	0	0	0	3	2	0	28
13	0	0	0	0	3	6	6	0	0	1	0	0	0	1	1	0	18
14	0	0	0	6	0	5	0	1	0	0	0	1	5	0	0	2	20
15	0	0	0	0	0	6	0	5	6	6	0	6	1	0	0	0	30
16	0	2	0	0	0	4	0	1	0	6	0	0	0	0	1	0	14
17	2	5	5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	5	0	2	0	21
18	0	4	0	5	0	0	0	0	0	0	0	6	1	0	1	0	17
19	0	2	0	0	3	0	11	0	0	0	3	0	0	0	0	0	19
20	1	5	5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	14
Total Ligne	18	25	23	26	11	28	34	24	29	21	12	26	19	7	22	5	330

Source : calcul de l'auteur

La deuxième matrice représente intègre l'effet des stations sur les usages. Certains habitants utilisent des stations dans un autre arrondissement. La « zone d'attraction » d'une station implique un report de trafic selon des optimisations des temps de transport entre les stations pour le déplacement. Une divergence existe alors entre une mesure de la station considérée comme un point, et celle impliquant son « rayonnement » autrement dit une « accessibilité réalisée » mesurée en nombre de stations utilisées. De 330 stations nous passons à 729 soit une multiplication par 2.5. (Cf Tableau 200).

Tableau 200 : zone d'attraction du réseau

L/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	Total
1	6	0	5	7	0	0	5	3	0	1	3	2	0	2	2	1	37
2	5	0	8	5	1	0	6	7	0	0	4	2	0	2	2	0	42
3	4	0	5	5	5	0	3	7	1	0	5	0	0	1	1	0	37
4	5	0	3	6	2	0	4	3	0	1	4	0	0	1	2	1	32
5	4	0	1	5	4	0	8	0	0	6	2	0	0	2	2	3	37
6	3	0	0	10	0	1	3	0	0	6	1	7	3	1	1	3	39
7	5	0	0	5	0	4	2	6	2	7	0	8	7	1	0	0	47
8	7	8	6	0	0	2	3	4	3	0	0	4	7	2	2	0	48
9	1	6	5	4	2	0	6	6	1	0	0	7	3	2	1	0	44
10	0	6	2	6	7	0	7	5	0	0	3	0	1	0	0	0	37
11	4	9	4	0	6	0	1	7	5	0	3	0	0	1	1	0	41
12	5	2	0	0	3	4	1	9	5	1	0	0	0	4	2	0	36
13	1	0	0	1	4	7	8	0	0	1	0	0	0	3	1	3	29
14	0	0	0	8	0	4	1	0	0	1	0	3	6	0	0	3	26
15	0	0	0	4	0	5	0	6	0	6	0	7	7	0	0	0	35
16	4	3	1	0	0	5	0	0	8	8	0	1	2	1	1	0	34
17	3	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	1	2	0	28
18	0	8	0	5	2	0	5	0	0	0	0	7	4	0	1	0	32
19	0	6	1	2	6	0	11	1	0	0	7	1	1	0	0	0	36
20	2	8	7	0	0	1	2	1	3	0	7	0	0	0	1	0	32
Total Ligne	59	63	54	73	42	33	76	65	28	38	39	50	49	24	22	14	729

Source : calcul de l'auteur

L'origine des entrants montre l'effet réticulaire sur l'accessibilité en termes d'infrastructures à l'échelle du réseau. Il n'est pas montré selon la potentialité et le temps, mais par l'usage dans la réalisation de la mobilité. Il s'agit donc d'une carte d'accès d'une mobilité réalisée d'un réseau. Cette attractivité se décline selon les lignes (L) et les arrondissements (A). Il existe 59 stations qui contribue à la charge de la ligne 1 tandis que 37 renvoie à l'accès du premier arrondissement.

3-2) La densité d'une ligne.

Nous effectuons une répartition à partir des trafics entrants (Cf Equation 145).

$$P_{ta} = T_a / \sum T_i \quad (145)$$

P_{ta} = part de trafic de l'arrondissement a T_a = trafic de l'arrondissement a $\sum T_i$ = somme des trafic des lignes dans l'arrondissement a. Cette part de trafic correspond alors à une population active de l'arrondissement que nous calculons (Cf Equation 146):

$$P_{ta} \times P_{moda} \times P_{opact} = P_{opla} \quad (146)$$

Source : calcul de l'auteur

P_{ta} = part de trafic dans l'arrondissement P_{moda} = part modale arrondissement P_{opact} = population active de l'arrondissement P_{opla} = population active de l'arrondissement dans la ligne (Cf Tableau 201)

Tableau 201 : répartition de la population active

A/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	Σ A
1	0,21		0,02	0,24			0,16	0,02		0,00	0,04	0,02		0,03	0,26	0,00	1
2	0,02		0,38	0,23	0,00		0,06	0,12	0,15		0,00	0,01		0,01	0,03	0,00	1
3	0,04		0,21	0,09	0,08		0,00	0,27	0,09		0,18			0,00	0,03	0,00	1
4	0,44		0,01	0,06	0,07		0,13	0,07		0,00	0,14			0,00	0,05	0,02	1
5	0,01		0,01	0,23	0,03		0,27			0,19	0,00			0,01	0,00	0,24	1
6	0,00			0,44		0,04	0,00			0,19	0,00	0,20	0,05	0,00	0,00	0,07	1
7	0,00			0,22		0,01	0,00	0,29	0,03	0,08		0,19	0,17	0,00			1
8	0,12	0,13	0,15			0,02	0,02	0,02	0,17			0,10	0,13	0,07	0,08		1
9	0,00	0,13	0,14	0,01	0,00		0,15	0,04	0,16			0,21	0,07	0,03	0,07		1
10		0,14	0,02	0,18	0,20		0,31	0,05	0,05		0,06						1
11	0,03	0,17	0,14		0,10	0,01	0,00	0,08	0,38		0,08			0,01	0,00		1
12	0,21	0,02			0,02	0,25	0,00	0,30	0,03	0,00			0,00	0,15	0,03		1
13	0,00			0,00	0,09	0,27	0,28	0,00		0,01				0,30	0,04	0,01	1
14				0,38		0,12	0,00			0,00		0,04	0,32			0,15	1
15				0,02		0,24		0,22		0,18		0,30	0,04				1
16	0,10	0,08	0,01			0,15			0,51	0,11		0,01	0,01	0,00	0,02		1
17	0,14	0,20	0,27			0,00						0,00	0,35	0,00	0,03		1
18		0,20		0,28	0,01		0,01		0,00			0,39	0,11		0,00		1
19		0,08	0,00	0,00	0,27		0,42				0,21	0,00					1
20	0,08	0,19	0,38			0,00	0,00	0,00	0,18		0,16				0,01		1

Source : calcul de l'auteur

Or la densité de population n'est pas seulement la population utilisant le TC. Selon les populations actives (Pop_{la}), nous calculons les populations par le ratio (Rp) entre actifs et population de l'arrondissement que nous divisons par sa surface (S). (Cf Equation 147)

$$\text{Pop}_{la} \times \text{Rp} / S = \text{Db} \quad (147)$$

Source : auteur.

En termes de cumul, les valeurs sont plus fortes pour le métro que pour la RER. (Cf Tableau ci-dessous). La population est plus nombreuse pour le métro à proximité des stations. Néanmoins ses valeurs restent dans les valeurs couramment admises proche de 300 hab/hect pour le métro (cf chapitre précédent) mais pas pour le RER (100 hab/hect). Les moyennes par station sont nettement inférieures aux estimations 6,5 à 44,58 hab/hect. Elles varient selon des arrondissements que la ligne traverse. Ces densités ne renvoient pas aux capacités des lignes. Ainsi la ligne 1, plus capacitive, a une densité plus faible que la ligne 3, moins capacitive. Le fonctionnement du réseau l'explique, certaines lignes bénéficient de trafics plus importants par leur configuration en se substituant (ligne 14 à la place du RER) ou en partageant les centres activités (la défense partagée entre la ligne 1 et le RER A). Néanmoins, si le cumul renvoie à la ligne, ses interactions renvoient aux territoires proches des stations. Aussi c'est par station que doit se calculer la densité d'une ligne. Même s'il y a une dispersion, comme le montre les maximums, elle est la référence dans la densification. La « densité de ligne » sera la moyenne des densités autour des stations des lignes sachant qu'ici cette valeur est désagrégée *par arrondissements*.

Tableau 202 : répartition des densités population (hab/Km²)

A/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	D _b
1	1944		158	2160			1460	214		2	349	191		285	2387	35	4963
2	358		8054	4926	13		1329	2529	3125		104	138		125	578		12002
3	1125		6121	2657	2339		129	7874	2470		5228			24	745		16458
4	7329		125	1014	1143		2209	1222		10	2379			77	896	352	9516
5	337		178	5355	712		6191			4464	48			190	59	5577	13072
6	61			8468		718	49			3677	7	3797	997	5	55	1329	9846
7	19			2944		120	43	3840	443	1066		2547	2334	2			6296
8	1173	1290	1457			180	193	196	1610			973	1240	637	765		4220
9	3	3423	3536	253	8		3798	1102	4185			5335	1745	719	1747		14724
10		4318	470	5523	6140		9489	1507	1553		1802			0	0		19905
11	1273	6622	5294		3880	288	11	3300	14990		3264			238	3		25864
12	4364	393			459	5313	2	6289	542	30				3117	643		14292
13	1			30	2138	6371	6635			216				7307	962	299	15537
14				8751		2732	11			9		821	7291			3427	14771
15				487		6248		5857		4662		7849	1133				15936
16	2077	1712	131			3065			10221	2167		143	285	98	339		9358
17	3936	5475	7600			63						87	9577	59	947		15790
18		6176		8671	335		370					12014	3405		13		20601
19		2030	1	10	6856		10548				5327	121					16459
20	2417	5705	11456			138	31	3	5447		5018				313		20790
Cumul	26417	37143	44582	51248	24025	25235	42498	33934,3	44585	16301	23524	34015	28007	12884	10452	11021	
MOY	1761	3714	3429	3661	2184	2294	2500	2828	4458	1630	2352	2835	3112	859	653	1837	
Max	7329	6622	11456	8751	6856	6371	10548	7874	14990	4662	5327	12014	9577	7307	2387	5577	

Source : calcul de l'auteur

3-3) Effet de l'accessibilité sur la densité d'une ligne.

A partir de l'accessibilité réticulaire et de la densité de ligne nous simulons l'effet de la variation du maillage selon les lignes. Nous calculons les densités moyennes autour des stations selon la part du nombre de stations dans l'arrondissement vis à vis de la ligne (Cf Equation 148).

$$D_l = (P_{opac} \times P_{ts} \times C_{ti}) / (P_{mi} \times S_a \times P_{mod a}) \quad (148)$$

Source : calcul de l'auteur

D_l = densité de ligne P_{ts} = Ratio nombre de station de l'arrondissement/nombre de stations totales ligne
 C_{ti} = coefficient de répartition du trafic par arrondissement ; P_{mi} = parcours moyen $P_{mod a}$ = part modale de l'arrondissement A S_a = surface de l'arrondissement. Le nombre de station est basé sur les infrastructures (330). Les résultats sont donnés selon la moyenne (Cf Tableau 203)

Tableau 203 : densité par station sans maillage (Hab/Km²)

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B
Moy	1494	1774	1878	2022	2178	747	1179	1486	2041	678	1786	1032	1500	2237	488	1786

Source : calcul de l'auteur

Calcul d'une densité de ligne avec le nombre de station avec maillage (Cf Tableau 204)

Tableau 204 : densité par station avec maillage (Hab/Km²)

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B
Moy	475	556	617	605	432	640	346	441	1701	282	498	458	555	335	488	655

Source : calcul de l'auteur

La faiblesse du rayonnement des stations des lignes 6 et 9 les distingue. Le RER A ne diverge pas. Pour les autres lignes, les apports des arrondissements limitrophes baissent les densités. Aussi la densité par station d'un réseau moins maillé est plus forte que celle d'un réseau plus maillé pour un même trafic. Un maillage important permet donc un trafic important, avec une densité très faible, ce qui correspond au schéma des réseaux automobiles. Ce maillage est lié à l'accessibilité, plus le réseau est accessible, plus les densités baissent. A plus petite échelle, il correspond aussi à une moins grande spécialisation des motifs de déplacement. Le réseau métro est plus maillé *et* moins spécialisé.

4) Conclusion : Densité et trafic.

Nous vérifions que la densité modifie bien les entrants par station et donc les trafics selon les concentrations d'habitants à proximité. La relation qu'il existe sur le plan des arrondissements parisiens entre trafic et déplacement le montre. Néanmoins, là encore, si nous dissociions selon les lignes du réseau ferrés parisien la relation disparaît. Un phénomène déjà constaté à petite échelle sur le plan des secteurs EGT se reproduit à grande échelle sur le plan de la relation entre station et population dans les arrondissements parisiens.

Aussi, nous interrogeons sur les questions du maillage du réseau et de son effet sur son usage. Nous montrons une variation du nombre de station selon leur accessibilité grâce à la notion de zone d'attraction. Celle-ci intègre toutes les possibilités d'usage que le réseau permet grâce au nombre de stations disponibles dans le territoire. De 330 stations calculés selon l'usage principal, nous obtenons 729 stations selon les usages totaux.

Ensuite, nous définissons la notion de densité de ligne à partir des entrants dans les lignes. Elle reflète la moyenne des densités d'habitants dans chaque arrondissement à proximité des stations selon la part de trafic dédié à la ligne.

Nous simulons enfin l'effet du maillage et de la « micro-polarisation » des entrants dans la définition de la densité de ligne. La densité de ligne varie selon la proportion de station de la ligne. Plus le réseau est maillé, plus la proportion de stations utilisables augmente selon un même trafic. Pour un trafic et une part modale donnée, les habitants sont donc moins nombreux autour de chaque station. Le maillage fait donc décroître les densités pour un trafic donné. Les éléments à retenir sont donc que :

- La concentration d'habitants fait varier les trafics indépendamment de la part modale
- L'augmentation du maillage fait baisser la densité à proximité des stations pour un trafic donné.

Si nos résultats confirment nos hypothèses concernant l'effet de la densité sur le trafic, ils n'indiquent rien sur l'effet de l'offre sur la densification. Aussi nous nous interrogeons maintenant sur ce dernier afin que l'efficacité énergétique réticulaire du TC soit préservée vis-à-vis de la VP.

Chapitre 9 : Existe-t-il des limites de densité autour des stations pour lesquelles le TC présente un avantage énergétique par rapport aux autres modes ?

Introduction.

Nous venons de montrer l'existence d'une interaction entre densité et trafic à l'échelle réticulaire. Au travers de la concentration d'habitants, la densité augmente le trafic à part modale constante. Or l'offre de transport encouragerait la densification du fait qu'il correspond à cette demande. Néanmoins, comment l'offre modifie la valeur de densité ? De l'interaction entre densité et trafic ou passons à une interaction entre trafic et densité à l'échelle réticulaire en reprenant le métro dans le périmètre parisien.

Une relation d'induction semble exister entre offre et trafic ce qui justifie alors l'existence d'une inférence selon laquelle une offre importante favoriserait la densification. Néanmoins, la relation n'est pas claire dans l'état de l'art. Cet aspect est aussi valable pour la notion de « saturation » utilisée dans le modèle GLOBAL. Nous envisageons donc de valoriser le potentiel de densification à proximité d'une station à partir des taux de remplissage minimum et maximum (ou de saturation).

Or, notre valorisation s'effectue selon la compétitivité énergétique de la VP vis-à-vis du TC. Dans les modèles existants (IMPACT BEED...) il existe un taux minimal de remplissage à ne pas dépasser, afin que, dans des conditions techniques données, l'efficacité énergétique du TC soit plus importante que celle de la VP. Néanmoins, cette notion est valable pour les réseaux routiers, pour les réseaux ferrés, un point de complexité s'y ajoute : l'existence d'une composition des consommations spécifiques en dehors du véhicule.

Il nous donc examiner, dans une ligne de réseau ferré, comment ces taux réagissent à une variation de l'offre et de la demande, sachant que les consommations spécifiques se modifient indépendamment du véhicule, contrairement au réseau routier. Nous montrons alors que le taux maximum de remplissage n'implique pas nécessairement une efficacité énergétique pour le TC supérieure à celle de la VP. Une fois ces éléments concernant l'efficacité énergétique posés, nous nous intéresserons au potentiel de densification d'une station.

Or nous avons calculé une densité de ligne du réseau ferré parisien au chapitre précédent. Néanmoins nous ne connaissons pas la valeur, à partir de cette densité de ligne, du taux de remplissage dans les véhicules des lignes. C'est ce que nous calculons à partir d'une modélisation simplifiée de la circulation des lignes du réseau ferré parisien. Nous montrons alors que les valeurs de densité, dans le périmètre parisien, renvoient à des valeurs courantes de taux de remplissage issues des données RATP.

Nous nous interrogeons alors sur le potentiel de densification selon les taux de remplissage minimum et maximum à proximité des gares. La notion de potentiel de densité suggère une différence entre deux valeurs. Si le taux de remplissage minimum est le potentiel minimum, le taux maximal de remplissage est alors le potentiel maximum.

Les valeurs de densités doivent rester à l'intérieur de ces deux limites pour garantir l'efficacité énergétique tout en évitant le seuil de saturation. Nous simulerons des potentiels de densification en faisant varier les offres et la capacité dans le réseau ferré parisien. Deux étapes structurent le chapitre.

Une modélisation de l'efficacité énergétique selon les taux de remplissage maximum et minimum l'offre de transport d'un réseau ferré.

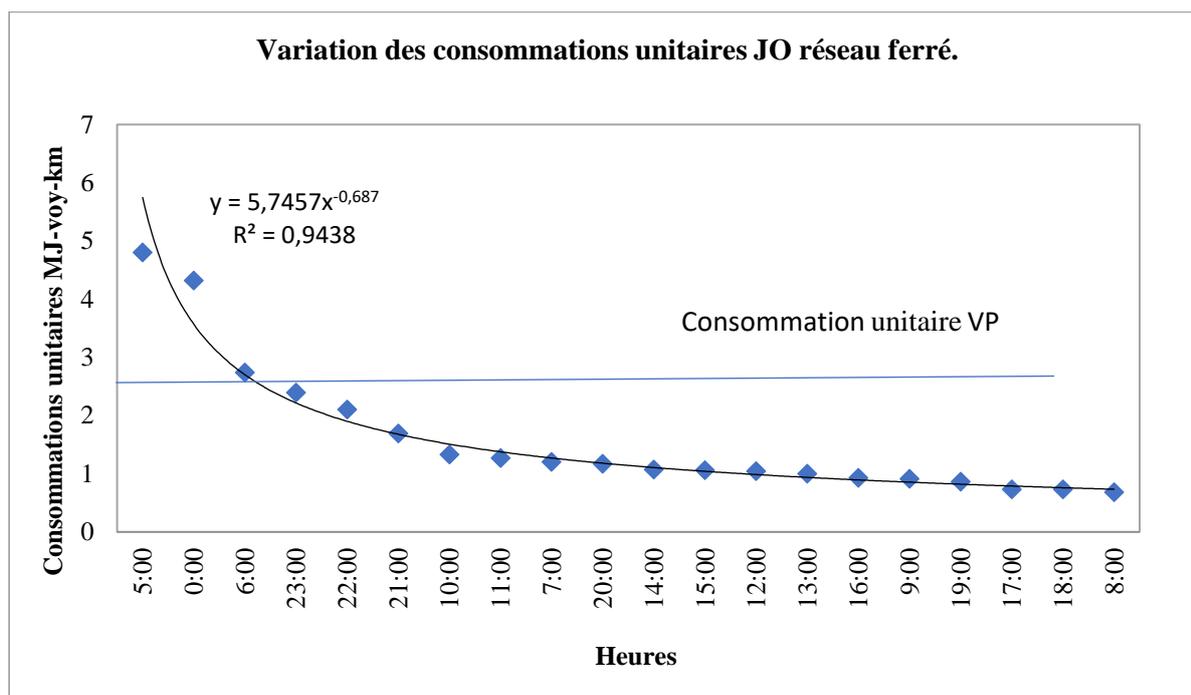
Un modèle de calcul des densités locales à proximité des stations à partir des taux de remplissage.

1) Offre et taux de remplissage du réseau ferré RATP : une approche empirique.

1-1) Effet de la hausse du taux de remplissage dans un véhicule : l'effet cumulatif.

Nous effectuons la courbe de consommation horaire moyenne annuelle du réseau ferré pour un jour ouvrable. La consommation unitaire à l'heure de pointe (08h00) représente 68% de la moyenne en JO. La ligne rose montre un point de convergence des consommations unitaires avec la VP atteint à 23h00. Les heures précédentes montrent un réseau ferré de TC moins efficace que la VP. (Cf Graphique 116).

Graphique 116: variation consommations unitaires réseau ferré



Source calcul de l'auteur

Hors JO, le coefficient « A » varie le samedi (5.7457) et le dimanche (9). Le seuil de convergence est atteint plus vite puisque les consommations unitaires VP baissent. Nous cherchons alors l'origine du phénomène dans les véhicules. Les masses à vide de plusieurs matériels et leurs vitesses des circulations moyennes des lignes sont connues, nous simulons une énergie selon la variation du nombre de voyageurs. Le théorème de l'énergie cinétique nous indique (Cf Equation 149).

$$W = \Delta E_c = 1/2 M (V_1^2 - V_0^2) = 1/2 (M_1 + M_2) \times \Delta V^2 \quad (149)$$

Source calcul de l'auteur

Avec $M = M_1 + M_2$ $M_1 =$ Masse à vide $M_2 =$ Masse des voyageurs. L'expression des consommations unitaires devient (Cf Equation 150)

$$W/N = 1/2 (M_1 + M_2) V^2 / N \text{ soit } W/M_2 = 1/2 (M_1 + M_2) \Delta V^2 / M_2 \quad (150)$$

Source calcul de l'auteur

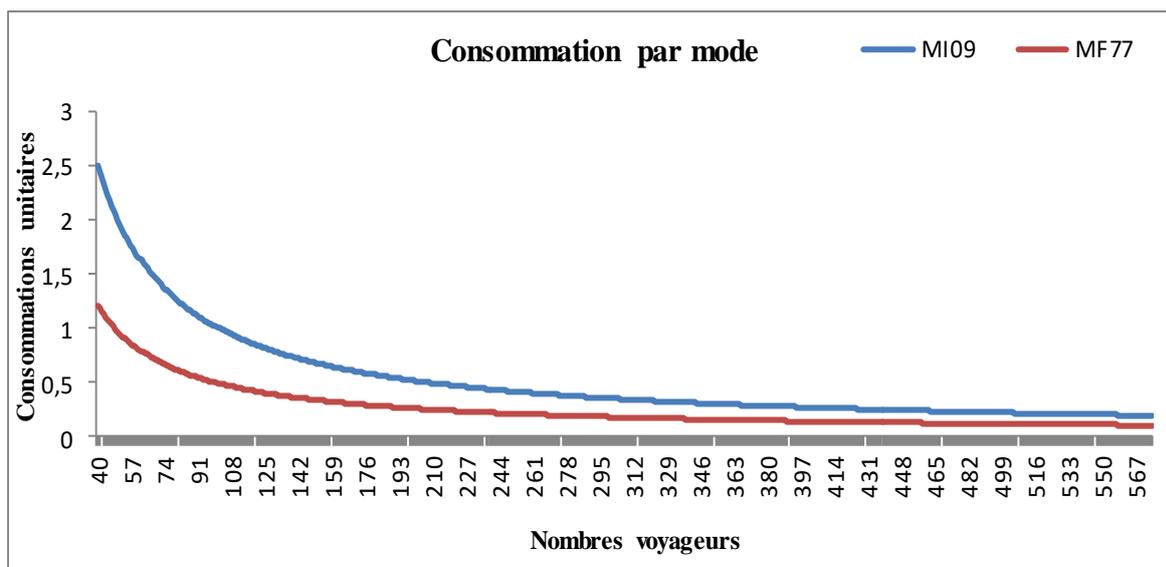
En effet un voyageur pèse 70 Kg selon la norme du modèle MARCADET donc $N \times 70 = M_2$. Nous cherchons l'origine de la forme de cette courbe dans les masses. Formellement (Cf Equation 151) :

$$R_m = (M1+ M2) /M2 = M1/M2 + 1 = M1/M2 \text{ (nous négligeons le 1) (151)}$$

Source : calcul de l'auteur.

Nous effectuons une simulation sur le MF 77 et le MI09. Nous égalisons les vitesses moyennes et le nombre de personne à 500. Le MF 77 est plus économe que la MI09. Les masses à vide plus importantes du matériel RER que celui du métro l'expliquent. Sur l'ensemble des matériels les formes de courbe sont identiques. Cet effet des capacités et des masses existe pour tout véhicule de transport. Pour une capacité donnée la courbe est convexe et de la même forme que la variation horaire des consommations unitaires du réseau ferré. (Cf Graphique 117).

Graphique 117: rapport des masses MI 09 et MF 77



Source : calcul de l'auteur

Le voyageur parcourt une certaine distance dans la ligne. Elle se charge plus ou moins. Le parcours moyen traduit l'indépendance de la charge moyenne vis-à-vis des densités locales. Plus il est grand, plus le trafic est indépendant des résidents locaux proches de la station ou de la gare. Cette indépendance fait varier le taux de remplissage pour une même offre. En effet, le taux de remplissage effectif des véhicules est celui des utilisateurs et non celui des entrants. Ces correspondances justifient la différence entre « trafic entrant » et « utilisations » qui fait la somme du trafic entrant et des correspondants dans les enquêtes TJRF. A la différence de la voiture, où l'absence de variation des taux de remplissage implique une croissance de sa consommation selon la distance parcourue, le TC augmente son efficacité énergétique et stabilise sa consommation (Cf Tableau 205).

Tableau 205: masse à vide des véhicules de transport en commun RATP (tonnes)			
RER		Métro	
MS 61	148	MF 67	123
MI 79 MI 84	208	MF 77	130.8
MI 09	288	MF 2000	125.1

Source : auteur

Si deux voyageurs parcourent 10 kilomètres, dont 9 ensembles, la consommation unitaire baissera de moitié sur cette distance. Le parcours moyen montre donc l'intensité des effets cumulés.

Plus il augmente plus l'effet cumulatif croît (Cf Tableau 206).

Tableau 206:efficacité énergétique en fonction des modes Mj/voy km		
Mode	Parcours moyen	Consommation unitaire
RER (A+B)	10.2	0,34
Métro	4.82	0,42

Source : auteur

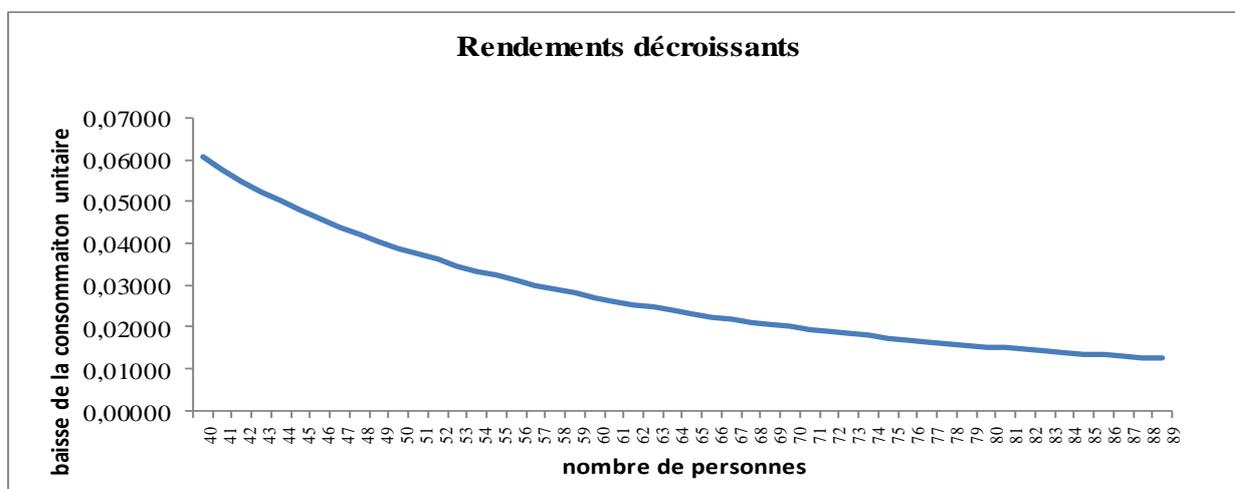
Aussi selon les parcours moyens des modes, l'efficacité se modifie. Cet effet cumulé, ne se rattache pas simplement à l'efficacité énergétique d'un véhicule de TC. En effet, à l'intérieur des réseaux routiers nous avons le même phénomène non pas dans un véhicule, mais dans une espace réticulaire. Plus le parcours moyen est élevé plus le réseau contient de véhicules. De même, pour un même parcours moyen plus le nombre de véhicules augmente vers les mêmes zones plus le flux s'accroît et les vitesses baissent. Cet effet cumulé modifie les consommations unitaires des voitures et les augmente. A l'inverse, plus le taux de remplissage augmente plus la consommation unitaires baisse pour le TC. Néanmoins, plus le taux de remplissage est élevé moins la consommation unitaire baisse. En effet à chaque individu (N) supplémentaire (Cf Equation 152) :

$$\Delta Cu_{(N+1, N)} = Cu_{(N+1)} - Cu_{(N)} \quad (152)$$

Source : calcul de l'auteur.

Avec des capacités pleines la différence est nulle pour tout mobile. Les rendements sont décroissants. L'augmentation du trafic en heure pleine est moins efficace qu'en creuses (Cf Graphique 118)

Graphique 118: les rendements décroissants TC



Source : calcul de l'auteur

1-2) Baisse du taux de remplissage à offre constante dans une ligne

Pour une consommation spécifique donnée l'indice de convergence permet de calculer un taux minimum de remplissage. Lorsque $I_c = 1$ nous avons $C_{u_{vp}} = C_{u_{tca}}$. La valeur de consommation unitaire $C_{u_{tca}}$ correspond à une consommation spécifique du TC constante C_{stc} (Cf Equation 153).

$$Cu_{tca} = C_{stc} / Tr_{tca} = Cu_{vp} \quad (153)$$

Source : calcul de l'auteur.

L'indice I_c devient (Cf Equation 154)

$$I_c = Cu_{tc}/Cu_{vp} = (C_{stc}/T_{rtc}) / (C_{stc}/Tr_{tca}) \quad (154)$$

Source : calcul de l'auteur.

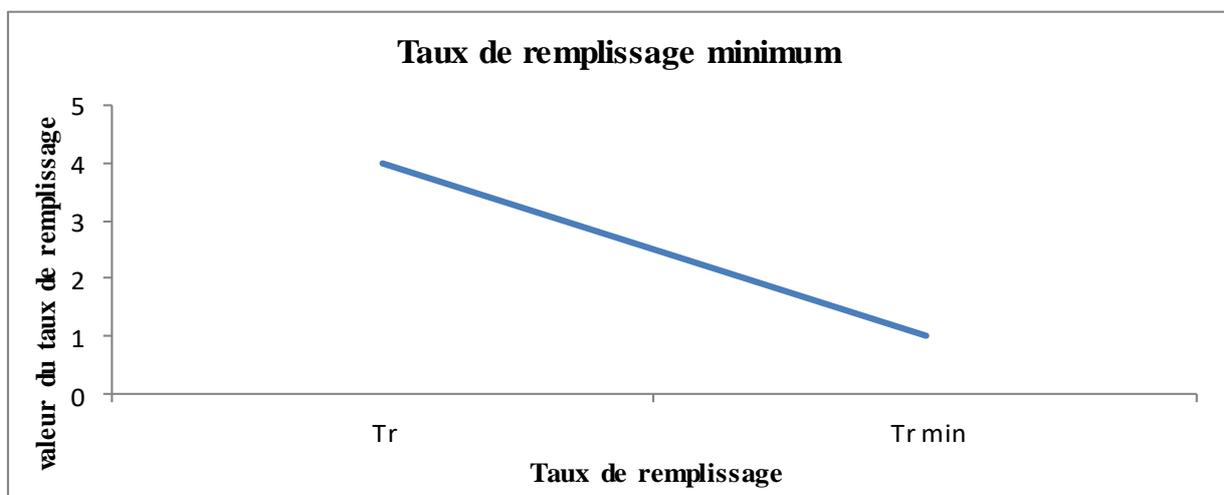
Le coefficient Tr_{tca} est le taux minimum de remplissage Nous obtenons donc :

$$I_c = Tr_{tca} / T_{rtc} \text{ soit } I_c \times T_{rtc} = Tr_{tca}. \quad (155)$$

Source : calcul de l'auteur.

Le taux minimum de remplissage est alors donné simplement à consommations spécifiques constantes. Pour l'illustrer, nous reprenons deux valeurs de taux de remplissage moyen (Tr) 4, et le Tr minimum égal à 1 soit l'égalité des consommations unitaires pour la même offre. Le coefficient directeur I_c de chaque ligne donne la pente de la droite selon le taux de remplissage. (Cf Graphique 119)

Graphique 119: taux de remplissage minimum.



Source : calcul de l'auteur.

Aussi le taux minimum de chaque ligne peut être facilement calculé. Nous construisons le tableau suivant pour calculer les taux minimums de remplissage des lignes du réseau ferré (Cf Tableau 207)

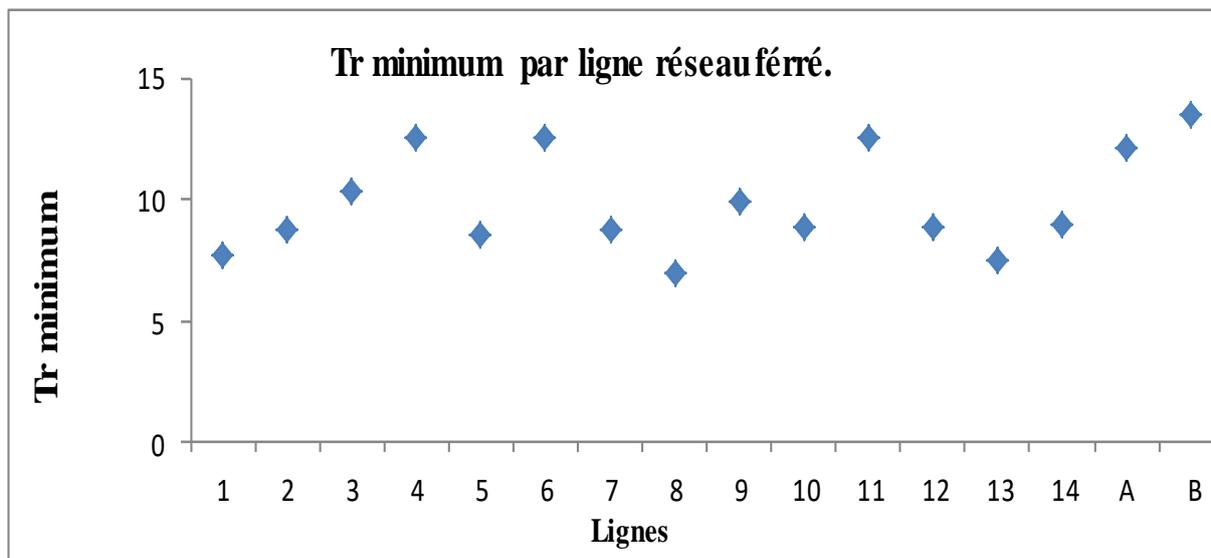
Tableau 207 : Données d'entrées ligne 1											
				Consommation		Consommation spécifique					
Lignes	KV	Trafic annuel	Parcours moyen	Lignes	Véhicules	Lignes	Véhicules	Eclairage	Tr moyen	Cu	Cu JO
1	24446840	176444522	3,56	620641296	450553419	25,39	18	7	26	0,99	0,91

Source : calcul de l'auteur.

Nous reprenons nos données de Kilomètre voiture (KV) par ligne les données de trafic et de parcours moyen et nous dissocions la consommation de la ligne et du véhicule. Nous calculons les consommations spécifiques des véhicules (18 Mj/Kv) et de l'éclairage (7Mj/Kv). Nous calculons alors la consommation unitaire moyenne (Cu) 0,99 que nous convertissons en consommation unitaire en JO Cu Jo 0,91 à un taux de remplissage moyen Tr moyen de 26 voyageurs km/Kv. L'offre ne varie pas, donc les consommations spécifiques non plus, seul le taux de remplissage varie. Nous le calculons alors à partir de l'indice de convergence qui est de 0,33 pour la ligne (0,91/2,76). Le taux minimum de remplissage est donc de 26 x 0,33 soit 8,88 pour la ligne 1.

Nous effectuons ce calcul pour toutes les lignes. Ces taux varient selon les configurations techniques des lignes (Cf graphique 120).

Graphique 120: taux de remplissage minimum par ligne



Source : calcul de l'auteur.

1-3) Variation de l'offre à trafic constant

Le transporteur peut baisser son offre par rapport à un trafic pour augmenter son taux de remplissage. Cela existe déjà. Les compositions des rames (de 3 ou 2 éléments RER) varient selon des JO ou non et des lignes (ligne 3bis métro). Le transporteur baisse ses fréquences donc les KV sur les jours non ouvrables. Les taux augmentent sur les véhicules restants. Nous repartons des données ci-dessus. La consommation spécifique d'un réseau ferré a deux parts, la consommation de l'éclairage et celle du véhicule. Nous en construisons une troisième la perte en ligne (Cf Tableau 208)

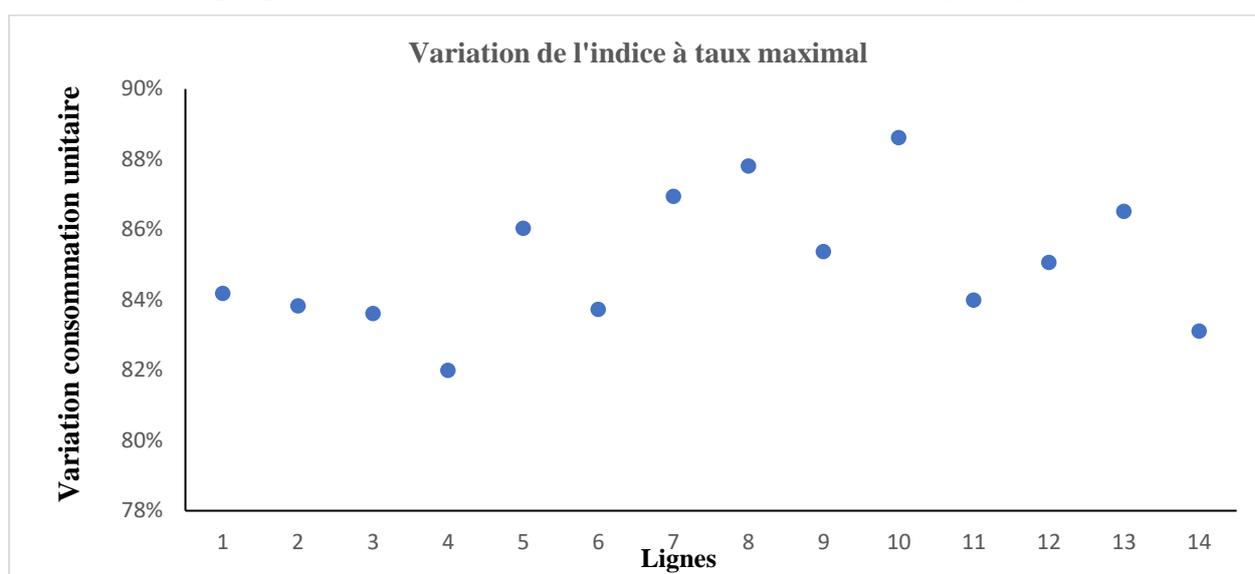
			Consommation Mj			Consommation spécifique (MJ/Kv)		Résultat variation de l'offre		
Offre	Taux max	KV	Eclairage	Pertes en ligne au taux max	Train	Eclairage à taux max	Perte en ligne	Consommation unitaire à taux max	Variation Cu	Variation de l'indice
68,00%	37,79	16623851	170087877	45956449	306376274	10,23	2,76	0,77	0,28	84%

Source : calcul de l'auteur.

Le coefficient de perte en ligne est fixé à 15% de la Cs véhicule (C_{SV}). Les pertes en ligne dépendent principalement du matériel. Même s'il existe une part fixe due à la résistance des rails, elle est mineure par rapport à la perte due à l'offre. Cette diminution de la part fixe est compensée par le fait que notre modèle n'intègre pas l'effet de la variation de l'offre dans la régénération d'énergie qui diminue avec l'augmentation de l'intervalle. Il n'intègre pas non plus l'effet de la modification de l'offre de transport c'est-à-dire la marche type sur la charge roulante. Même à vitesse moyenne constante, l'effet des « marches types » peut modifier par l'intermédiaire des appels de puissance la consommation d'énergie (SEILER & LEDUC, 2011). Ils n'intègrent pas l'effet des infrastructures (pentes, courbes, longueur des interstations...) sur la circulation.

C'est donc un modèle *très simplifié* de consommation d'énergie des lignes construit à partir des statistiques de la RATP. Nous diminuons alors le taux de remplissage moyen pour atteindre le taux de remplissage maximum. Il est obtenu à partir des consommations unitaires moyennes en heure de pointe qui représente 68% de la consommation unitaire moyenne d'un JO sur les lignes du réseau ferré considérées comme uniformes ($Tr_{max} = Tr_{moyen} / 0.68$). Ce taux est alors la limite de remplissage des trains autrement dit un seuil de saturation. Nous calculons à partir du taux de remplissage maximum l'offre de KV nécessaire et nous retrouvons alors 68% de l'offre ce qui est conforme aux données d'entrée. Néanmoins, cette diminution de l'offre n'intervient pas sur l'éclairage qui reste constant. Si les consommations spécifiques des pertes en ligne ou du train restent constantes, les consommations spécifiques de l'éclairage augmentent avec la baisse du nombre de KV. Au lieu de de 7 Mj/KV nous obtenons 10.23Mj/KV. Cette variation de la consommation spécifique explique alors le fait que, malgré une baisse de l'offre de 68% sur toutes les lignes nous n'obtenons qu'une baisse située entre 82 et 88% de l'indice initial, au lieu de 68% comme nous aurions pu nous y attendre (Cf Graphique 121)

Graphique 121 : variation de l'indice à taux maximum de remplissage.



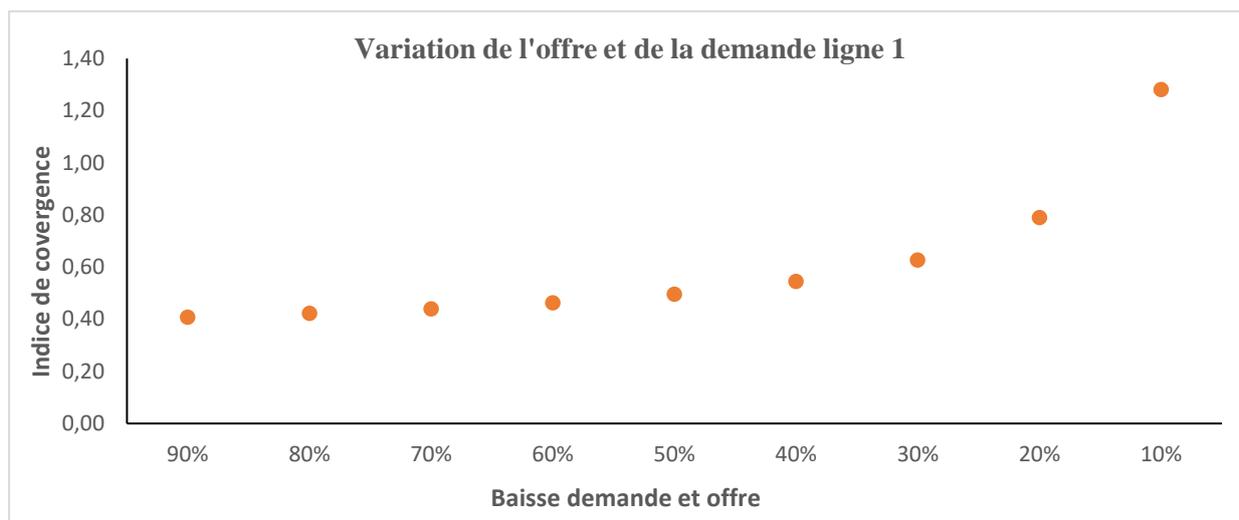
Source : calcul de l'auteur.

Contrairement au réseau routier, une baisse de l'offre, même si les trafics se reportent et que le taux de remplissage augmente, n'aura pas un effet linéaire sur les consommations unitaires.

1-4) Baisse de l'offre et du trafic à taux de remplissage constant

Nous maintenons le taux de remplissage moyen et baissions l'offre et le trafic. L'indice a une croissance non linéaire. Même s'il est simplifié, le modèle montre une réalité. La baisse de l'offre et du trafic en abscisse en pourcentage dégrade la consommation unitaire du réseau ferré de TC indépendamment du taux de remplissage (Cf Graphique 122).

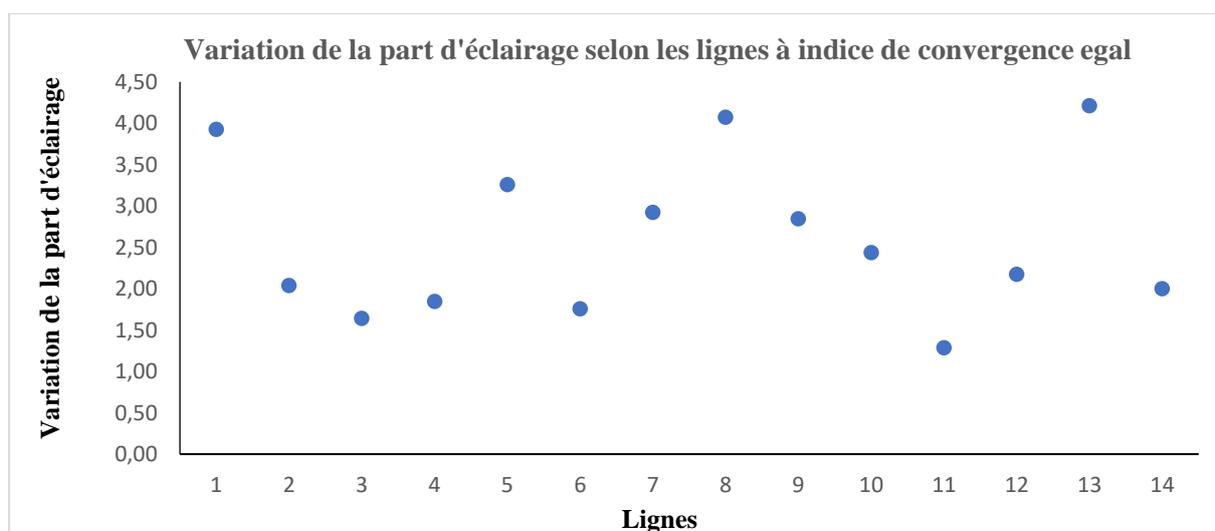
Graphique 122: indice de convergence réseau ferré.



Source : calcul de l'auteur.

Nous réduisons alors l'offre pour atteindre un Tr maximal et à partir de cette offre nous réduisons l'offre et la demande dans les mêmes proportions. La courbe est similaire pour le Tr maximum même si les consommations unitaires sont plus faibles, à 10% d'offre et de demande, le TC est convergent. Un TR maximum ne garantit donc pas l'efficacité quelque-soit l'offre. Même si un train ne roule pas, ses infrastructures consomment. Cette simulation renvoie à une réalité de l'infrastructure intégrée. La composition des consommations spécifiques modifie, indépendamment du taux de remplissage, l'efficacité énergétique. Dans la réalité, l'augmentation du taux de remplissage est plus efficace en heure creuse qu'en pleine. La baisse de l'offre en heure creuse pourrait être alors une occasion de baisser les consommations d'énergie tout en augmentant le taux de remplissage. Si cette baisse est efficace, elle a un seuil qui varie selon les lignes du fait des consommations d'éclairage fixe. (Cf Graphique 123)

Graphique 123 : part d'éclairage à indice égal



Source : calcul de l'auteur.

Cette part du taux d'éclairage varie selon les lignes, mais elle fixe une limite au-delà de laquelle pour une offre et un trafic donné l'efficacité est inférieure à celle de la voiture.

Aussi pour faire des économies d'énergie une baisse trop importante de l'offre en heure creuse aura des effets contraires à ceux attendus. Elle ne servira à rien. Cet aspect explique aussi la variation de la courbe d'efficacité énergétique que nous venons de voir.

En heure creuse, l'efficacité énergétique du réseau ferré est inférieure à celle de la voiture. C'est la conjonction de l'éclairage et du taux qui explique cette inefficacité. Il existe donc « un effet ciseau » qui s'applique au taux de remplissage maximum qui ne s'applique pas au taux de remplissage minimum. Ce dernier montre systématiquement la limite de compétitivité énergétique du TC vis-à-vis de la VP quelque-soit l'offre ou la demande.

1-5) Compétitivité énergétique et taux de remplissage dans le cadre d'une densification.

Deux éléments ressortent de l'analyse.

Le taux de remplissage minimum est un indicateur stable. Il indique quelque-soit l'offre que le seuil de compétitivité énergétique est atteint pour une ligne donnée.

Le taux de remplissage maximum renvoie à un seuil de « saturation » des véhicules pour une ligne donnée. Il ne garantit pas que la ligne soit compétitive à un seuil de 10% d'offre et de demande. Cela revient à augmenter les intervalles à une valeur de 20 minutes en heure de pointe ce qui n'est pas le cas actuel. Aussi ce seuil peut être utilisé en tant que maximum dans une heure de pointe ou nous pouvons supposer que 100% du trafic est assuré. Nous évaluons donc les potentiels de densité selon l'efficacité énergétique des réseaux ferrés et de la VP par les taux de remplissage minimum et maximum

2) Densité et efficacité énergétique : l'exemple du réseau ferré parisien.

2-1) Evaluation d'un taux de remplissage à partir du trafic entrant des lignes à offre constante

Nous cherchons à établir le taux de remplissage moyen d'une ligne due aux habitants de Paris. Nous restreignons donc le périmètre d'analyse aux lignes du métro parisien. Nous calculons la charge moyenne par ligne selon les trafics entrants calculés au chapitre précédent. (Cf Tableau 209)

A/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	5302	0	338	4435	0	0	4284	712	0	5	709	492	0	872
2	325	0	5736	3370	12	0	1299	2802	3175	0	70	119	0	127
3	1047	0	4467	1862	2147	0	129	8938	2571	0	3623	0	0	25
4	10728	0	144	1118	1650	0	3478	2181	0	14	2592	0	0	126
5	557	0	230	6652	1159	0	10990	0	0	7200	59	0	0	352
6	79	0	0	8209	0	875	67	0	0	4628	6	4629	1612	8
7	39	0	0	4543	0	233	94	9596	1016	2136	0	4942	6008	4
8	6865	5916	6682	0	0	996	1216	1399	10527	0	0	5386	9107	4177
9	7	6364	6573	452	18	0	9693	3188	11098	0	0	11980	5199	1911
10	0	8873	966	10903	15875	0	26769	4817	4553	0	3517	0	27	0
11	3986	16252	12994	0	11981	854	38	12600	52484	0	7608	0	0	835
12	22377	1579	0	0	2322	25791	13	39316	3106	151	0	0	0	17912
13	5	0	0	124	11712	33500	39655	0	0	1172	0	0	0	45493
14	0	0	0	29517	0	11587	55	0	0	39	0	3482	41022	0
15	0	0	0	2048	0	33008	0	39849	0	25432	0	41466	7936	0
16	8731	5640	433	0	0	12199	0	0	48036	8904	0	571	1503	464
17	13198	14389	19973	0	0	200	0	0	0	0	0	275	40323	223
18	0	17492	0	23592	1194	0	1440	0	2	0	0	41102	15451	0
19	0	7214	4	35	30659	0	51472	634	609	0	17984	521	51	0
20	8613	15933	31995	0	0	465	119	13	21700	0	13312	0	0	0
Σ	81860	99654	90537	96862	78734	119712	150819	126053	158885	49691	49492	114977	128254	72543

Source : calcul de l'auteur

Nous évaluons alors l'offre de transport sur la période de pointe dans le réseau ferré parisien à l'intérieur de Paris. Nous évaluons le temps de trajet du véhicule sur la ligne (T) donnant un nombre de train (NT) en circulation. Nous ajustons l'intervalle (I) selon les données réelles sur les lignes. Ils sont donnés en centième et correspondent à l'heure de pointe dans les statistiques. Nous calculons alors l'offre de KV au travers du nombre de voiture (NT x V) sur la voie (L). (Cf Tableau 210).

Ligne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Longueur	16,6	12,3	13	10,6	14,6	13,6	22,4	22	19,5	11,6	6,3	13,9	16,5	7,8
Vitesse	27,4	21,6	21,7	20,9	25,1	24,4	23,2	25,7	23	24,5	25,4	25,1	26,4	41,2
T = L/V	36	34	36	30	35	33	58	51	51	28	15	33	38	11
Nbre Train (NT)	19	18	19	16	19	18	31	25	27	13	8	16	20	6
I = T/NT	1,55	1,54	1,54	1,54	1,50	1,51	1,52	1,63	1,53	1,71	1,52	1,65	1,53	1,54
Voiture	6	5	5	6	5	5	5	5	5	5	4	5	5	6
KV = NT x V x L	1892,4	1107	1235	1018	1387	1224	3472	2750	2632,5	754	201,6	1112	1650	280,8
Par heure (H) = 60/T	1,65	1,76	1,67	1,97	1,72	1,79	1,04	1,17	1,18	2,11	4,03	1,81	1,60	5,28
Sur la ligne = HxKVx2	6247,2	3888	4123	4013	4769	4392	7192	6425	6210	3185	1626	4016	5280	2966,4
Trafic Voy-Km	81859,6	99654	90537	96862	78734	119712	150819	126053	158884	49691	49492	114977	128254	72543
Taux remplissage issus habitant	13,10	25,63	21,96	24,14	16,51	27,26	20,97	19,62	25,59	15,60	30,45	28,63	24,29	24,45
TR moyen	26	19	20	27	22	24	20	18	24	15	20	18	23	19
TR max	38	27	30	40	32	35	30	27	35	22	29	27	33	29
TR min	8,88	10,16	11,98	14,46	9,89	14,48	10,16	8,00	11,49	10,21	14,53	10,25	8,71	10,34

Source : calcul de l'auteur

A partir des longueurs des voies et des vitesses moyennes, nous calculons alors l'offre par heure d'un train (H) que nous multiplions par deux pour obtenir la ligne qui se compose de deux voies. Nous la ramenons à la période de pointe du matin correspondant aux entrants calculés. Nous effectuons alors le rapport entre la charge moyenne ci-dessus et l'offre de transport supposée constante, nous obtenons alors le taux de remplissage moyen du aux entrants du réseau en intégrant le taux de correspondance à l'entrée du réseau.

Le taux est proche des moyennes en restant entre le TR minimum et maximum sauf deux lignes 11 et 12. Le résultat présenté reflète un réseau isolé à son périmètre territorial parisien. Il est donc normal que les taux n'atteignent pas le TR maximum comme nous aurions pu le penser pour le trafic domicile travail. En effet :

1. Seules les lignes 2, 6 et 14 sont entièrement intégrée à Paris ce qui signifie que le réseau comprend des territoires extérieurs à la ville ce qui implique une variation du taux de remplissage. La part des trafics issus des bouts de lignes, dont les pourcentages varient selon les communes, situés en dehors de Paris représente 21% du trafic.
2. Les rabattements ensuite. Pour les autobus et voiture, 15% des entrants. Les arrivants des gares, représentent 38% des entrants du réseau ferré parisien sur la tranche horaire.

Pour les lignes 11 et 12, les taux sont proches des maximums. Néanmoins, il est possible que ces Taux maximum soient minimisés parce qu'ils sont issus d'une norme basée sur 78% du trafic. Leurs taux maximums sont peut-être plus importants. Les résultats sont donc cohérents par rapport au périmètre même si le modèle que nous employons est largement simplifié. En effet, il n'existe aucune réserve de temps calculée lors de la circulation, ni de temps d'arrêt en station. Les interstations et les caractéristiques spatiales de la ligne ne sont pas intégrées tout comme l'adéquation des marches-types. Néanmoins, un modèle de circulation classique pourrait largement se substituer à ce type de modèle selon le trafic prévisionnel issu des densités. L'indicateur employé ici, le taux de remplissage, vérifie l'adéquation de nos calculs avec la réalité.

2-2) Du taux de remplissage aux densités à offre donnée.

Nous partons du taux de remplissage pour en déduire une densité par station moyenne. Ce calcul ne préjuge pas de la disponibilité de la surface située aux abords. Nous reprenons les calculs d'offre de transport ci-dessus que nous inversons. Nous calculons tout d'abord le trafic à partir du taux de remplissage et de l'offre (Cf Equation 156)

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_r \times \mathbf{K}_v \quad (156)$$

Source : auteur

T_r = taux de remplissage K_v = offre de transport Nous répartissons ce trafic selon le nombre de station par arrondissement (Cf Equation 157)

$$\mathbf{T}_{sa} = \mathbf{T} \times \mathbf{P}_{sa} \quad (157)$$

Source : auteur

P_{sa} = part des stations dans l'arrondissement. Nous calculons alors la densité par station (Cf Equation 158)

$$\mathbf{D}_{sa} = (\mathbf{T}_{sa}) / (\alpha \times \mathbf{R}_p \times \mathbf{S}_a) \quad (158)$$

Source : auteur

D_{sa} = densité par station α = part modale R_p = ratio population/population active S_a = surface de l'arrondissement a.

Nous calculons alors la densité de ligne avec la moyenne des densités de station (Cf Equation 159)

$$D_l = \text{Moyenne de } D_{sa} \text{ (159)}$$

Source : auteur

La densité des stations renvoie aux surfaces réelles autour des stations du réseau parisien. Le modèle estime donc pour une offre donnée le potentiel de densification de l'habitat d'un environnement immédiat d'une gare à partir du taux de remplissage, pour une part modale donnée avec pour mode d'accès à la station le mode MAP. Nous supposons une surface circulaire ce qui renvoie aux émissions de déplacement. Dans notre modélisation, nous supposons que ces surfaces sont inhabitées et nous placerons dans l'installation d'une infrastructure de réseau ferré autour de laquelle nous choisirons une valeur de densification.

2-3) Potentiel de densité à partir des taux de remplissage actuels.

Si nous reprenons nos seuils de taux de remplissage minimum et maximum, il existe alors une densité qui permet d'obtenir le premier trafic à taux de remplissage minimum et une autre qui permet d'obtenir le taux maximal de remplissage à trafic maximum. Nous effectuons cette opération selon l'efficacité énergétique. Ce potentiel de densité varie pour une ligne existante selon les taux de remplissage (Cf Tableau 211).

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Densité Tr maximal	7567	1277	4641	4942	2649	1906	3563	1856	2647	1794	1851	2041	2162	2363
Densité Tr minimal	1778	473	1864	1768	812	778	1211	546	863	839	928	788	565	855
Potentiel de densité	5788	804	2777	3174	1838	1128	2352	1309	1785	956	923	1253	1597	1508

Source : calcul de l'auteur

Basé sur les caractéristiques de chaque ligne la densité moyenne pour le TR minimal varie de 1864 à 473. Cela est dû au fait que nous prenons l'exemple d'une ligne existante, avec des fonctionnements réels. Dans l'absolu, pour une ligne ayant les mêmes caractéristiques techniques située en deux endroits différents, les densités seraient les mêmes. Ensuite, il correspond au réel, les densités sont largement dépassées à proximité des stations dans Paris où le taux de densité est en moyenne de 20000 hab/km². Néanmoins, du fait de la spécialisation du TC cette « densité minimale » est maximale au sens où les trafics diminuent par la suite. Elle reflète le moment où le TC est le plus utilisé. Aussi, pour les autres heures de la journée le Tr sera inférieur et l'efficacité du TC plus faible. L'aménageur ou le transporteur a alors le choix de cesser le service ou de le continuer même s'il est moins efficace que la voiture. La densité maximale constitue un plafond « infranchissable » puisqu'au-delà les limites de capacité sont franchies. La ligne n'est plus adaptée, le trafic maximal est l'indicateur de la congestion « absolue » c'est-à-dire insupportable pour un fonctionnement nominal. Aussi ce modèle peut fixer un taux de densité désirable selon une offre variable. Il a alors l'avantage non négligeable, pour une infrastructure donnée, de prévoir les conséquences spatiales d'une offre de transport en termes de résidences.

2-4) Offre et potentiel de densité

2-4-1) Calcul du potentiel de densité

Nous faisons varier l'offre par l'intermédiaire des capacités des lignes (9 minutes d'intervalle proche de l'offre minimum actuelle sur le métro) sans effet ciseau. Nous observons alors une baisse des densités minimums. Elles rejoignent les valeurs de la GC (Cf Tableau 212).

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Taux maximal	287	45	174	157	96	66	215	99	140	53	29	71	84	28
Taux minimum	67	17	70	56	30	27	73	29	46	25	14	27	22	10
Potentiel de densité	219	29	104	101	67	39	142	70	95	28	14	43	62	18

Source : calcul de l'auteur

Ce résultat n'est pas surprenant. Si l'offre baisse alors la densité baisse pour une part modale donnée. Pour un autobus qui aurait la même efficacité la densité est dix fois moindre par rapport à la densité minimum initiale ce qui reflète l'effet des capacités sur le besoin de densité. Ces résultats permettent d'envisager un déploiement en GC d'autant que le rabattement amplifie l'usage d'autres modes de TC moins capacitaires tandis que les correspondances multiplient les points d'arrivée du réseau.

2-4-2) Effet de la diminution des parts modales sur le potentiel de densité

Pour une part modale très faible (0,10) ce qui est le cas en grande couronne nous retrouvons des densités minimums beaucoup plus fortes. Si la part modale baisse l'efficacité de la densité en tant que pourvoyeuse de trafic baisse et donc pour un même trafic le besoin de densité augmente (Cf Tableau 213).

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Taux maximal	1545	269	996	898	633	397	1259	566	810	284	171	386	441	150
Taux minimum	363	100	400	321	194	162	428	167	264	133	86	149	115	54
Potentiel de densité	1182	170	596	577	439	235	831	400	546	151	85	237	326	96

Source : calcul de l'auteur

2-5) Variation du potentiel de densité avec intégration des correspondances.

Les correspondances ont deux effets. Elle diminue les taux de remplissage maximum et les taux minimums de remplissage. Il y a donc décalage des valeurs. Si nous reprenons nos résultats avant l'intégration des correspondances du réseau ferré nos résultats étaient les suivants (Cf Tableau 214) :

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Densité Tr maximal	8167	1378	4771	5334	2859	2057	3638	2003	2857	1937	1998	2203	2334	2551
Densité Tr minimal	1778	473	1864	1768	812	778	1211	546	863	839	928	788	565	855
Potentiel de densité	6389	905	2907	3566	2048	1279	2427	1457	1995	1098	1070	1415	1769	1695

Source : calcul de l'auteur

Après l'intégration des correspondances (Cf Tableau 215) :

Lignes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Densité Tr maximal	5554	799	3149	3467	1887	1070	2510	1342	2029	1259	1219	1586	1260	1275
Densité Tr minimal	1209	274	1231	1149	536	404	835	366	612	545	566	568	305	428
Potentiel de densité	4344	525	1918	2318	1352	665	1675	976	1416	714	653	1019	955	848

Source : calcul de l'auteur

Notre modèle intègre donc l'effet du maillage sur les densifications locales. Il est adapté à une ligne mais aussi à un réseau. Il peut aussi intégrer les effets du rabattement qui interviendront de la même manière que les correspondances.

3) Conclusion du chapitre : Intérêts et limites du modèle.

L'indicateur « offre de transport » regroupe les caractéristiques techniques de l'exploitation (longueur vitesse fréquence, capacité), tandis que le taux de remplissage regroupe le trafic entrant et le parcours moyen des voyageurs c'est-à-dire la demande. Le réseau ferré diffère du routier dans la consommation d'énergie. Les variations de son offre n'ont donc pas les mêmes effets sur l'efficacité énergétique que celle d'un TC en mode routier. Nous montrons alors un effet ciseau dû à la baisse de l'offre et du trafic, c'est-à-dire une dégradation des performances énergétiques à cause des consommations spécifiques et en particulier des consommations fixes. Les deux taux de remplissage maximum et minimum sont suffisamment stables pour évaluer la densification « sobre » énergétiquement.

Ensuite, nous cherchons comment le trafic issu des densités locales modifie le taux de remplissage. En décrivant l'effet des entrants sur le taux de remplissage nous passons d'une perspective statique à une perspective dynamique tout en contrôlant nos valeurs. A partir d'un modèle simplifié de fonctionnement d'une ligne de métro, nous retrouvons à partir des densités locales un trafic et donc un taux de remplissage. Nous vérifions ce taux par rapport à nos estimations de trafic du chapitre précédent. Nous retrouvons des valeurs en adéquation avec la réalité. Les taux de remplissage sont les variables de passage entre efficacité énergétique et densification. Nous pouvons donc retourner le déroulé et trouver une densité locale par station et par ligne à partir du taux de remplissage. Nous définissons la notion de potentiel de densité, nous calibrons la demande selon l'offre avec des taux de remplissage minimum et maximum de la ligne. L'efficacité énergétique est toujours garantie vis à vis de la VP, du fait que ce taux minimum est celui qui égalise les consommations unitaires. Le taux maximum renvoyant à la congestion. La densification aux abords des TC a un effet direct sur les taux de remplissage. Une densification qui irait au-delà provoquerait des congestions voire des reports modaux. Il montre aussi l'intérêt de la baisse des capacités roulantes des TC dans des milieux faiblement denses, l'effet des correspondances, des parts modales sur les valeurs de densités. Il peut dégager des scénarios et suivre des évolutions. Il nous permet enfin de retrouver des constats antérieurs : il n'existe pas seuil de densité pour le TC. Il peut se mettre en œuvre sur une ligne existante ou une ligne à créer. A notre connaissance, il s'agit du premier modèle de transformation spatiale selon une offre de TC à partir de l'efficacité énergétique.

Il intègre les effets de la variation de l'offre sur la ligne. Il peut aussi intégrer les rabattements, assez simplement du reste, puisqu'ils sont additifs dans le taux de remplissage. Ces rabattements renvoyant à des échelles plus petites, ce modèle peut alors être multiscalaire. Il peut donc tenir compte de l'interaction des territoires selon la ligne. La densité peut à son tour servir d'indicateur pour une croissance locale de la rente foncière. Nous pouvons aussi faire varier la surface selon les nuisances (bruit en particulier). Notre modèle intègre les effets du maillage ou des reports modaux. Il peut à partir de parts modales données fixer un potentiel de densification.

Dans le cadre de l'installation d'une nouvelle ligne et de l'accompagnement immobilier, ce modèle ne préjuge pas de la variation des parts modales qui renvoie d'abord à l'activité, au temps, et donc l'interaction des variables réticulaires et spatiales à l'échelle régionale. En effet, nous avons pris pour exemple des lignes de métro ce qui implique un trafic constaté à partir d'une concentration d'activité et d'une part modale donnée. A partir de ce cadre, nous envisageons un potentiel de densification selon le taux de remplissage. Nos valeurs évaluent alors des potentiels de densification et des situations différentes selon les offres et les capacités des réseaux ferré. Il intègre l'effet des correspondances. C'est donc un modèle réticulaire d'interaction entre offre de transport et densification. La variation des parts modales pouvant être établit selon les modèles 4 étapes il apparait une complémentarité entre les deux approches la prévision des parts modales pouvant intégrer des potentiels de densification selon une charge donnée.

Il s'agit donc d'un modèle « espace-énergie » à grande échelle modulable selon les offres et les aménagements d'habitats à proximité d'une ligne de transport en commun.

Conclusion section 2:

La densification est d'abord un choix d'aménagement du territoire, le renversement de perspective conduit à des interrogations nouvelles dans le choix de densifier à proximité des réseaux ferrés de TC parisien. Les modèles 4 étapes actuels sont aveugles aux modifications de la densité à proximité des stations. Les modèles énergétiques ne décrivent pas dans le détail les effets d'une variation du taux de remplissage dans les réseaux ferrés.

Le potentiel de densification implique un questionnement sur l'effet des trafics reçus sur l'efficacité énergétique dans le cadre des aménagements proches des gares. Nous montrons que nous pouvons lier l'habitant et le voyageur à l'émission du déplacement pour le réseau ferré parisien ce qui nous permet :

1. D'évaluer une densité de ligne
2. D'évaluer sa variation selon le maillage.

Ensuite, à partir d'un modèle énergétique des lignes du réseau ferré parisien nous montrons comment les consommations unitaires réagissent à la variation de l'offre et du trafic dans les réseaux ferrés. Nous montrons qu'elles ne varient pas de manière linéaire même si le taux de remplissage est maximum. Aussi ce dernier est un indicateur stable pour une offre suffisante de transport c'est-à-dire un intervalle ne dépassant pas 20 minutes.

Nous cherchons alors à évaluer un taux de remplissage à partir des effets de la densité. Il implique alors une description de la relation entre l'habitant et le voyageur dans la chaîne du déplacement. Il apparaît alors que cette densification dépend de l'offre de chaque ligne. Nous calculons alors le potentiel de densité du réseau ferré parisien à offre donnée selon les taux de remplissage minimum et maximum. Nous calculons aussi la variation de l'offre sur le potentiel de densité. Cela permet d'envisager le déploiement des lignes dans des secteurs faiblement denses. Ces valeurs de densité relativisent le besoin de densification. Nous finissons en montrant l'effet de la part modale sur le besoin de densification ;

L'intérêt de ce modèle est double parce qu'il permet en fonction d'un taux de remplissage et de projeter une valeur de densité. Il est adaptable à plusieurs situations. Dans notre cadre, nous l'avons calibré sur une efficacité énergétique à partir d'un taux de remplissage. Nous pouvons aussi le calibrer selon le respect de mesures sanitaires et d'un taux d'occupation donné. Nous pouvons donc estimer une densité minimum afin de respecter des règles sanitaires dans les transports publics.

Nous pouvons évaluer sous forme de densité, les effets d'une variation des techniques d'exploitation sur le taux de remplissage ce qui renvoie à leur effet sur les usages du sol. Néanmoins ce modèle peut aussi parfaitement répondre aux préoccupations actuelles liées à l'interaction de l'offre de la densification et du report modal compte tenu des priorités affichées au travers des densifications.

Il montre enfin que la densification ne peut être envisagée indépendamment de l'offre et de la capacité de la ligne à relier des centres d'activités dans lesquels peut être envisagé une densification d'habitat. Il constitue un complément utile aux modèles quatre étapes

Conclusion partie 2

La forme urbaine polarise les flux de déplacement selon 4 formes particulières. La forme monocentrique est le premier de ces modèles renvoie à une répartition spécifique des densités. La relation densité forme urbaine proviendrait d'une forme particulière la forme monocentrique. Plusieurs études montrent une variation de l'efficacité énergétique et de ses facteurs spatiaux, parts modales et portées, selon les densités. Son effet s'accompagnerait de développements plus locaux ce qui implique alors l'interaction de deux échelles dans l'usage. Elle baisserait les vitesses ce qui s'expliquerait par la réciproque de la conjecture de Morigridge. Néanmoins, la forme urbaine de l'IDF évolue et devient mono-polycentrique. En effet, les formes réticulaires l'influencent. Les vitesses sont un facteur permissif de cette modification. Néanmoins, les réseaux ne structurent pas à eux seuls la forme urbaine c'est bien l'interaction des marchés fonciers et des réseaux qui la produisent. L'effet rebond reflète cette mutation. Aussi, la relation existe-t-elle en IDF puisque la forme urbaine se modifie ?

Une rapide étude sur la base UITP montre que l'effet de la densité sur l'efficacité énergétique est discutable. En IDF, l'existence d'un effet rebond atteste cette modification en GC et explique l'augmentation des consommations par habitant constatée en première partie. Nous retrouvons aussi des résultats antérieurs puisque selon les densités des couronnes pour observons une variation des consommations par déplacement. Néanmoins, un effet de forme dû à l'échelle peut exister. Nous changeons alors d'échelle. Nous reproduisons alors l'effet des densités sur l'efficacité énergétique dans les secteurs EGT. Nous constatons une différence entre les modes et une variation des portées qui n'était pas constatée antérieurement. Nous retrouvons alors des résultats des études antérieures concernant la relation entre parts modales et densité.

Nous nous interrogeons sur l'existence d'une relation entre coûts généralisés et parts modales à partir du modèle « agrégé » GLOBAL de la RATP pour spécifier la fonction de coût généralisé dont la composition nous sert de référence pour calculer les nôtres. En effet, l'approche modélisée est qualitative et nous utilisons une approche quantitative. Nous vérifions les relations entre parts modales et la différence de coûts généralisés sur l'IDF. Nous montrons qu'il existe pour la MAP un coefficient dont le signe s'explique difficilement. Nous induisons un effet du sol. Nous montrons alors une relation entre densité et coûts généralisés, mais elle est inexpliquée du point de vue des motifs de déplacement. Nous nous interrogeons alors sur le contenu de la densité. Nous montrons que les concentrations d'activité modifient les parts modales par leur influence sur les facteurs réticulaires du déplacement (vitesses et portées) constitutif du temps.

L'aménagement du territoire modifie les arbitrages des individus par le fonctionnement des réseaux. Nous distinguons les effets direct et induit de la concentration d'activité sur ces variables (portée et vitesse).

Pour l'effet direct ou issu de la concentration, nous observons l'augmentation des parts modales du mode non motorisé du fait de la baisse des grandeurs des portées entre activités, l'échelle est alors le secteur. L'effet induit est issu de la répartition des concentrations d'activité, l'échelle est alors la région. Il se traduit par les vitesses dont la variation dépend des flux des réseaux. Or les flux de déplacement diminuent en jours non ouvrables provoquant des variations de vitesse profitables aux parts modales VP des résidents à Paris. Les motorisations varient aussi selon de l'écart de temps. Les décisions d'investissement des ménages semble se modifier. La disparition des relations selon les couronnes, constatée dans la littérature, vient des périmètres d'observation intégrant plus ou moins les flux de déplacement selon les densités d'activité et de résidence. Aussi, la polarisation régionale des déplacements explique les relations que nous constatons en IDF. Les polarisations locales n'ont pas les mêmes effets sur les facteurs spatiaux du déplacement expliquant aussi leur disparition. Aussi le problème posé par la relation ne renvoie pas à un problème d'échelle mais à l'interaction des deux dimensions différentes du territoire l'espace réticulaire et aréolaire.

Les densités ne modifient donc pas les parts modales, d'une part parce qu'elles ne constituent pas un motif de déplacement à destination et, d'autre part, parce que statistiquement il existe une relation forte avec les concentrations d'activité. Il n'existe pas de relation « espace-énergie » pour les densités ce qui n'est pas le cas des concentrations d'activités. En effet, il existe sur le plan régional une modification des choix modaux qui influence l'efficacité énergétique de l'habitant, mais aussi, du point de vue des réseaux motorisés, une relation avec les variables de la consommation d'énergie selon les portées et les vitesses.

Néanmoins, historiquement, l'usage des TC croît avec les densités. Aussi, comment modifieraient-elles les trafics, c'est-à-dire l'efficacité énergétique réticulaire ? La conception de l'aménagement urbain se tourne vers les réseaux avec le TOD. Cela nécessite d'évaluer la valeur des densités programmées à proximité des gares. La méthode node-place est multivariée et mélange des éléments liés au trafic et de réserve foncière. Cette méthode suppose une grande accessibilité à la gare et un effet favorable de l'offre sur la densification. L'accessibilité se conjugue avec l'effet de la proximité et sa capacité de réduire les temps d'accès à la gare ou la station. Dans nos données, pour les réseaux ferrés RATP l'usage de la MAP traduit cette conjugaison de la proximité et de l'accessibilité dans le mode précédent l'accès. Ensuite, le trafic est lié à l'offre de transport, néanmoins les modèles ne quantifient pas à grande échelle l'effet d'une infrastructure sur la densification locale.

Cela interroge la notion de saturation au travers de la quantité de trafic réelle issue des densifications à grande échelle et de l'indicateur utilisé, les flux horaires à taux de remplissage constant. La notion de potentiel de densification reste floue. Nous montrons tout d'abord la spécificité d'un réseau ferré vis à vis d'un réseau routier dans l'exploitation et l'efficacité énergétique. Dans les réseaux ferrés, la baisse de l'offre modifie cette efficacité indépendamment du taux de remplissage. Nous montrons alors l'existence de deux taux : minimum et maximum. Le taux minimum renvoie à l'égalité des consommations unitaires et le taux maximum à un seuil de saturation.

Nous nous interrogeons alors sur la relation entre densité et trafic et montrons des effets réticulaires et aréolaire distincts à grande échelle. Avec une matrice de répartition des trafics domicile travail mise en relation avec les déplacements du même motif, nous montrons que la densité modifie le trafic avec la concentration d'habitant à proximité de la station ou de la gare. Nous calculons alors une densité de ligne à partir des densités à proximité des stations. Nous montrons les effets de leur maillage. Nous calculons alors pour une ligne maillée ou non la densité moyenne à proximité des stations dans les arrondissements. La moyenne de ces moyennes est alors la densité de ligne, plus forte pour une ligne non maillée. Nous cherchons alors à déterminer un « potentiel de densité » efficace énergétiquement.

Nous montrons les variations de l'offre sur l'efficacité énergétique d'un réseau ferré selon les taux maximum et minimum de remplissage. A partir des densités de ligne nous calculons des taux de remplissage. Nous « renversons la logique » et calculons des densités selon des taux de remplissage ; Nous définissons le potentiel de densité des lignes comme la différence de la moyenne des densités des stations d'une ligne à taux de remplissage maximum et minimum pour un réseau non maillé. Nous montrons l'effet de la variation de l'offre sur les densifications. En adaptant leur capacité, le réseau de TC peut se développer dans des milieux faiblement denses tout en préservant leur efficacité énergétique. Nous montrons alors l'effet des correspondances sur ces valeurs.

Finalement, notre recherche de modélisation montre une relation entre l'espace et l'énergie sur le plan régional avec la relation statistique entre facteurs réticulaires et concentrations d'activité, mais aussi sur le plan réticulaire à grande échelle par la modélisation entre densité d'habitant et taux de remplissage.

Conclusion générale : Territoires et sobriété énergétique à l'heure des pandémies en perspective

Densité et efficacité énergétique : une relation complexe multiscale

L'objectif de cette thèse était de construire un modèle de densification autour d'une ligne de TC pour augmenter l'efficacité énergétique de la mobilité urbaine. Aussi, la relation entre trafic et efficacité énergétique devait être interrogée de manière multiscale. De nombreuses conjectures montraient que la densité déterminait la part modale et qu'elle même détermine le trafic nous pouvions légitimement supposer une relation entre densité et trafic à partir de la part modale. Néanmoins, cette hypothèse étant infondée, il nous fallait comprendre comment des constatations empiriques, le trafic TC croît avec la densité, pouvaient s'expliquer afin de construire notre modèle. Les enseignements de nos travaux sont les suivants :

1. L'efficacité énergétique renvoie à une combinaison de facteurs techniques et sociaux-spatiaux. Malgré une convergence, les TC restent plus efficaces dans le voyage.
2. Cette efficacité énergétique ne garantit pas la croissance des efficacités énergétique des habitants du fait de l'effet rebond que nous constatons en grande couronne.
3. « La forme urbaine » interagit bien avec la forme réticulaire et modifie les efficacités énergétiques des déplacements au travers des activités à deux échelles. La première à l'échelle des secteurs avec la concentration, c'est-à-dire la réduction des portées, la seconde à l'échelle régionale avec la réduction des vitesses issue des flux de déplacements.
4. Aussi dans une approche réticulaire, la densification dépend de la quantité d'habitant pour une part modale donnée. Le maillage permet une « déspecialisation » des motifs de déplacement pour le TC dans Paris et entraîne une baisse des densités à proximité des entrées du réseau pour un même trafic.
5. La densité d'habitant est donc un paramètre ajustable pour le développement des réseaux de TC selon des capacités de transport afin de déterminer des densités minimums aux entrées du réseau. Dans nos travaux, ces dernières sont déterminées pour garantir une efficacité énergétique du voyageur qui n'est jamais inférieure à celle de la voiture.
6. Il existe donc une relation entre espace et efficacité énergétique de l'habitant sur le plan régional et local. Si la concentration d'activité modifie les parts modales, la densité modifie l'efficacité énergétique réticulaire du TC vis-à-vis de la VP.

Quelles conséquences pratiques ?

Nos travaux montrent que le progrès technique est efficace s'il n'est pas réinvesti. L'accélération de la promotion du véhicule électrique interroge. Le recyclage et la production de batterie n'y sont que très rarement évoqués, le nucléaire n'émet pas de CO₂ mais est polluant à long terme (déchets).

En outre, « le plein » aura des pertes de distribution non négligeables. Enfin, son usage est limité ce qui spécialise ce véhicule dans la mobilité quotidienne ce qui n'est pas le cas de la voiture actuelle. Cet aspect d'usage modifie son efficacité environnementale. Ces questions ne peuvent être ignorées alors que les capacités de production électrique sont contraintes. D'autres vecteurs apparaissent (pile à combustible dont l'usage pourrait être plus flexible) moins polluants du puit à la roue si nous comptons l'ensemble des pollutions. Pour le TC mode spécialisé, la traction électrique, y compris pour les bus, cette transformation est totalement envisageable. Pour les réseaux ferrés de TC, c'est dans la conception des infrastructures qu'il faut rechercher l'efficacité énergétique. La plus économe couple les cuvettes souterraines et les gares en surface. Les gares à l'extérieur diminuent le besoin en éclairage artificiel. De plus, si la voie est à niveau du sol, les éléments attachés au transfert du voyageur vers le quai (escalier mécanique, trottoir roulant par exemple) deviennent inutiles. L'amélioration de la régénération en particulier au travers de la récupération de l'énergie perdue en heure creuse est en cours d'étude. La configuration des remorques augmenterait de 10% les personnes transportées.

La localisation des activités est essentielle à proximité des gares, le tissu mixte doit être envisagé à partir des activités. En effet, leur regroupement permet des dessertes à partir des habitats. Leur dispersion est peu recommandable. Nous pouvons relier deux concentrations séparées par un TC en priorisant des activités industrielles dans l'aménagement. Néanmoins, les réseaux ne suffisent pas à limiter l'urbanisation qu'ils permettent. Il est donc nécessaire de limiter les droits de construction sur les surfaces actuellement urbanisées sans extension à d'autres surfaces, et non simplement densifier à proximité de celui-ci. Il est nécessaire d'empêcher la création d'activité économique (ZAE, centre logistique...) sur les réseaux routiers qui n'ont pas de ligne de TC. L'autoriser près d'infrastructures de TC, quitte à augmenter le nombre de gares sur les lignes et baisser la vitesse d'exploitation. Des incitations économiques pourraient être utilisées pour l'encourager. Pour les activités économiques qui existent, le recyclage des ZAE existantes les densifie. La spécialisation des activités tertiaires ou non qui se dessine dans l'aménagement actuel n'est pas justifiée. Un rééquilibrage est nécessaire. En effet, une ségrégation spatiale sur l'activité risque de conduire avec l'augmentation des densités, et donc de la rente foncière, à une gentrification. Ensuite prioriser l'artisanat et les activités industrielles en première couronne mixerait les activités et lutterait contre la tertiarisation en cours et la construction de bureau dont la surproduction est inquiétante. La priorité est de densifier les activités en grande couronne et d'arrêter l'urbanisation de nouvelles zones pour privilégier les zones déjà bâties dans le cadre d'un recyclage. Centraliser la maîtrise publique des sols permettrait d'avoir une vision globale et limiterait les compétitions actuelles issue des lois de décentralisation.

La construction de réseau de TC est compatible avec des zones de faible densité, ce qui conduit alors à privilégier la grande couronne pour une densification plus importante. Le foncier est mobilisable à plus faible coût tout en limitant l'usage de la voiture pour le motif domicile travail. Cette approche pourrait venir en complément des déficits de construction de logement que le projet enregistre aujourd'hui. Les lignes existantes peuvent être prolongées avec une efficacité énergétique élevée. Les rabattements de TC permettent une extension de la zone de desserte à des milieux faiblement denses. La baisse des capacités du véhicule et des offres en heure creuse et une augmentation en heure pleine seraient possibles dans le cadre d'un service continu. Une recherche sur des mobiles modulaires, à variation de capacité, serait peut-être intéressante. De même, une réflexion sur les réseaux primaires routier en tant que support du TC serait sans doute à envisager pour le motif domicile travail. Des taxis collectifs pourraient assurer la navette jusqu'au réseau primaire à l'origine (ou, et) du réseau primaire à la destination, pendant que le TC assurerait le voyage entre les deux.

Au lieu d'un voyage avec trois tronçons de route utilisés dans la VP, nous obtiendrions trois voyages dans deux modes différents, l'inconvénient étant la rupture de charge. L'avantage étant une décongestion forte et une croissance des vitesses. En effet, un bus de trente personnes enlèverait trente véhicules. Pour Paris le problème est la congestion liée aux flux des non-résidents. Les mesures de réduction de la vitesse les pénalisent et sont inefficaces énergétiquement. C'est sur l'ensemble du déplacement qu'il faut organiser le report sans pénaliser les déplacements obligatoires sur leur partie finale.

Quelles recherches supplémentaires ?

A partir de ce premier travail plusieurs éléments mériteraient d'être approfondis :

1. Le dressage d'une cartographie de l'efficacité énergétique des habitants des territoire à grande échelle (intercommunalités, communes...) permettrait de faire un état des lieux et des comparaisons dans le cadre d'une politique de sobriété énergétique. L'indicateur créé en première partie le permet.
2. Etudier et comparer l'effet de la mobilité longue distance sur les consommations par déplacement des résidents.
3. Désagréger l'indicateur de la consommation par déplacement pour des parts modales dans les réseaux de TC et les chaînages seraient plus profitables pour les mesures.
4. Vérifier dans d'autres régions si nous reproduisons la même relation entre concentration d'activité et part modale.

5. Approfondir la relation entre écarts de temps et concentration d'activité. Cette relation n'est certainement pas univoque et causale puisque d'autres facteurs entrent sans doute en jeu. Néanmoins elle montre une contrainte sur le choix rationnel de l'individu « qui ne le sait pas forcément ». Comment interpréter cette contrainte spatiale sur les choix modaux que nous observons au quotidien ? S'agit-il d'un déterminisme spatial ? La rencontre de l'individualisme méthodologique et de l'holisme est intéressante à ce propos.
6. Mesurer les effets de la concentration d'activité sur la circulation automobile pour le réseau de surface « attracteurs » de deuxième niveau les villes nouvelles par exemple.
7. Mesurer la relation concentration d'activité et part modales selon les motifs de déplacement.
8. Vérifier si la spécialisation du TC dépend du maillage dans d'autres régions.
9. Savoir à partir de notre relation $Entrants = a \times hab$ si l'augmentation de trafic des TC constatée par les EGT 2018 provient de la mobilité résidentielle (habitants) ou de la part modale ce qui ne renvoie pas aux mêmes déterminants.
10. Le couplage d'un modèle 4 étapes et du modèle permettrait de décliner localement des valeurs de densités. Des recherches sur la rente de densité locale associée à la croissance du trafic justifieraient un financement supplémentaire pour les TC qui contribuent à la valorisation du sol.

Pour finir, l'expérience de la pandémie montre la fragilité de nos représentations. En effet, au-delà du choc, elle pose un vrai problème pratique dans l'usage du TC. Leur efficacité énergétique ou économique repose sur l'accumulation de personnes dans une surface d'un véhicule. Est-ce la fin du transport collectif certes plus efficace énergétiquement et écologiquement mais pas d'un point de vue sanitaire ? Dans ce cas à quoi sert l'aménagement du territoire si la conséquence est le développement d'une mobilité individuelle « garantie sanitaire » qui s'opposerait à la dépollution et aux problèmes respiratoires qu'elle entraîne dans certaines zones ? Le vélo est-il la solution de ces problèmes ? Comment les TC s'adapteront-ils à ce nouvel enjeu ? Une configuration à l'anglaise peut permettre d'optimiser l'usage des remorques et de respecter les règles sanitaires avec des sièges adossés aux parois séparés par des plexiglas et en mettant dos à dos, dans une allée centrale, les voyageurs. Les configurations actuelles en France ne le permettent pas. La réponse à l'enjeu sanitaire est donc une nouvelle variable pour l'usage du TC afin d'éviter que les efforts entrepris pour sa promotion ne passent par « pertes et profits ».

Figures

Figure 1: consommation d'énergie pour les transports.....	15
Figure 2: découpage morphologique IDF.....	27
Figure 3: secteurs EGT	28
Figure 4: zone RATP	29
Figure 5: carte réserves prouvées.....	33
Figure 6: mix énergétique France.....	38
Figure 7: Evolution des modes de tarification.....	39
Figure 8: conception longitudinale de la caisse.....	54
Figure 9: économie d'énergie véhicule	62
Figure 10 : hybride parallèle	65
Figure 11 : hybride série	65
Figure 12: schéma 1 d'alimentation électrique.....	75
Figure 13: schéma 2 d'alimentation électrique.....	75
Figure 14: distribution de l'énergie régénérée.....	76
Figure 15 : accélération et consommation d'énergie.....	77
Figure 16: espace et espace-temps.	82
Figure 17:surface dynamique.....	85
Figure 18: calculs d'émission de polluants et parcs.	92
Figure 19: comptage de la population INSEE.....	100
Figure 20 : cartes des secteurs.....	125
Figure 21 : Hiérarchie des modes.....	152
Figure 22: réseau hiérarchique.....	153
Figure 23: consommation de la mobilité d'un résident d'un territoire.....	158
Figure 24: modèle de répartition des flux.....	183
Figure 25: forme urbaine a négatif.....	189
Figure 26 : forme urbaine a nul.....	189
Figure 27: forme urbaine a positif.....	189
Figure 28: morphologie du modèle	190
Figure 29: mesures de l'espace urbain	199
Figure 30: égalité des densités	202
Figure 31 : dessin urbain.....	203
Figure 32 : flux des départements EGT 2010 + Bertaud	206
Figure 33 : pôles multicommunaux.....	210
Figure 34: polarisation et forme des réseaux.....	211
Figure 35: réseaux de RER	211
Figure 36 : morphologie réseaux métro	213
Figure 37 : morphologie des voies.....	214
Figure 38 : maillage.....	214
Figure 39: la ville du transport en commun.....	215
Figure 40: VP et figures urbaines.....	216
Figure 41: figures urbaines	217
Figure 42: modèle 4 étapes	238
Figure 43: forme urbaine	292
Figure 44 : pôles d'échange.....	293
Figure 45 : intensité urbaine.....	294
Figure 46 : métro du grand Paris.....	295
Figure 47 : parts d'activité et de résidence dans les gares du grand Paris	296
Figure 48: la méthode node-place	297
Figure 49 : la méthode butterfly.....	298

Figure 50 : classement node-place	299
Figure 51: rayon d'accès observe.....	301
Figure 52 : la chaîne du déplacement TC.....	302
Figure 53 : correspondance Bastille	304
Figure 54: grand Paris et charge voyageur.....	310
Figure 55 : densité accessibilité	318
Figure 56: flux d'entrants Station Madeleine.....	325
Figure 57 : flux entrants Barbès Rochechouart.....	325

Graphiques

Graphique 1 : densité spatiale et consommation d'énergie	14
Graphique 2: prix du baril.....	35
Graphique 3 : pic de Hubbert.....	35
Graphique 4: cours du Brent	36
Graphique 5: prix des carburants a la pompe.....	36
Graphique 6 : Evolution des charges service public.....	40
Graphique 7: évolution des consommations en GJ énergie primaire.....	45
Graphique 8: consommation éclairage et véhicule.....	46
Graphique 9 : courbe de charge	47
Graphique 10: variation des contributions voitures.....	51
Graphique 11: charge ligne 6.....	56
Graphique 12 : parcours moyens RATP.....	57
Graphique 13 : évolution des trafics.	58
Graphique 14: morphologie entrants jour ouvrable.....	60
Graphique 15 : morphologie entrant dimanche	60
Graphique 16: Augmentation des masses des véhicules.....	64
Graphique 17 : dénivelé.....	77
Graphique 18: convergence	80
Graphique 19 : baisse des consommations spécifiques	80
Graphique 20 : vitesses et portées.....	83
Graphique 21: relation vitesse concentration de véhicules.....	83
Graphique 22 : largeur des voies et vitesses.....	84
Graphique 23: circulation périphérique Paris.....	86
Graphique 24: circulation intra-muros Paris	86
Graphique 25 : consommation en litre/100km et vitesse.....	88
Graphique 26: consommations unitaires et taux d'occupation réseau de TC base UITP.....	95
Graphique 27: écart des consommations unitaires en île de France Source : calcul de l'auteur.....	96
Graphique 28: consommation spécifique VP au sens de l'EGT par secteur 2008	104
Graphique 29 : consommation spécifique Paris	106
Graphique 30: consommation unitaire par lignes Paris	109
Graphique 31: indice de comparaison réseaux routiers UITP Source : calcul de l'auteur.....	112
Graphique 32: indice de comparaison réseaux ferrés énergie primaire UITP Source : calcul de l'auteur	113
Graphique 33: diagramme d'Hägerstrand	124
Graphique 34: mobilité des résidents par secteur EGT	125
Graphique 35: part de résidents dans la mobilité interne aux secteurs EGT.....	126
Graphique 36 : parts modales selon les secteurs.	128
Graphique 37: variation des parts modales	129
Graphique 38 : part modale et type de mobilité	130
Graphique 39: abonnés au TC.....	130
Graphique 40: variation des parts modales voitures.....	131
Graphique 41: VP mobilité interne et échange.....	132
Graphique 42: part modale mobilité interne.....	132
Graphique 43 : motorisation des ménages des secteurs EGTS Source : EGT.....	133
Graphique 44: portées des résidents	137
Graphique 45: budget temps des résidents en minutes	139
Graphique 46 : vitesse optimale.....	140
Graphique 47: données de vitesses de déplacement par secteur Source : calcul de l'auteur.....	142
Graphique 48: vitesses de déplacement VP-TC Km/h	143
Graphique 49 : vitesse de circulation Km/h	143

Graphique 50: comparaison modèle et mesures	146
Graphique 51 : nombre de parcours dans le métro.....	150
Graphique 52: nombre de parcours dans le RER.....	151
Graphique 53: les consommations unitaires/habitant	159
Graphique 54: consommation par habitant.....	159
Graphique 55 : nombre de déplacements par habitant base UITP	160
Graphique 56 : consommation/déplacement pour l'ensemble des déplacements (ED)Source : calcul de l'auteur	161
Graphique 57: consommation par habitant.....	161
Graphique 58: relation entre vitesse de circulation et de déplacement voiture Km/h UITP	162
Graphique 59: relation entre vitesse de circulation et vitesse de déplacement TC Km/h UITP	162
Graphique 60: effet des trafics chaînés sur la valeur de la consommation par déplacement.....	165
Graphique 61: consommation déplacement Domicile Travail	166
Graphique 62: efficacité énergétique du déplacement échange/interne	167
Graphique 63: densité et budget énergie domicile travail IDF	193
Graphique 64 : distance au centre par classe de densité	193
Graphique 65: parts modales des TC et MAP	194
Graphique 66 : classe de densité et part modale VP.....	195
Graphique 67: relation densité part modale VP.....	195
Graphique 68: densité et usage de l'automobile	196
Graphique 69: densité et utilisation de l'automobile région Rhin-Rhur	197
Graphique 70: vitesse et densité.....	198
Graphique 71: évolution des densités optimales	219
Graphique 72: stationnement en IDF	222
Graphique 73: effet rebond global	223
Graphique 74: densités d'emploi et parts modales VP.....	225
Graphique 75: consommation par déplacement moyen et densité brute.....	229
Graphique 76: consommation par déplacement moyen VP et densité	230
Graphique 77: consommation par déplacement moyen TC et densitéSource : calcul de l'auteur.....	231
Graphique 78 : portées et densité.....	232
Graphique 79: densité et parts modales.....	232
Graphique 80: flux domicile travail val de marne et distance.	239
Graphique 81 : fonction logistique.....	240
Graphique 82 : variation des temps de parcours voiture	242
Graphique 83 : structure des coûts.....	246
Graphique 84: valeur du temps ensemble des déplacements et domicile travail	253
Graphique 85 : coût du temps VP et TC eurosSource : calcul de l'auteur.....	254
Graphique 86: coût d'usage des voitures	257
Graphique 87: coût d'usage TC	260
Graphique 88: densités et écarts de temps des modes.	264
Graphique 89: densité et concentration d'activité	265
Graphique 90 : consommation par déplacement et concentration d'activité	265
Graphique 91 : portées et concentration d'activité.....	266
Graphique 92: distance moyenne entre les activités et parts modales résidentielles.....	266
Graphique 93 : concentration d'activité et écart de temps.....	267
Graphique 94: distance moyenne activité et facteurs réticulaires mobilité résidentielle.....	268
Graphique 95: relation facteurs réticulaires et parts modales	268
Graphique 96: balance des flux > 1000.....	270
Graphique 97 : emploi au lieu de travail et flux par secteur.....	272
Graphique 98 : vitesse du territoire et des résidents VP	272
Graphique 99: concentration d'activité et vitesses des modes.....	273
Graphique 100 : densité de flux et vitesse des modes	273
Graphique 101: écart de temps VP et TC densité de flux.....	274
	360

Graphique 102 : nombre moyen de voitures par ménage et concentration d'activités.....	276
Graphique 103: relation écarts de temps et taux de motorisation	277
Graphique 104 : nombre moyen de voitures et abonnementsSource : calcul de l'auteur.....	277
Graphique 105: écart de temps et parts modales première couronne VP et TC.....	278
Graphique 106 : écart de temps et concentration d'activités grande couronne	278
Graphique 107 : écart de temps et parts modales petite et grande couronne	279
Graphique 108 : distance moyenne entre activité et parts modales mobilité interne	281
Graphique 109: concentration d'activité et motifs de déplacement TC	281
Graphique 110: part modale de la voiture et concentration d'activité.	282
Graphique 111: taux minimum d'occupation.....	311
Graphique 112: influence de la vitesse sur le taux minimum.	312
Graphique 113: consommation unitaire et taux de remplissage RF	313
Graphique 114: coefficient C métro + RER à Paris	321
Graphique 115: déplacements et voyages domicile travail.....	324
Graphique 116: variation consommations unitaires réseau ferré.....	333
Graphique 117: rapport des masses MI 09 et MF 77.....	334
Graphique 118: les rendements décroissants.....	335
Graphique 119: taux de remplissage minimum.	336
Graphique 120: taux de remplissage minimum par ligne	337
Graphique 121 : variation de l'indice à taux maximum de remplissage.....	338
Graphique 122: indice de convergence réseau ferré.....	339
Graphique 123 : part d'éclairage à indice égal.....	339

Tableaux

Tableau 1 : zonages.....	25
Tableau 2: données de vente en IDF	32
Tableau 3 : capacité de raffinage	34
Tableau 4: prix du litre à la pompe en France.	37
Tableau 5: émission de CO ₂ . (Million de tonnes).....	37
Tableau 6 : volume de déchets nucléaires	39
Tableau 7 : prix de l'électricité par secteur	40
Tableau 8 : unité physique des énergies en joules en PCI	41
Tableau 9 : masse volumique et PCI.....	41
Tableau 10 : carburant et rendement du moteur RATP.	42
Tableau 11 : Coefficient de conversion en TEP électricité.....	44
Tableau 12 : émission totale du carburant en Kg Co ₂ /GJPCI	45
Tableau 13: pourcentage de consommation litre de carburant.	45
Tableau 14: covoiturage utilisateur	50
Tableau 15: taux de remplissage et véhicule kilomètre	51
Tableau 16 : taux d'occupation RATP	53
Tableau 17: capacités des RER.....	54
Tableau 18: nombre de voitures par train.....	54
Tableau 19 : PKO Place Kilomètre Offerte.....	55
Tableau 20 : taux de remplissage Voy.KM/KCC.....	56
Tableau 21 : parcours moyen réseau ferré.....	57
Tableau 22 : trafic IDF en millions de voyageur.....	58
Tableau 23 : entrants en IDF SNCF 2008.	59
Tableau 24 : variation de trafic entre jours ouvrables et non ouvrables 2008 RATP.....	59
Tableau 25 : optique	59
Tableau 26 : variation des taux d'occupation ligne 106 2008	61
Tableau 27 : puissance du parc et consommation spécifique.	63
Tableau 28: contribution du Cx à la consommation spécifique.	63
Tableau 29: performance énergétique d'hybride.	65
Tableau 30: rendement et tours minutes Agora.	67
Tableau 31 : âge du parc et consommation spécifique	68
Tableau 32 : parc automobile disponible en IDF (milliers).....	69
Tableau 33 : composition des parcs statiques IDF VP.	70
Tableau 34 : parcs roulant en région IDF par département.	70
Tableau 35 : kilomètre parcourus diesel et essence.	70
Tableau 36 ; dispersion des parcs statiques en fonction des méthodes.	71
Tableau 37: puissance du parc en MJ.....	71
Tableau 38 : Consommation en MJ.....	71
Tableau 39 : matériels métro 2008-2018 (MP = Matériel Pneu MF = Matériel Fer.).....	73
Tableau 40 : puissance par place.....	73
Tableau 41: puissance par place disponible 2008.....	74
Tableau 42 : consommation spécifique en Km/Km par voiture	76
Tableau 43: consommation unitaire et taux d'occupation.	78
Tableau 44 : évolution des différences de consommations traction GWh métro.....	78
Tableau 45 : équipement des stations métro.....	79
Tableau 46 : évolution des différences de consommations équipement GWh.....	79
Tableau 47: surface dynamique et vitesse	85
Tableau 48: vitesse KCC/JA ensemble	87
Tableau 49 : autobus	87
Tableau 50: variation des vitesses de circulation en fonction des lignes KM/H.....	87

Tableau 51 : cycle de conduite.....	89
Tableau 52: effet de la spatialisation sur les consommations spécifiques	89
Tableau 53 : tableau des variables de l'efficacité énergétique des voyageurs	90
Tableau 54 : consommation spécifiques l/100 kilomètres IDF.....	96
Tableau 55 : part de parcs VUL	96
Tableau 56 : consommation spécifique VUL L/100Km IDF	97
Tableau 57 : consommation spécifique moyenne VUL l/100Km.....	97
Tableau 58 : taux moyen de masse volumique.....	98
Tableau 59 : coefficient de consommation à la source IDF.....	98
Tableau 60 : consommation spécifique au véhicule	98
Tableau 61 : consommation spécifique à l'énergie primaire VUL.....	99
Tableau 62 : taux de remplissage voiture.....	99
Tableau 63 : variation des consommations unitaires MJ/Voy.km.	99
Tableau 64 : secteur de l'enquête EGT.	101
Tableau 65: coefficient de population.....	101
Tableau 66 : coefficient de parc 2009	101
Tableau 67 : variation en fonction des parcs roulants 2000.....	102
Tableau 68 : part diesel essence dans parc fixe.	102
Tableau 69 : comparaisons des calculs de variation des parcs par deux méthodes différentes.	103
Tableau 70 : variation voiture due au parc 1982-2008.....	103
Tableau 71 :part des parcs roulant VUL 2009.....	103
Tableau 72: Parc de circulation VUL dans la circulation totale VP	103
Tableau 73 : consommations unitaires véhicules individuels JO MJ/voy-km	104
Tableau 74: Consommation unitaire samedi/dimanche (MJ/voy-km).....	105
Tableau 75 : taux de remplissage 1975-2018	106
Tableau 76 : consommation par KV (Joules/KV)	107
Tableau 77 : Consommation unitaire moyenne par mode	107
Tableau 78: variation consommation unitaire réseau ferré 2004 réseau ferré MJ/ Voy Km	108
Tableau 79: variation du taux de remplissage 2008	108
Tableau 80: consommations unitaires MJ/ Voy Km 2008.....	108
Tableau 81 : taux moyen de variation des consommations unitaires TC.....	109
Tableau 82: consommation unitaire grande couronne du TC MJ/ voy Km	110
Tableau 83 : trafic SNCF en zone RATP 2008	110
Tableau 84 : consommation unitaire Paris 2008-2018 Mj/voy Km.....	110
Tableau 85 : consommations unitaires TC 2008	111
Tableau 86 : TC MJ/voy-Km JO.....	111
Tableau 87 : Consommation unitaire par couronne samedi.....	111
Tableau 88 : Consommation unitaire par couronne dimanche	111
Tableau 89 : indice de convergence moyen par mode.....	113
Tableau 90 : Convergence TC et VP.....	114
Tableau 91 : variation du taux de convergence JO selon les couronnes.	114
Tableau 92: convergence	114
Tableau 93: nombre de lignes convergentes 2008.....	115
Tableau 94: hiérarchie des motifs EGT.....	126
Tableau 95: déplacement en fonction des motifs	127
Tableau 96 : part modale des résidents marches 2010.....	128
Tableau 97: part modale des résidents en fonction des motifs TC	128
Tableau 98: part modale des résidents des TC 2010.	129
Tableau 99: part modale des résidents VP en fonction des motifs	131
Tableau 100: part modale des résidents des voitures 2010.	132
Tableau 101 : nombre moyen de voiture population	133
Tableau 102 : variation des distances en fonction des modes de calcul.....	134

Tableau 103 : portées.....	136
Tableau 104 : portée et motifs.....	136
Tableau 105: portées actifs VP Km.....	136
Tableau 106: portées retraités VP Km	136
Tableau 107: directions du déplacement.....	137
Tableau 108 : temps de déplacement moyen par couronne	138
Tableau 109: budget temps par motifs.....	138
Tableau 110 : budgets temps par mode.....	138
Tableau 111 : variation en fonction des motifs et des modes.....	138
Tableau 112 : coûts temps et vitesse généralisé	140
Tableau 113: évaluation des distances	141
Tableau 114: vitesses individuelles par couronne	141
Tableau 115 : vitesses individuelles des déplacements	142
Tableau 116 : vitesses par mode et motifs 2001 2010 KM/h	142
Tableau 117 : mesure des flux des espaces	144
Tableau 118: consommation spécifique théorique ajustée.....	145
Tableau 119: consommation unitaire par zones	145
Tableau 120 : circulations par parc.....	145
Tableau 121 : ventilation des circulations par parc.....	145
Tableau 122: consommation par zone.....	146
Tableau 123 : écart entre les consommations spécifiques 2005	147
Tableau 124 : Consommation unitaire de référence gep/ Voy Km.....	149
Tableau 125 : typologie des interconnexions	150
Tableau 126 : parcours d'un voyageur.....	151
Tableau 127: utilisation ligne.....	152
Tableau 128 : déplacement chaîné BEED.....	154
Tableau 129 : type de chaînage d'un déplacement.....	163
Tableau 130 : coefficient de trafic par chaînage.....	164
Tableau 131 : équation de chaînage	164
Tableau 132: part modale EGT et recensement domicile travail.....	166
Tableau 133 : consommation par déplacements selon les jours Mj.....	167
Tableau 134 : variation de consommation par habitant Mj	167
Tableau 135 : consommation par déplacement en JO	168
Tableau 136: part modale de déplacements en fonction de l'habitat.....	203
Tableau 137 : tableau des liaisons et origine résidentielle.....	204
Tableau 138: nombre de déplacement Paris milliers.....	204
Tableau 139 : Nombre de déplacement petite couronne.....	205
Tableau 140 : balance des flux échangés milliers	205
Tableau 141 : balance emplois actif.....	205
Tableau 142 : pourcentage emploi au lieu de travail IDF 2000-2013.....	207
Tableau 143 : répartition des surfaces de production 2013	208
Tableau 144 : répartition habitants.....	208
Tableau 145: critères de définition du pôle.....	209
Tableau 146: flux des utilisateurs du RER entre 6h00 et 21h00.....	212
Tableau 147: flux des utilisateurs du métro entre 6h00 et 21h00	212
Tableau 148 : proportion de place de stationnement en France 2008.....	220
Tableau 149 : temps d'accès au parking sur trois métropoles françaises.....	221
Tableau 150 : partage modal avec contrainte de stationnement	221
Tableau 151 : consommation par habitant (42 villes).....	224
Tableau 152 : parts modales voiture (base UITP 45)	225
Tableau 153: effet rebond direct et portées en IDF	226
Tableau 154 : portées actifs et retraités VP densité et efficacités énergétiques	226

Tableau 155 : effet rebond direct et volumes	227
Tableau 156 : volume de déplacement automobile	228
Tableau 157 : modification des facteurs spatiaux de l'efficacité selon la densité des modes.	233
Tableau 158: matrice de confusion	241
Tableau 159 : valeur du temps 2013	244
Tableau 160 : temps réel du voyageur dans le TC.....	245
Tableau 161: VP coûts d'usage et du temps euros voy-km	249
Tableau 162: RER coûts d'usage et du temps euros voy-km	249
Tableau 163 : métro coûts d'usage et du temps euros voy-km.....	249
Tableau 164 : bus coûts d'usage et du temps euros voy-km.....	249
Tableau 165 : revenus fiscaux commune de Paris 1 ^{ière} arrondissement 2008.	251
Tableau 166 : valeur du temps	253
Tableau 167 : prix des carburants 1975 -2008 (euro constant).....	254
Tableau 168: prix du carburant moyen en IDF en €/MJ	255
Tableau 169 : stationnement résidentiel payant dans 5 villes du 92.	255
Tableau 170: prix moyen par voyage à l'unité 2009	258
Tableau 171 prix des abonnements	258
Tableau 172 : Navigo Annuel Mensuel.....	259
Tableau 173 : prix quotidien	259
Tableau 174: prix moyen du TC	260
Tableau 175 : coûts d'usage du temps et généralisé par département VP	261
Tableau 176 : coûts d'usage du temps et généralisés par département TC	261
Tableau 177: part des coûts d'usage dans les coûts du cout du temps.....	262
Tableau 178 : part modale TC.....	262
Tableau 179: part modale VP.....	262
Tableau 180: part modale MAP.	262
Tableau 181 : modèle gravitaire.....	270
Tableau 182 : modèle gravitaire amendé.	271
Tableau 183 : nombre de déplacements Paris samedi	274
Tableau 184 : déplacement en VP samedi vis-à-vis d'un jour de semaine par liaison.....	275
Tableau 185 : part modale des résidents des voitures 2010.....	275
Tableau 186 : parts modales des résidents des TC 2010 non JO.	282
Tableau 187 : différence de part modale VP-TC.....	283
Tableau 188 : vitesse des modes Paris Km/h	283
Tableau 189 : approche multicritère d'accessibilité.	302
Tableau 190: origine des entrants stations Alesia.....	304
Tableau 191 : parts des entrants dans les réseaux ferrés.....	305
Tableau 192 : évolution des emplois et des habitants par pôle.....	309
Tableau 193: répartition des flux entrants par arrondissements.....	320
Tableau 194 : part de trafic réseau ferré domicile travail dans le total des trafics.	321
Tableau 195 : part moyenne métro MAP trafic domicile travail 06h00-09h30.	322
Tableau 196: entrants et correspondants par ligne	322
Tableau 197 : trafic domicile travail	323
Tableau 198: part de trafic des modes de TC (domicile travail).....	324
Tableau 199 : nombre de stations réelles	326
Tableau 200 : zone d'attraction du réseau.....	327
Tableau 201 : répartition de la population active	328
Tableau 202 : répartition des densités population (hab/Km ²).....	329
Tableau 203 : densité par station sans maillage (Hab/Km ²)	329
Tableau 204 : densité par station avec maillage (Hab/Km ²).....	329
Tableau 205: masse à vide des véhicules de transport en commun RATP (tonnes)	334
Tableau 206:efficacité énergétique en fonction des modes Mj/voy km.....	335
	365

Tableau 207 : Données d'entrées ligne 1	336
Tableau 208 : variation de l'offre ligne 1	337
Tableau 209 : trafic domicile travail entrant arrondissement (A) /ligne (L) voy Km	341
Tableau 210 : taux de remplissage calculé à partir de l'offre de transport	341
Tableau 211 : potentiel de densité par lignes HAB/Km ²	343
Tableau 212 : potentiel de densité par lignes HAB/Km ²	344
Tableau 213 potentiel de densité par lignes HAB/Km ² part modale à 0.10	344
Tableau 214: potentiel de densité par lignes HAB/Km ² avant intégration des correspondances	344
Tableau 215 : potentiel de densité par lignes HAB/Km ² avec intégration des correspondances.....	345

Bibliographie

- ADEME. (2010). *caractérisation de services et usages de covoiturage en france : quels impacts sur l'environnement, quelles perspectives d'amélioration ?*. Paris: Artémis.
- ADAM, A. (2010). *Détermination du rendement des chaînes de distribution de l'énergie électrique de la RATP*. Paris: RATP.
- ADEME . (2010). *Guides des facteurs d'émission, calcul des facteurs d'émission et sources bibliographiques utilisées.* .
http://23dd.fr/images/stories/Documents/PV/Ademe_Metro_Chapitre_2_Energie.pdf
:: ADEME.
- ADEME . (2014). *base carbone*,. <https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/%5bBase%20Carbone%5d%20Documentation%20%c3%a9n%c3%a9rale%20v11.0>: ADEME.
- ADEME (BENITA D, AJBD, FAYOLLE D) . (2018). *panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains*,. www.ademe.fr/mediatheque. : ADEME.
- Ademe. (2003). *logiciel IMPACT version 2*,. Paris: ADEME.
- ADEME. (2003). *logiciel IMPACT version 2*,. Paris: ADEME.
- ADEME. (2010). *Les effets rebond des mesures d'efficacité énergétique : comment les atténuer?* Paris: ADEME.
- ADEME. (2011). *Elaboration selon les principes des acv des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques*. Paris: ADEME.
- ADEME. (2015). *Enquête auprès des utilisateurs du covoiturage longue distance*. Paris.: 6t.
- ADEME. (2016). *les potentiels du véhicule électrique*, . <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/2467-potentiels-du-vehicule-electrique.html>: ADEME.
- ADEME, BENITA, D, AJBD, FAYOLLE, D. (2018). *panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains*,. Paris: ADEME.
- ADEME. (2008). *efficacités énergétique et environnementale des modes de transport*,. Paris: ADEME.
- AGUILERA, A., & MIGNOT, D. (2003). Etallement urbain et mobilité. *RERU*, 815-833.
- AGUILERA, A., & MIGNOT, D. (2004). *Multipolarisation des emplois et déplacements domicile-travail: une comparaison de trois aires urbaines* . Marne la vallée: ENPC.
- AGUILERA, A., & PROUHAC, L. (2006, 08 2006). Le polycentrisme en Île-de-France : quels impacts sur la mobilité ? *Territoire en mouvement*

- :<https://doi.org/10.4000/tem.396>, p. 15-25. Récupéré sur Territoire en mouvement:
<https://doi.org/10.4000/tem.396>
- ALBERT, G. L. (1995). *Réduction de la consommation énergétique dans les systèmes de métro, une contribution significative à la protection de l'environnement.*, . Bruxelles: Comité international des métros .
- ALLAIRE, J. (2007). *Forme urbaine et mobilité soutenable : enjeux pour les villes chinoises.* . Grenoble: Université de Grenoble.
- AMPERE. (2000). *Rapport Ampère.*
Bruxelle:www.ulb.ac.be/sciences/intra/inforsc_archives/nrj/ampere/ampere3.html::
Université Libre de Bruxelles.
- ANDRE, M. (2014). *Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules.* Lyon: Université de Lyon 2.
- ANDRE, M. C. (2015). *Méthode d'estimation des parcs automobiles et de l'impact de mesures de restriction d'accès sur les émissions de polluants.* Paris: (Rapport de recherche): IFSTTAR.
- ANDRE, M. J. (1999). *Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières.* Arcueil: Inrets.
- ANTONIN, J. M.-L. (2011). *Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport.* Paris: Economica.
- APERC. (2007). *Urban transport energy use in the apec region.* . Singapour: APERC.
- APUR. (2008). *Devenir des stations de ravitaillement en carburant à Paris et en proche banlieue.* Paris: APUR.
- APUR. (2011). *La trame viaire au coeur de l'agglomération.* Paris: APUR.
- APUR. (2017). *Quels logements dans les quartiers de gare du Grand Paris Express,* . Paris: APUR.
- APUR. (2022). *Evolution 2012-2021 du parc automobile Les tendances de renouvellement du parc immatriculé dans le Grand Paris.* Paris: APUR.
- ARANTES L MARRY S, B. O. (2021, 08 01). *Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique,* . Récupéré sur cybergeogeo: <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.27584>
- ARISTOTE. (347). *Physique.* Paris: Flammarion.
- ASHER, A. (1995). *Métapolis ou l'avenir des villes.* . Paris: Odile Jacob.
- AUAT . (2007). *Les contrats d'axe pourquoi? Comment?* Toulouse: AUAT.

- AVELINE-DUBACH, M. (2006, 01 01). *Tôkyô, métropole japonaise en mouvement perpétuel*. Récupéré sur Géoconfluences: <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/typespace/urb1/MetropScient3.html>
- BACCAINI, B. (2002). Navette domicile travail et comportement résidentiel dans l'espace francilien. Dans J. LEVY, *Accès à la ville et mobilité spatiale en question*. (pp. 160-170). Paris: L'Harmattan.
- BAIROCH, P. (1985). *De Jéricho à Mexico (ville et économie dans l'histoire)*. Paris: Gallimard.
- BANOS, A., & THEVENIN, T. (2010). *Système de transport urbain*,. Paris: Lavoisier.
- BARTER, P. (. (2000). *Transport dilemmas in dense urban areas: examples from eastern, ASIA*. . Murdoch: Institute for Sustainability and Technology Policy (ISTP).
- BASTARD, P. (1988). productivité dans les transports collectifs. *les transport collectifs urbains* (pp. 167-175). Paris: Pont et chaussée.
- BAVOUX, J. B. (2005). *Géographie des transports*,. Paris: Armand Collin.
- BEAUCIRE, F. (2008). *L'accessibilité aux franges de la ville dans les franges périurbaines de l'île de France*. . Paris: [Documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/dri/RMT04-008.pdf](http://documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/dri/RMT04-008.pdf).
- BEAUCIRE, F., & SAINT-GERAND, T. (2001, 01 01). Les déplacements quotidiens, facteurs de différenciation socio-spatiale. *geocarrefour*, pp. 339-447.
- BEAUFIS, S. B. (2014). *Vulnérabilité énergétique : identifier et caractériser les ménages fragiles en Ile-de-France*. Paris: IAU.
- BEAUMONT, J. (2007). *Environnement et vitesse*,. Lille: CERTU.
- BECKER, G. (1965, 01 01). A theory of allocation of time. . *the economic journal*,, pp. 493-517.
- BEN ABDALLAH, K. (2015). *Le transport routier énergiquement durable : état des lieux, modélisation et aide à la décision publique en Tunisie. Economies et finances*. Dunkerque: Université du Littoral Côte d'Opale.
- BERGER, M. (2004). *Les périurbains de Paris, de la ville dense à la métropole éclatée*. Lyon: CNRS.
- BERGNAUD, C. (2011). *Bilan carbone du centre d'étude des tunnels en 2011 et évolution entre 2008 et 2011*. Paris:http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/BCCETU_rapport_restitution_v3.: CETU.

- BERNARD, J. (2007). *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande*. Valenciennes: Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- BERRI, A. (1995). *Dynamique de motorisation et des dépenses de transport des ménages, Analyses sur donnée individuelles et semi agrégées ?*. Paris: INRETS.
- BERROIR, S. (1996). L'espace des densités dans la ville : théorie et modélisations . . *'espace géographique*,, 353-369.
- BERROIR, S. (2004). La contribution des villes nouvelles au polycentrisme francilien : l'exemple de la polarisation liée à l'emploi. *ERES « Espaces et sociétés »*, pp113-133.
- BERROIR, S. C.-J. (2007). *Fonctionnement métropolitain du bassin parisien*. Paris: CNRS.
- BERROIR, S. M.-J. (2008). La mobilité dans la construction du polycentrisme métropolitain. Dans M. D. Theriault, *Information géographique et dynamiques urbaines*. (pp. 10-110). Paris: Lavoisier.
- BERTAUD, A. (2003). *The Spatial Organization of Cities : Deliberate outcome or unforeseen consequence ?*. Washington: World Bank, Background Paper.
- BERTOLINI, L. (1999). Spatial Development Patterns and Public Transport: The Application of an Analytical Model in the Netherlands Planning . *Practice & Research*,, 199- 210.
- BERTRAND, F. (2005). *Motorisation et usage de l'automobile en IDF*. Pris: EGT.
- BIDOU ZACHARIASEN, C. (2003). *Retour en ville*. . Paris: Descartes et Cie.
- BIGO, A. (2020). *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement*. Paris: Institut Polytechnique de Paris.
- BOILLAT, P. (2005). *Enquête sur le taux d'occupation des véhicules automobiles à Genève*. Genève: Unige.
- BONIN & TOMASONI, L. (2015, 03 01). Evaluation of a transit-oriented development scenario in a medium-sized French city by simulation models. *International Journal of Transportation*, pp. 91-112.
- BONIN, O., & LEMSSOUGUER, M. (2012, 01 01). *Approche probabiliste des liens entre distances et maillages, application à l'exploitation d'enquêtes origine destination*. Récupéré sur halshs.archives-ouvertes: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-007>
- BONNAFOUS, A. (1996). Le système des transports urbains. *Economie et statistique*, pp 99-108.

- BONNAFOUS, A. (2003). *Une analyse de la base UITP sur les systèmes de transport urbain de 100 villes du monde*. Paris: commissariat au plan.
- BONNEL, P. (2002). *Prévision de la demande de transport, universite Lyon 2*. Lyon: Université Lyon 2.
- BORDUEIL, S. (1995). De la densité habitante aux densités mouvantes : l'hyperurbanité. . *Annale de la recherche*, 4-14.
- BORET, D. D. (2000, 01 01). *Développement urbain : les nouvelles contraintes*.. Récupéré sur institut Véolia environnement:
<http://www.institut.veolia.org/fr/cahiers/developpement-urbain 2000>
- BOURDEAU, B. (1998). *Evolution du parc automobile français entre 1970 et 2002*. Chambéry: Université de savoie .
- BOURDIEU, P. (1979). *la distinction, critique sociale du jugement*. Paris: les éditions de minuit.
- BOURILLON, F. (1995). *Les villes en France au XIX siècle* . Paris: Orphys.
- BOUSQUET, M. (2017). *Méthode d'étude du potentiel de densification des villes à travers l'exemple de Toulouse en 2017*. Toulouse: Architecture, aménagement de l'espace.
- BRAUDEL, F. (1979). *Civilisation matérielle économie et capitalisme*. Paris: Livre de poche.
- BRETAGNOLE, M. (2014). Les effets structurants des infrastructures de transport. *L'Espace géographique*, 51-67.
- BRISBOIS, X. (2010). *Le processus de décision dans le choix modal:importance des déterminants individuels symbolique et cognitifs*. Grenoble: Université de grenoble.
- BRISBOIS, X. R. (2012). Mixité sociale et choix modal : importance des dimensions symboliques dans l'attrait des transports collectifs. . *recherche transport sécurité*, 1-8.
- BRUEKNER et al, J. (1999). Why is central Pris rich hand downtown détroit poor ? *European economic review*,, 91-107.
- BRUEKNER, J. T. (2002). Local labor markets, job matching and urban location. *International Economic Review*, , 155-171.
- BRUNEL, J. (2005, 01 01). *Le transport de marchandises et la croissance économique : retour sur le couplage*.. Récupéré sur halshs.archives-ouvertes.fr:
<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00095907/document>
- BURGIERE, A., & REVEL, J. (2000). *Histoire de France l'espace français*. Paris: Flammarion.

- CALIO, J. (1993). *L'usage des voitures particulières selon le carburant en 1993*. . Paris: SES.
- CAMERON, I. (2010, 01 01). *Understanding modelling and predicting transport mobility in urban environments*. Récupéré sur researchgate: https://www.researchgate.net/publication/43980057_Understanding_modelling_and_predicting_transport_mobility_in_urban_environments
- CANARD, A., & POINSOT, D. (2004). *Quelques méthodes statistiques de peuplement*. Rennes: Université de Rennes.
- CARBALLES, S. (. (2008). *Les véhicules particuliers en France, données de référence*,. Paris: ADEME.
- CARMONA, M. (1979). *Le grand Paris de l'idée d'aménagement de la région parisienne*. . Paris: Girotypo.
- CARNIS, L. (2004). Essai d'estimation d'une vitesse optimale pour les véhicules légers sur le réseau interurbain français. . *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 63-95.
- CARRE, J. H. (2000). *Ecomobilité*. Arcueil: INRETS.
- CASET, F. (2019). *Places, and People A Strategic Railway Station Development Tool for Flanders*,. Ghent: Université de Ghent.
- CAVAILHES, J. F. (2002). *Localisation de la population selon les enchères foncières des ménages dans une aire métropolitaine fractale*. Namur: ASRDLF.
- CCIF . (2015). *Grand Paris : comment maintenir un tissu économique diversifié en zone dense ?* . Paris: CCIF.
- CDE. (2014, 05 01). *Électricité : à combien s'élèvent les pertes en ligne en France ?* Récupéré sur Connaissance des énergies.: <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/electricite-combien-selevent-les-pertes-en-ligne-en-france>
- CEREMA. (2018, 10 28). *covoiturage-courte-distance-rapport-du-cerema-freins-leviers*. Récupéré sur <https://www.cerema.fr>: <https://www.cerema.fr/fr/actualites/covoiturage-courte-distance-rapport-du-cerema-freins-leviers>
- CEREMA. (2018). *Théorie du trafic et régulation dynamique*,. Paris: CEREMA.
- CERTU. (1998). *La tarification dans les transports publics urbains départementaux et régionaux*. Lyon: CERTU.
- CERTU. (2002). *Calcul a posteriori des distances dans les enquêtes ménages déplacements* . . Lyon: CERTU.

- CERTU. (2002). *Densité de population et morphologie du bâti*. . Lyon: CERTU.
- CERTU. (2003). *Modélisation des transports urbains de voyageurs*. Lyon: CERTU.
- CERTU. (2009). *Contraintes de stationnement et pratiques modales Méthodologie et étude des cas de Lille, Lyon et Montpellier*. Lyon: CERTU.
- CERVERO, R., & KOCKELMAN, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design,. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, n°3,, 199-219.
- CGDD. (2010). *La mobilité des Français Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements*. . Paris: CGDD:<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rev3.pdf>.: CGDD.
- CGDD. (2017). *Analyse coûts bénéfiques des voitures électriques*. Paris: CGDD.
- CGSP. (2013). *évaluation socio-économique des investissements publics*. . Paris: CGSP.
- CHABROL, M. (2016). *Energie, territoire et Path dependence : enjeux spatiaux et territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Avignon.: Université d'avignon.
- CHALINE, C. (1985). *Les villes nouvelles dans le monde*. . Paris: Presse Universitaire de France.
- CHALINE, C. (1991). *Le Royaume-Uni : Economie et régions*. . Paris: Masson.
- CHAMBRE REGIONALE DES COMPTES. (2016). *Commune de Suresnes (92) Enquête stationnement urbain – Exercices 2010 et suivants*. Paris: chambre régionale des comptes.
- CHARMEAU, F. (2015). *De la densité à l'intensité urbaine : étude de cas sur Toulouse*, . Toulouse: HAL Id: dumas-01224983.
- CHARMES, E. (2010). *la densification en débat*, . Paris: etudes foncières .
- CHATZIS. (2013). *Une histoire comparée de la modélisation des déplacements urbains en france et en amérique du nord (Etat Unis et Canada) sur la longue durée (1950 à nos jour): quelles leçons pour la production et le maintien d'une expertise technico-scientifique?* . Paris: Ministère de l'Ecologie.
- CHOAY, F. (1969). *Urbanisme utopie et réalité, Une anthologie*. . Paris: Point.
- CITEPA. (05, 01 2015). *Polluant et GES*. Récupéré sur CITEPA: <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/23-polluant-et-ges>.
- CLARCK, C. (1952). Urban population densities, . *Journal of the royal Statistical Society série A, n°114*. , 490-496.

- CLEMENT, L. (1995). La conjecture de M.J.H. Mogridge : test sur l'agglomération de Lyon. . *Les Cahiers Scientifiques du Transport* , 51-64.
- CLERVAL, A. (2008.). *La gentrification à Paris intra-muros : dynamiques spatiales, rapports sociaux et politiques publiques*. Paris: Université Panthéon-Sorbonne, tel-00347824.
- CNRS. (01, 01 2006). *La gestion des déchets nucléaires* . Récupéré sur CNRS: http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2006/02_Dejets_nucleaires.pdf:
- COASE, R. G. (1987). La nature de la firme. . *Revue française d'économie volume 2, n°1*, 133-163.
- COMMISSARIAT AU DEVELOPPEMENT DURABLE. (2018, 06 01). <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>. Récupéré sur ministère du développement durable: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2017/datalab-27-CC-climat-nov2017-b.pdf
- COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. (01, 01 2015). *Chiffres clés de l'environnement*. Récupéré sur Ministère de la transition écologique et solidaire: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr>
- CONESA, A. (2010). *modélisation des réseaux de transports collectifs métropolitains pour une structuration des territoires par les réseaux*. Lille: université de Lille nord de France.
- COQUIO, J. (2008). *La performance adaptative des systèmes de transports collectifs. Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées*. Tours: Université François rabelais.
- CORNINCK, F., & MASSOT, M. (2007). *Les mobilités des actifs : les raisons du quotidien*. Marne la vallée: LVMT.
- COULOMBEL, N., & LEURENT, F. (2013, 01 01). Les ménages arbitrent-ils entre coût du logement et coût du transport : une réponse dans le cas francilien. . *Economie et Statistique, INSEE*, pp. pp.57-75.
- COUREL, J. (2010, 01 01). Mutations et inertie du parc automobile francilien,. *Note rapide* 257. Paris, Paris, IDF: IAU.
- COUREL, J. M. (2006). *Les déplacements de fin de semaine*. Paris: Enquête Global Transport.

- COURS DES COMPTES. (2015). *Le logement en île de France : donner de la cohérence à l'action publique.* . Paris: COURS DES COMPTES.
- COURS DES COMPTES. (2017). *La société du grand paris.* . Paris: COURS DES COMPTES.
- CROZET, Y. (2005). *Le temps et les transports de voyageurs.* Paris: CEMT.
- CUNIASSE, P. (2015). *Étude théorique et expérimentale des phénomènes de congestion sur un réseau ferroviaire urbain.* Lyon: Université de Lyon.
- CURIEN, N. (2000). *Economie des réseaux.* Paris: la découverte.
- DAEI/SES-Insee. (2004). *Les comptes des transports en 2003.* . Paris: DAEI.
- DALMENICO, A. P. (1986). *Une histoire des mathématiques.* Paris: Du seuil.
- DAVIS, M. (2000). *City of quartz, Los Angeles capitale du futur.* . Paris: La découverte.
- DE BIAISI, K., & VIROT, P. (2011). *Paris résiste au vieillissement démographique.*, Paris: INSEE.
- DE KEERSMAECKER, M. F. (2004, 01 01). Dimensions fractales et réalités périurbaines. L'exemple du Sud de Bruxelles. *FRANKHAUSER P DEKEERSMAECKER, M. (2004). Dimensions fractales et réalités périurbaines. L'exemple du Sud de Bruxelles. espace géographique, 219- 240., pp. 219- 240.*
- DE LA MORSANGLIERE, H. (1982). *Le transport des banlieusards.* Lyon: Presse universitaire de Lyon.
- DE PALMA, A. K. (2011). Discomfort in mass transit and its application for scheduling and pricing. *ITEA Conference.*
- DE TILIERE, G., & VIAUD, B. (2012). *contraintes et problématique des flux dans les gestion des flux dans le dimensionnement des gares,* . Paris: STIF.
- DEITZ, R. (1998, 01 01). A Joint Model of Residential and Employment Location in Urban Areas. . *Journal of Urban Economics,* , pp. 197-215.
- DELAMOTTE, P. (2008, 01 01). Les déterminants économiques de la densité parcellaire. *étude foncière , pp. 50-62.*
- DELAPORTE, C., & COUREL, J. (2006). *Les déplacements pour achats.*, Paris: DREIF.
- DELAUNAY, T. (2019). *L'intégration du covoiturage dans le système de mobilité francilien: hybrider le transport collectif et individuel?* Paris: Université paris est.
- DELPRAT, S. (2005). *Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles . . Valenciennes: Université de valenciennes et du hainaut-cambresis .*

- DIMITROPOULOS, J., & SORELL, S. (2007). *UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect Technical Report 2: Econometric studies* ., Brighton: University of Sussex.
- DIRIF. (2016, 01 01). *Les évolutions des indicateurs du trafic routier*. Récupéré sur Direction des routes d'île de france: <http://www.dir.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/les-indicateurs-d-evolution-du-traffic-routier-sur-a93.html>
- DREIA. (2010, 01 01). *Enquête Globale Transport*. Récupéré sur <http://www.omnil.fr> : <http://www.omnil.fr>
- DREIA. (2010). *Synthèse des études de trafic*. Paris: Métro du grand Paris.
- DREIA. (2011). *Etude du potentiel de densification des gares des haut de seine*. Paris: DREIA.
- DREIA. (2016). *Bilan 2015 des contrats de développement territorial (CDT)*. Paris: DREIA.
- DREIA. (2018). *Zones et part d'activité en IDF*. . Paris: DREIA.
- DREIA. (2017). *La répartition des emplois en IDF: un élément à prendre en compte pour améliorer les conditions de déplacement*. . Paris: DREIA.
- DRIEE. (2021, 09 01). *Données sur le parc de véhicules*. Récupéré sur <https://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr>: https://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/fiche_vehicules_com.pdf
- DUBOIS, N. (2004). *L'automobile : un espace vécu comme un autre chez soi*. . Nanterre: Université de Nanterre.
- DUFRANC, H., & GOMES, P. (2018). *Les logiques de production de l'espace public du grand Paris express le cas de la crouneuve les six route*. Paris: HAL Id: halshs-02363821.
- DUMAZEDIER, J. (1962). *Vers une civilisation du loisir?* Paris: Point.
- DUPUY, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes*. Paris: Armand Collin.
- DUPUY, G. (1999). *La dépendance automobile symptômes diagnostic traitement*. . Paris: Ville.
- DUPUY, G. (2002, 01 01). *cities and automobile dépendance revisité : les contrariété de la densité* . Récupéré sur cairn.info: <https://www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2002-1-page-141.html>
- DUPUY, G. (2002). *Internet géographie d'un réseau*. . Paris: ellipse.
- DURAN, F. (2000). *Métropoles et mouvements une comparaison internationale*. . Paris: Economica.

- EGT. (2010, 01 01). *https://www.omnil.fr/spip.php?article130*. Récupéré sur <http://www.omnil.fr>: <http://www.omnil.fr>:
- EINSTEIN, A. (1956). *La relativité*. Paris: Payot.
- ELILSSALDE, B. (2004, 01 01). *Polarisation*. Récupéré sur Hypergéô.: <https://www.hypergeo.eu/spip.php?article78>, .
- ENAULT, C. (2003). *Vitesse, accessibilité et étalement urbain, analyse et application à l'aire urbaine dijonnaise*. Dijon: Université de Dijon.
- ENERDATA. (2004). *Efficacité énergétique des modes de transport*, . Paris: Ministère de l'équipement.
- ENMV. (2020, 01 01). *Enquête Nationale des Mobilité et modes de Vies*,. Récupéré sur Forum vie mobile: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-35081-Enquete-mobilite-francais-forum-vie-mobiles-2020.pdf>
- EUROSTAT. (2014, 01 01). *Energy price statistics*. Récupéré sur EUROSTAT: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics/fr.
- FABUREL, G. (2019). *les métropole barbare: démondialiser la ville, desurbaniser la terre*. Paris: Le passager clandestin.
- FIJALKOW, Y. (2002). *Sociologie de la ville*. . Paris: Repère.
- FOUCHIER, V. (1995). *Densité urbaine et mobilité : que sait-on ? Que peut-on faire ? Mobilité et développement durable*. . Marne la vallée: : ENPC.
- FOUCHIER, V. (1997). *Les densités et la consommation d'espace en IDF*. Paris: SGVN.
- FOUCHIER, V. (1997). *mobilité dans un environnement durable*. Paris: Presse des ponts et chaussées.
- FOURASTIER, J. (1979). *Productivité et richesse des nations*. Paris: Gallimard.
- FRANCKHAUSER, P., & DEKEERSMARCKER, M. (2004). dimension, fractales et réalité périurbaine: l'exemple du sud de Bruxelles. *espace géographique*, 219-240.
- FRANCOIS, N. (1995). Villes, densités et fractalités. *Les annales de la recherche urbain plan urbanisme construction architecture*, 54-63.
- FREBAULT & DALMAIS VAN STRAATEN, C. (1988). Transport en commun et politique urbaine dans l'agglomération urbaine. *Les transport collectifs urbain, un défi pour nos villes* (pp. pp75-93). Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussée.
- FUJITA, M., & THISSE, J. (2003). *Econoimie de la ville et localisation*. Bruxelles: De Boeck.
- GALLEZ, C. (1995). *Analyse de la dépense énergétique et des émissions polluantes liées à la mobilité des franciliens*. Arcueil: INRETS.

- GALLEZ, C. (2000). *Indicateurs d'évaluation de scénario d'évolution de la mobilité urbaine*. Arcueil: INRETS.
- GALLEZ, C., & HIVERT, D. (1998). *BEED mode d'emploi*. Arcueil: INRETS.
- GALLEZ, C., KAUFFMANN, V., MASKIN, H., & VINCENT, S. (2010). *L'action publique face à la mobilité*. L'harmattan: Paris.
- GARREAU, J. (1991, 01 01). *www.garreau.com*. Récupéré sur www.garreau.com:
<http://www.garreau.com/main.cfm11.htm>
- GASHET, F. (2001). *la polycentralité urbaine*. Bordeaux: Université montesquieu Bordeaux IV.
- GENDRE GRAND PIERRE, C. (2007). changer de métrique des réseaux routiers. *les cahier scientifique du transport*, pp.45 - 66.
- GENDRE-GRAND PIERRE, C. (2006, 01 01). *Qualité de l'offre et usage du transport public en milieu urbain*. Récupéré sur Cybergeog:
<https://journals.openedition.org/cybergeog/6736>
- GERARD, M. (1985). Temps libre. Transport et urbanisme. *cahier groupe réseaux n°4*, 28-43.
- GERONDEAU, C. (2003). *La saga du RER et le chaînon manquant*. Paris: Presse des pont et chaussée.
- GEUR, K., & WEE, B. (2004). Accessibility evaluation of land use and transport stratégie:review and research direction. *Journal of transport* , pp 127-140.
- GIILI, F. (2004). *Choix de localisation des entreprises et périurbanisation des emplois*, . Lille: UNiversité de sciences et technologies.
- GLEYZE, A. (2001). *Réseaux,territoire et accessibilité*. Paris: IGN.
- GOBILLON, J., SELOD, H., & ZENOU, Y. (2003). Spatial mismatch : from the hypothesis to the theory. *CEPR*, Discussion paper.
- GORDON, P., & RICHARDSON, H. (1997). Are compact cities à désirable planning goal. *Journal of american planning association*, pp 95-106.
- GORDON, P., & SONG, S. (1991). *Does Generalizing Density Functions Better Explain Urban Commuting? Some Evidence from the Los Angeles Region*. Los Angeles: The university of california transportation working paper 197.
- GOVERNEMENT DU CANADA. (2015). *Hybrid Bus Procurement - A Buyer's Guide*. Montréal.: Gouvernement du canada.
- GRASLAND, C. (2001, 01 01). http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/anspa/concent/Ateg98_1.htm. . Récupéré sur <http://grasland.script.univ->

- paris-diderot.fr: http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/anspa/concent/Ateg98_1.htm.
- GRIMAL, L. (2001). *estimation de la demande ENTD et CCTN*. Lyon.: SETRA.
- GUDORF, F., HALLEGATE, S., & NADAUD, F. (2007). *An empirical analysis of the interactions between transportation prices and housing markets*. . Nogent sur marne: CIRED.
- GUEGUEN-AGENAIS, A. (2008). *La tarification des déplacements : évaluation de la pertinence d'une évolution tarifaire pour l'île-de-france*. Paris: LVMT.
- GUIBET, J., & FAURE, E. (1997). *Carburant et moteur : technologie, énergie environnement*. . Paris: Technip.
- GUIEYSSE, L., & MARCHAND, L. (1988). congestion urbaine et reponse de la planification en agglomération parisienne. *Les transports collectifs urbains* (pp. 111-122). Paris: Pont et chaussée.
- GUILLERME, A. (2004). *Dangereux, insalubre, inconmode*. Paris: Champ Vallon.
- GUYON, G. (2000). *Transport collectif urbain de voyageurs*, . Paris: Celse.
- HALBERT, L. (2004). *Densité, desserrement, polycentrisme et transformation économique des aires métropolitaines* . . Paris: Université de Paris 1.
- HAMMOND, G., & WINNET, A. (2015, 01 01). *The Influence of Thermodynamic Ideas on Ecological Economics: An Interdisciplinary Critique sustainability 2009*. Récupéré sur <https://www.mdpi.com/>: <https://www.mdpi.com/2071-1050/1/4/1195>
- HAUMONT, N. (2001). *Les pavillonnaires*. Lharmattan: Paris.
- HAYWOOD, L., & KONING, M. (2012). Avoir les coudes serrés dans le métro parisien : évaluation contingente du confort des déplacements ». . *Revue d'économie industrielle*,, pp 111-144.
- HERAN, F. (2009). À propos de la vitesse généralisée des transports. Un concept d'Ivan Illich revisité. *Revue d'economie regionale et urbaine*,, pp 449-470.
- HERAN, F., & RAVALET, E. (2008). *La consommation d'espace temps des divers modes de déplacements urbain l'application au cas de l'IDF*. Paris: PREDIT.
- HIVERT, L., & WINGERT, J. (2010). *Automobile et automobilité quelle évolution de comportements face aux variations des prix des carburant de 2000 à 2008 ?* PARIS: PREDIT.
- HOLDEN, E., & NORLAND, I. (2005, 11 01). three challenge for the compact citie as a sustainable urban form : household consuption of enery and trnsport in eigtrésidential areas i the greater Oslo region, . *urban studies*, pp. pp 2145-2166. .

- HONG, T. (2011). *Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un Véhicule dans un contexte de sécurité et de confort : un compromis entre économie et écologie*. Evry: Université d' Evry-Val-d'Essonne.
- HOSTIS, A. (2016, 09 15). *Les périmètres du Transit Oriented Development : caractérisation de la relation entre ville et transport collectif*. Récupéré sur HAL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01366832>
- HOUILLON, V., & THOMESIN, L. (2005, 01 01). Définition du rural et de l'urbain dans quelques pays européens. *Persée*, pp. 195-200.
- HUGREL, C., & JOUMARD, C. (2004). *Transport routier, parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025*. Arcueil: INRETS.
- HURIOT, J. (1990). *La rente foncière approche théorique et empirique*. Paris: ADEF. Paris: ADEF.
- IAU. (2013). *La circulation routière en Île-de-France en 2010*. Paris. : IAU.
- IAU. (2014). *Étude des déplacements longue distance émis et reçus par la région Île-de-France*. Paris: IAU.
- IAU. (2014, 01 01). Métropole du Grand Paris et mobilité. Quels impacts ? Quels enjeux ? . *Note rapide 69*. Paris, IDF, France: IAU.
- IAU. (2017, 01 01). articulation entre gares et quartiers de gare : la méthode node-place. *Note rapide 472*. Paris, IDF, France: IAU.
- IDF MOBILITE. (2015, 06 01). *Trois types de tarification en IDF*. Récupéré sur Ile de france mobilité: <https://www.iledefrance-mobilites.fr/le-reseau/trois-types-de-tarification-en-ile-de-france/>
- IDFM. (2017, 01 01). *CONTRAT STIF-RATP*. Récupéré sur Île-de-France Mobilités: <https://www.iledefrance-mobilites.fr/decouvrir/contrat-stif-ratp>
- ILCHEV, K. (2017). *L'efficacité énergétique et le droit*. Marseille (2017AZUR0035. tel-01954803): Université Côte d'Azur, 2017.
- ILLITCH, I. (1973). *Énergie et équité*. Paris: Marée noire.
- IMPÔT. (2010, 01 01). *Statistique*. Récupéré sur Impôt.gouv: <https://www.impots.gouv.fr/portail/statistiques>
- IMPÔT. (2010, 01 01). *Statistique*. Récupéré sur Impôt: <https://www.impots.gouv.fr/portail/statistiques>
- INSEE. (2004, 06 06). *Statistique*. Récupéré sur INSEE: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2579979/imet-hs-i-chapitre-g.pdf>

- INSEE. (2017, 01 01). *statistique*. Récupéré sur INSEE:
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2017613?sommaire=2017614>.
- ISRN. (2016, 01 01). *Examen des systèmes d'énergie nucléaires de 4ième génération*. .
 Récupéré sur ISRN:
http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20150427_Systemes-nucleaires-4eme-generation-Etat-des-lieux-potentiel-de-surete.aspx#.V-u3ydBOKUk
- JACQUOT, A. (2000). *Les modèles économétriques*. . Paris: CNAF.
- JOIGNAUX, G., & VERNY, J. (2003, 12 01). Le découplage entre transport de marchandises et croissance : organisations productives, localisations et demande de transport., *RERU*, pp. pp 779-791.
- JOLY, I. (2002). *La loi de zahavy:quelle pertinence pour comprendre la contraction et la dilatation des espaces-temps de la ville?* Lyon: LET.
- JOLY, I. M. (2003). *La part modale des transports en commun dans les villes du monde*. Lyon: LET.
- JORDAN, S. (1998). US suburbanization in the 1980's ., *Regional Science and Urban Economics*,. *Regional Science and Urban Economics n°28*, 611-627.
- JULLIEN, P. (2000). Mesurer un univers urbain en expansion,. . *economie et statistique n°338*, 3-33.
- JULY, E. (2019, 07 01). *Interdiction des voitures les plus polluantes à Paris : ce 1er juillet, dehors les pauvres !* Récupéré sur www.marianne.net:
<https://www.marianne.net/economie/paris-vignette-crit-air-4-5-critere-anti-pauvres>
- KAIN, J. (1968, 01 01). Housing segregation, negro employment and metropolitan decentralization. . *Quarterly Journal of Economics n°82*, pp. 97-175.
- KAUFMANN, V. (2000). *Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines, la question du report modal*. Lausanne: Presse universitaire et polytechnique romande.
- KAZZHOM, D. (1980). Les implications économiques pour les normes d'efficacité prescrites pour les appareils ménagers. *l'energie journal*, 20-41.
- KOENING, G. (1974, 01 01). Théorie économique de l'accessibilité urbaine. *Revue économique volume 25,n°2*, pp. 275-297.
- KOLI, Z. (2013). *Dynamique de renouvellement du parc automobile Projection et impact environnemental* . Paris: Université de paris 1.
- KONING, M. (2012). *Essais sur la congestion dans les transports à Paris* . Paris: Université Panthéon-sorbonne H.
- KUKLICK, H. (2000). *L'école de chicago*. Paris: Flammarion.

- KWON, T. (2005). Decomposition of factors determining the trend of CO2 emissions from car travel in Great-Britain,. *Ecological Economics*, 261-275.
- LACOSTE, Y. (2012, 06 01). *EducSol*. Récupéré sur Ministère de l'éducation nationale:: <http://eduscol.education.fr/cid45995/la-question-des-echelles-en-geographie.html>
- LANG, R., & SIMMONS, P. (2001, 01 01). 'Boomburbs' : the emergence of large, fastgrowing suburban cities in the United States. *Fannie mae fondation census*. New york, New york, USA: Fanny mae.
- L'ARGUS. (2019, 12 17). *grand-paris-les-restrictions-de-circulation-plus-severes-dici-2030-10194401*. Récupéré sur L'argus: [//www.largus.fr/actualite-automobile/grand-paris-les-restrictions-de-circulation-plus-severes-dici-2030-10194401.html](http://www.largus.fr/actualite-automobile/grand-paris-les-restrictions-de-circulation-plus-severes-dici-2030-10194401.html)
- L'AUTO EN CHIFFRE. (2020, 06 03). *immatriculation essence/diesel*. Récupéré sur L'auto en chiffre:: <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/l-auto-en-chiffres/s-891-immatriculations-essence-diesel.php>
- LE BRETON, E. (2008). *Domicile travail les salariés à bout de souffle*. Paris: Cahier de l'info.
- LE FAUCONNIER, A., & GANTELET, E. (2013). *La recherche d'une place de stationnement : stratégies, nuisances associées, enjeux pour la gestion du stationnement en France*. Paris: SARECO.
- LE GALLO, J. (2002). Économétrie spatiale : l'autocorrélation spatiale dans les modèles de régression linéaire. *Économie & prévision*, 2002/4 (no 155),, 139-157. Récupéré sur <https://www.cairn.info/revue-economie-et-prevision-1-2002>
- LE GLEAU, J. (1999, 01 01). un zonage pour quoi faire, . *Projet d'article annale des ponts et chaussée 1999*. Paris, Paris, France: Annale des ponts et chaussée.
- LE NECHET, J. (2010). *Approche multiscalaire des liens entre mobilité quotidienne, morphologie et soutenabilité des métropoles européennes. Cas de Paris et de la région*. Marne la vallée: Université de Paris Est.
- LESEL, J. (2016). *Optimisation de la consommation énergétique d'une ligne de métro automatique*. Paris: Ecole nationale supérieure d'arts et métiers -.
- LESTEVEN, G. (2014). *Les stratégies d'adaptation à la congestion automobile dans les grandes métropoles. Analyse à partir des cas de Paris, Sao Paulo et Mumbai université*. Paris: université Paris 1 Sorbonne.
- LEURENT, F. (2009, 01 01). Annual meeting of the transportation research board session transit capacity and quality of service. *On Seat Congestion, Passenger Comfort and Route Choice in Urban Transit: a Network Equilibrium Assignment Model with*

- Application to Paris*. Washington, Columbia, USA: Annual meeting of the transportation research board session transit capacity and quality of service. .
- LEVERNIER, W., & CUSHING, P. (1994, 01 01). A new look at the determinant of intrametropolitan distribution of population and employment. *urban Studie*, pp. 1391-1405.
- LEVY, D. L. (2011, 01 01). INSEE première. *Un habitant de pôle urbain emet deux fois de CO2 que la moyenne pour se rendre à son lieu de travail ou d'études*. Paris, Paris, France: INSEE.
- LEYSENS, T. (2011). *Reconfiguration des réseaux de transport et Renouveau urbain. L'enjeu d'un urbanisme orienté vers le rail*. Lille: Université des Sciences et Technologie de Lille.
- LHEUREUX, G. (2008). *l'aerodynamique, de la theorie aux formules un* . Douais: ecole des mines.
- LHOMME, S. (2018, 01 01). *Les principaux modèles d'analyse spatiale dans le domaine du Géomarketing - Serge Lhomme*. Récupéré sur Site pédagogique de Serge Lhomme, : http://sergelhomme.fr/doc/Geomarketing_stat_carto.pdf
- LHOMME, W. (2007). *gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique*. Lille: université de Lille.
- LINOSSIER, R. (2014). *Work in my back yard ! implantation des activités économiques et intensification urbaine des tissus pavillonnaires*. . Paris: Ministère du logement et de l'égalité des territoires.
- LIPIETZ, A. (1974). *le Tribut foncier urbain*. Paris: Maspero.
- MA, T. (2007). *modèle de transport basée sur les activités*. Marne la vallée: ENPC.
- MACARIO, M. (2012). *L'aménagement des centres-villes : la mobilité, vecteur et acteur de la centralité urbaine*,. Aix marseille III: Ecole doctorale des sciences juridiques et politiques.
- MACE, P. (1993). *l'articulation du foncier et de l'immobilier*. Paris: ADEF.
- MALAKOFF. (2010). *Compte rendu du conseil municipal*. Malakoff: Malakoff.
- MARET, I. (2003). *Etalement urbain et friche industrielle revers de l'idéal américain*. Paris: L'harmattan.
- MARGAIL, F. (1996). De la correspondance à l'interopérabilité : les mots de l'interconnexion. *Flux*, n°25, pp. 28-35.
- MARSHALL, A. (1906). *Principes d'économie politique*. Paris: v. Giard & e. Brière.
- MARTIN, J. (1990). *économie mondiale de l'énergie*. Paris: La découverte. .

- MARX, K. (1867). *le capital*. Paris: Flammarion.
- MASSON, S. (2000). *les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*. Lyon. : Lyon 2.
- MASSOT, M. J. (2003). Une ville sans voiture utopie ? *RERU*, pp 742-753.
- MASSOT, M., & ROY, E. (2004). *Lieu de vie-Lieu de travail. 25 ans d'évolution de la distance au travail*. Arcueil: INRETS.
- MATHON, S. (2008). *Le stationnement résidentiel sur l'espace public État des lieux, problèmes et perspectives*. Paris.: Université de Paris 13 .
- MATTEI, M., & PUMAIN, D. (1998). *Données Urbaines*. Paris: Anthropos: collection ville.
- MAUPU, J. (2006). *La ville creuse pour un urbanisme durable*. Paris: L'Harmattan ville et entreprise .
- MENERAULT, P. (2008). *Les Pôles d'échanges en France, état des connaissances, enjeux analyses*. Arcueil.: INRETS.
- MERCIER, A. (2008). *Accessibilité et évaluation des politique de transport en milieu urbain : le cas strasbourgeois*. Lyon.: Université Lyon 2 .
- MERLIN, P. (1991). *géographie, économie et planification des transports*. Paris: PUF.
- MESTER, V. (2007). *Conception optimale systémique des chaînes de traction électriques*. Lille.: Ecole centrale Lille.
- METEYER, J. (1997). *La diésélisation du parc automobile*. Paris: SES.
- MIGNOT, D. A. (2006). *Permanence de la métropolisation et étalement urbain*. Paris: ADEME. Paris: ADEME.
- MILAKIS, D. C. (2015). Stay local or go regional? Urban form effects on vehicle use at different spatial scales: A theoretical concept and its application to the San Francisco. *Journal of Transport and Land Use*, pp. 59–86.
- MILLE, M. (2000). Des densités habitantes aux densités mouvantes l'exemple de la métropole lilloise. *Cybergéo*, 121.
- MILLION, C. (2015). *méthodes et modèles pour l'étude de la mobilité des personnes par l'exploitation de données de radiotéléphonie*. Paris: Ecole Doctorale Ville Transport et Territoires.
- MILLS E.S. PRICE, R. (1984). Metropolitan suburbanisation and central city problems. *Journal of Urban Economics*, pp 1-17.

- MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE. (2010). *l'aménagement de la region IDF*. Paris: Centre de ressource documentaires aménagement logement nature: www.cdu.urbanisme.developpement-durable.gouv.fr.
- MINISTERE DE L'EQUIPEMENT. (1997). *transports urbains et calcul économique*. . Paris: : Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme.
- MIRABEL, F., & REYMOND, M. (2013). *économie des transports urbains*. Paris: Repère la découverte.
- MORENA SIERRA, D. (2009). *Une approche réseau pour l'intégration de la morphologie urbaine dans la modélisation spatiale individu-centré*. Pau: Université de Pau.
- MOTTE, B. (2006). *La dépendance automobile pour l'accès aux services aux ménages en grande couronne francilienne*. Paris: Université Panthéon-Sorbonne.
- MOTTE-BAUMVOL, B. (2007, 12 01). La dépendance automobile pour l'accès des ménages aux services : Le cas de la grande couronne francilienne. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, pp. 897-919.
- MUNAFO, S. (2017). *La ville compacte remise en cause ? Formes urbaines et mobilités de loisirs* . Genève.: Alphil-Presses universitaires suisses.
- MYSWEETIMMO. (2020, 08 26). *Grand Paris : La proximité des nouvelles gares du Grand Paris Express a t-elle déjà un impact sur les prix de l'immobilier ?* Récupéré sur mysweetimmo.com: <https://www.mysweetimmo.com/2020/01/01/grand-paris-la-proximite-des-nouvelles-gares-du-grand-paris-express-a-t-elle-deja-un-impact-sur-les-prix-de-limmobilier/>
- NESSI, H. (2012). *Incidences du contexte urbain et du rapport au cadre de vie sur la mobilité de loisir. Economies et finances*. Paris: Université Paris-Est.
- NEWMAN, P. (1995). Sustainability and the post-modern city: some guidelines for urban planning and transport. *the environmentalist* n°4, pp 257-266.
- NEWMAN, P., & KENWORTHY, J. (1990). *Cities and automobile dépendance, an international source book*. Londre: Gower.
- NOE, J. (2010). *Total. Une histoire des hommes qui ont bâti une référence mondiale*. Paris: Université de Paris 1 .
- NOIN, D. (1994). *Géographie de la population*. Paris: Armand Collin.
- NOTRE-ENVIRONNEMENT.GOUV. (2019, 01 01). *les emssions de gaz à effet de serre dans les transports*. Récupéré sur notre environnement.gouv: <https://www.notre-environnement.gouv.fr/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/defis->

- environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-des-transports
- OAKIL AT, E. M. (2014). Changing household car ownership level and life cycle events: an action in anticipation or an action on occurrence. *Transportation*, 41 , pp. 889–904.
- OBSERVATOIRE ELECTRICITE. (2015, 01 01). <http://www.observatoire-electricite.fr/Les-prix-finaux-de-l-electricite#Evolution-historique-du-prix-de-l-electricite-en-France>. Consulté le 01 01, 2015. (2015, 01 01). *Evolution-historique-du-prix-de-l-electricite-en-France*. Récupéré sur [observatoire-electricite.fr](http://www.observatoire-electricite.fr): <http://www.observatoire-electricite.fr>: <http://www.observatoire-electricite.fr/Les-prix-finaux-de-l-electricite#Evolution-historique-du-prix-de-l-electricite-en-France>
- OFFNER, J. (1993, 03 01). Les « effets structurants » du transport : mythe politique, mystification scientifique. *Espace géographique*, pp. pp 233-242.
- OFROU. (2010). *Systèmes de mesure du trafic routier*. Genève: laboratoire METAS.
- ORAIN, O. (2004). La géographie française face à la notion d'échelle. Une approche par les significations et les contenus épistémologiques. Dans M. ROBIC, *Echelles et temporalités en géographie*. (pp. pp.2-24). Paris: CNED.
- ORF. (2014). *Le foncier du grand Paris : comment le mobiliser*. Paris: ORF.
- ORFEUIL, J. (1998). *Etat des lieux sur l'état de la mobilité quotidienne en France*. Créteil: IUP Créteil .: IUP Créteil .
- ORFEUIL, J. (2002). *Transport, pauvreté exclusion*. Paris: L'aube.
- ORFEUIL, J. (2011, 01 01). Quelles transitions énergétiques pour la mobilité urbaine? *Les cahiers du développement durable*, pp. pp157-163.
- ORFEUIL, J. (2020, 03 01). Les débats sur la densité, la mobilité et la sobriété. *Constructif*, pp. pp 17-20.
- OSORIO, B. M. (2017, 01 01). understanding the relation between energy consumption and urban form,. *athens journal of science*, pp. pp 115-142 .
- PADEIRO, M. (2012, 03 01). polarisation sociale selective autour des lignes prolongées du métro parisien. . *cahier scientifique du transport*, pp. pp 119-158.
- PARIS, V. D. (2019, 09 17). *La Zone à faibles émissions (ZFE) pour lutter contre la pollution de l'air*. . Récupéré sur www.paris.fr:: <https://www.paris.fr/pages/nouvelle-etape-crit-air-des-le-1er-juillet-2017-4834#suis-je-autorise-e-a-circuler-a-paris>
- PASSALACQUA, A. (2011). *l'autobus et Paris histoire de mobilité*. Paris: Economica.
- PASSALACQUA, A. (2011). *l'autobus et Paris histoire de mobilité*. . Paris: Economica.

- PAYTHIEU, J. (1991). *Le financement de l'emploi et de la construction de logement*. . Paris: Sirey.
- PELE, N. (2018). *dépenses des ménages pour leur mobilité quotidienne – une approche par les formes urbaines*. Lyon: école polytechnique de Montréal et université lumière lyon 2.
- PERCEBOIS, J. (1989). *économie de l'énergie*,. Paris: Economica.
- PICHERIT, M. (2010). *évaluation environnementale du véhicule électrique: méthode et application*. Saint etienne: école des mines Saint-Etienne .
- PIFFARD, M. (2017). *Conception d'observateurs pour la commande d'un système pile à combustible embarqué en vue d'optimiser performances et durabilité*. . Lyon: Université de Lyon.
- PINCON, M. P.-C. (2004). *Sociologie de Paris*. . Paris: La découverte.
- PLASSAT, G. (2005). *Les technologies des véhicules lourds et les émissions de gaz à effet de serre associées*. Paris: ADEME.
- POUYANNE, G. (2004). *Forme Urbaine et Mobilité Quotidienne*. Bordeaux: Université de Bordeaux.
- POUZOLET, C. (2000). *New York, New York*,. Paris: Belin.
- PRALY, C. C. (01, 07 2009). *la notion de "proximité" pour analyser les circuits courts*. . Récupéré sur HAL open science: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00617164/document>
- PREDIT. (2000). *évaluation des modèles de prévision de trafic*. . Paris: PREDIT.
- PREDIT. . (2010). *Pétrole, mobilité, CO2 :Les politiques publiques et l'automobilité face à la variation des prix du pétrole*. . Paris: PREDIT.
- PRUD'HOMME, J. (2016, 03 01). le réseau routier, déterminant structurel de la quantité de polluants émis par les déplacements automobiles. *Flux*, pp. pp 50-61.
- PRUD'HOMME, R. D. (2000). *Développement urbain : les nouvelles contraintes*. Paris: VEOLIA.
- PUMAIN, D. (2003, 12 09). Du local au global une géographie sans échelle. *Cybergéo*, p. pp 1.
- PUMAIN, D. (2014, 01 01). Les effets structurants des infrastructures de transport. . *L'Espace géographique*, pp. pp 51-67.
- QUESNAY, F. (1758). *Physiocratie*. Paris: Flammarion.
- QUIN, C. D. (2008). *Exemples de coûts unitaires de déplacements*,. . Paris: CCTN.
- QUIN, C. D. (2008). *Exemples de coûts unitaires de déplacements*. CCTN.: Paris.

- QUINET, E. (1995). *principe d'économie des transports*, . Economica: Paris.
- RAKOTAMALA, R. (2017). *Patrique de la regression logistique binaire et polytomique*. . Lyon: Universite de Lyon.
- RALLET, A., & TORRE, A. (2004, 01 01). Proximité et localisation. *Economie Rurale*, pp. pp25-41.
- RATP. (2001). *contribution de la RATP au plan national d'efficacité énergétique*. Paris: RATP.
- RATP. (2010). *étude de trafic*. Paris: métro du grand Paris .
- REDOR, P. (2007, 01 01). *Mesure et définition de l'étalement urbain de quoi parle t'on ?* . Récupéré sur CNIS: https://www.cnis.fr/wp-content/uploads/2017/12/DPR_2007_FORM_urbanisme_mesures_etalement_urbain.pdf
- REDOR, P. (2007). *Mesure et définition de l'étalement urbain de quoi parle t'on ?* . Paris: INSEE.
- RICARDO, D. (1817). *Des principes de l'économie politique et de l'impôt*. Paris: Flammarion.
- RICHER, C., & PALMIER, P. (2012, 09 01). Mesurer l'accessibilité territoriale par les transport en collectif. Proposition méthodologique appliquée aux pôles d'excellence. *cahire géographique du quebec*, pp. pp 427-461.
- RITCHOT, G. M. (1994, 01 01). L'étalement urbain comme phénomène géographique : l'exemple de Quebec. *cahier géographique du Quebec*, pp. pp 261-300.
- ROCCI, A. (2007). *De l'automobilité à la multimodalité? Analyse sociologique des freins et leviers au changement de comportements vers une réduction de l'usage de la voiture. Le cas de la région parisienne et perspective internationale*. Paris: Université René Decartes.
- ROLIN, O. (2004). *La baisse des vitesses et des consommations de carburant des voitures*. . Paris: SES.
- RONCAYOLO, M. (1997). *La ville et ses territoires*. . Paris: Folio.
- RONCAYOLO, M. (2001). *La ville aujourd'hui, mutations urbaines,urbanisation et crise du citoyen*. Paris: Point.
- ROQUES, P. (2016). *La question de la consommation d'énergie dans les logements sociaux réhabilités*. Nice: École doctorale Droit et sciences politiques, économiques et de gestion.
- ROQUINY, Q. (2013). *Valeur du temps*. . Paris: CGSP.

- ROSE-ACKERMAN, S. (1975, 01 01). Racism and urban structure. *Journal of Urban Economics.*, pp. pp 85-103.
- SAINT JULIEN TH LE GOIX, R. (1995). *La métropole parisienne, centralité inégalité proximité.* Paris: Belin.
- SAMADZAD, M. (2008). *Modélisation désagrégée du choix modal des voyageurs en île-de-france.* Champs sur marne: ENPC.
- SASSEN, S. (1991). *La ville globale New York Londres Tokyo.* Princeton: Princeton university press.
- SCHNEE, D. (2014). *Attraction et concentration : vers un polycentrisme intégrateur : éléments d'analyse et de prospective appliqués au cas de la Gironde.* . Bordeaux: Université de Bordeaux.
- SCHNEIDER, F. (2003). L'effet rebond. *The Ecologist*, 43-47.
- SCHORUNG, M. (2021, 03 01). L'aménagement des gares du Grand Paris Express face à la gouvernance complexe de la région-capitale. L'instrument du comité de pôle comme réponse pour une meilleure coordination des acteurs ? ». *L'Espace Politique*, pp. pp1-20.
- SCHUMPETER, J. (1935). *Théorie de l'évolution économique.*, Paris: Dallooz.
- SDRIF. (2006). *Transports et Energie en Île-de-France.* SDRIF.: Paris.
- SECODIP. (2010). *Mesure SECODIP.* Paris: SECODIP.
- SECODIP. (2010). *Mesure SECODIP.* Paris: SECODIP.
- SEILER, W., & LEDUC, J. (2011). *Alimentation des véhicules ferroviaires urbains.*, Paris: Technique de l'ingénieur.
- SERGOT, B. (2004). *Les déterminants des décisions de localisation -Les créations de nouveaux sites des entreprises françaises de l'industrie et des services.* . Paris: Université PanthéonSorbonne.
- SETRA. (2008). *Mobilité longue distance.* Lyon: SETRA.
- SETRA. (2009). *Emission routière de polluants atmosphériques, courbes et facteurs d'influence.* Lyon: SETRA.
- SGP . (2019). *Grand Paris Express Interconnexions lignes 15 Sud et Est.* Paris: SGP.
- SGP. (2010). *Synthèse des études de trafic.* , Paris: SGP.
- SGP. . (2019). *interconnexion ligne 15 sud et est, dossier du maître d'ouvrage.* . Paris: SGP.
- SHAFER, A. (2000, 01 01). Regularities in Travel Demand An International Perspective,, *Journal of Transportation and Statistics.*, pp. pp 1-30.
- SMITH, A. (1776). *Richesse des nations.* Paris: Flammarion.

- SONG, S. (1992). *Monocentric and Polycentric Density Functions and Their Required Commutes*. Los Angeles: The University of California Transportation Center.
- SPRONI, N. (2005). *Technologie dans les pôles d'échanges multimodaux*. Paris: ENTPE.
- STANBACK, T. (1991). *The New Suburbanization*. Boulder: Westview Press.
- STATHOPOULOS, N. (1994, 01 01). Effets de réseau et déséquilibres territoriaux dans la structure de l'offre ferroviaire à Paris. *Flux*, pp. pp17-32.
- STEINBERG, J. (1981). *Les villes nouvelles d'Île-de-Franc*. Paris: Masson.
- STEINNES, D. (1982, 01 01). Do people follow jobs or do jobs follow people ? *Urban Studies*, pp. pp 187-192.
- STIF. (2000). *Les normes de stationnement dans les plans locaux d'urbanisme méthodes et bonnes pratiques*. Paris.: STIF.
- STRANSKY, V. (2008, 01 01). Vers une métrique de la connexion intermodale : un essai de quantification de la cohérence entre mode de transport. *Cahier scientifique du transport*, pp. pp 57-90.
- STRANSKY, V. (2019, 01 01). Périurbain et Transit-Oriented Development :un couple invraisemblable? *Flux*, pp. 33-57.
- SYROTA, J. (2008). *Perspectives concernant Le véhicule « grand public » d'ici 2030*. Paris: conseil d'analyse stratégique.
- TAI-YU-MA. (2007). *Modèle de transport basé sur les activités*. Champs sur Marne: Ecole Nationale des Ponts et chaussées.
- TEBOUL, R. C. (2000). *La question urbaine dans l'histoire de la pensée économique*. Paris: L'Harmattan.
- TERMOTTE, M. (2005). Implication urbaine des mutations économiques et démographique des pays développés. Dans A Aguilera, *Les villes ont-elles achevé leur transition ?* (pp. pp. 63-72). Paris: Collection de l'Inrets.
- TERRIER, C. (2000, 01 01). L'Europe et les Zonages (projet d'article). *Annales des ponts et chaussés*. Champs sur Marne, Seine et marne, France: Ponts et chaussés.
- THIerno, A. (2010). *La ville nouvelle de Marne-la-Vallée et son insertion dans la dynamique francilienne : évaluation des enjeux du renforcement de la structure polycentrique sur les systèmes de déplacements*. Paris.: Université Paris-est.
- THURSTON, L., & YEZER, A. (1994, 01 01). A Causality in the Suburbanization of Population and Employment. *journal of urban economics*, pp. pp 111-118.
- TOPALOV, C. (1977). *le projet, la rente et la ville, Elément de théorie*. Paris: Economica.

- TOUATI, A. (2013). *Vers des politiques publiques de densification et d'intensification « douces »? Intérêts, limites et opportunités*. Paris: La Documentation Française .
- TRICOIRE, J. (1999). *De Bienvenue à météor un siècle de métro en 14 lignes*. . Paris: La vie du rail.
- TROTEAU, C. (2013). *La sobriété énergétique dans les scénarios de transition énergétique forte*. Bruxelles: université libre de Bruxelles .
- TROUILLARD, E. (2008). *Approches géographiques contemporaines de l'espace urbain*. . ENS: Paris.
- UITP. (2001). *Mobility in citie datase*. Bruxelles: Union Internationale des Transporteurs Publics.
- UITP. (2001). *Un réseau d'autobus libéré de la congestion*. . Bruxelles: UITP.
- UNIL. (2016). *Intensité urbaine*. . Lausanne: Observatoire universitaire de la ville et du développement durable.
- VALIQUETTE, F. (2010). *Typologie des chaînes de déplacements et modélisation descriptive des systèmes d'activités des personnes*. s.l. Montreal: École polytechnique.
- VEBLEN, T. (1899). *Theorie de la classe de loisir*. Paris: Gallimard.
- VINCENT, S. M. (2010). *L'action publique face à la mobilité*. Paris: L'Harmattan.
- VIRE, E. (1998, 01 01). La polarisation au sein de la région parisienne : 1982-1994. . *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, pp. pp. 83-94;.
- VIVIER, J. (2000). *Millenium cites database, un projet innovant pour un transport durable*. . Bruxelles: UITP.
- W.S, J. (1865). *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Problem of Exhaustion of Our Coal-mines*, . Londres: Macmillan.
- WALRAS, L. (1874). *Éléments d'économie politique pure*. Paris: Economica.
- WARDROP, J. (-3. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*,, pp 325-362.
- WATCHER, S. (2003). *Figure urbaine et architecturale de la mobilité*. Paris: IAU.
- WHEATON, M. (1974). 100 years of Commercial Real Estate prices in Manhattan. *Department of Economics Center for Real Estate*, pp 50-62.
- WIEL, M. (1999). *La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée*. Paris: Mardaga.
- WIEL, M. (2002). *Ville et automobile*. Paris:: Descartes et Cie.
- WIEL, M. (2005). *Ville et mobilité un couple infernal*. . Paris: Aube intervention.

- WIEL, M. (2010). *Etalement urbain et mobilité* . Paris: La documentation française.
- WONNACOT, J. R. (1974). *Statistique*. Paris: Economica.
- YU, Y. (2012). *cinétique d'autoinflammation des carburant à haute pression : étude expérimentale et modélisation*, . Lille: Université des sciences et des technologie.
- ZAHAVI, Y. (1974). *Traveltimes budgets and mobility in urban aeras*. New York:: US department of transportation.
- ZARCHASIEN, B. (2003). *Retour en ville*. . Descartes et CIE: Paris.
- ZITTOUN, P. (2001). *La politique du logement*. Paris: L'harmattan.