Sétra

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

juillet 2013

Rapport d'étude

Calculs d'accessibilité
Calibrage de la fonction de distribution gravitaire des déplacements

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Page laissée blanche intentionnellement

Sommaire

1 – Introduction……5

2 - Indicateurs d'accessibilité……5

2.1 - Définitions de l'accessibilité……5

2.2 - Les indicateurs couramment utilisés……6

3 - Indicateur gravitaire : applications et justification théorique……11

3.1 - Loi de distribution gravitaire des déplacements……11

3.2 - Lois gravitaires et principes de modélisation……14

4 - Méthode de mise à jour de coefficient de l'instruction provisoire routes……16

4.1 - Annexe 13 de l'instruction cadre de 2007……16

4.2 - Source de l'annexe 13……16

4.3 – Méthode…… 18

5 - Mise en œuvre de la méthode……20

5.1 - Calcul des temps de parcours……20

5.2 - Création de la matrice des flux……25

5.3 - Calibrage et résultats……27

5.4 - Limites……29

5.5 - Tests sur différentes régions……30

6 - Mise à jour des fonctions résistives……34

6.1 - Objectifs……34

6.2 - Exemple du motif domicile-travail……34

6.3 - Résultats……36

7 - Eléments de conclusion……38

8 - Bibliographie……39

1 - Introduction

L'accessibilité est une notion à laquelle a souvent recours l'évaluation d'un projet de transport. Morris et Al. en donnent une définition générale communément admise : il s'agit d' *"une mesure de la séparation spatiale des activités humaines. Elle traduit la facilité avec laquelle les activités peuvent être atteintes étant donnés un lieu d'origine et un système de transport"*. En ce sens, l'accessibilité est déjà largement utilisée dans le processus d'aide à la décision des politiques publiques, à travers notamment l'utilisation de cartes d'accessibilité.

Les instructions cadre d'évaluation des projets de transport en vigueur préconisent l'utilisation de calculs d'accessibilité dans les méthodes d'évaluation de projet de transport. Ainsi, l'instruction cadre provisoire relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains de 2007, préconise dans son annexe 13, de mesurer les gains d'accessibilité aux emplois pour des déplacements de type professionnel afin de les prendre en compte dans l'analyse multicritère. Une formule détaillée est fournie pour calculer l'indicateur d'accessibilité choisi. Cette formule est composée notamment d'une fonction appelée fonction de décroissance ou fonction résistive, qui traduit la diminution de l'attractivité d'un bien accessible avec la distance. Cette synthèse est tirée d'une étude réalisée en 1995 par Sanchez. L'annexe 2 de l'instruction-cadre de 2004 propose une méthode permettant d'établir le bilan économique d'une infrastructure de transport grâce aux calculs du gain d'accessibilité, dont certaines conditions d'utilisation et les limites sont précisées dans le rapport Sétra n° 1231 d'août 2012 Evaluation de l'accessibilité territoriale à partir d'études de cas.

La présente étude porte sur la mise à jour de la fonction de distribution gravitaire présentée dans l'annexe 13 de l'instruction provisoire de 2007, permettant d'évaluer la quantité d'emplois accessibles. L'étude débute par une revue des différents indicateurs d'accessibilité. Ensuite, une méthode est proposée pour permettre la fonction résistive tout en prenant en compte le rôle des opportunités dans le calibrage. L'étude propose ensuite une méthode simplifiée, semblable à celle utilisée par Sanchez, afin de mettre à jour les coefficients fournis dans l'annexe 13 de l'instruction cadre.

2 - Indicateurs d'accessibilité

2.1 - Définitions de l'accessibilité

L'espace est organisé spatialement en plusieurs zones : zones d'emploi, zones résidentielles, zones commerciales etc. L'accessibilité vise à représenter l'évaluation des conditions de transport permettant de relier ces zones entre elles. La proximité entre deux zones est évaluée selon la facilité de se déplacer de l'une à l'autre grâce à un réseau de transports. L'accessibilité a donc une dimension spatiale dans le sens où, plus celle-ci est de qualité, plus les territoires sont « proches » les uns des autres. C'est en ce sens que la DATAR a développé le concept d'accessibilité, misant sur une meilleure accessibilité comme une des stratégies pour l'aménagement du territoire[1] L'accessibilité a également une dimension technique. Elle témoigne en effet de l'efficacité d'un réseau de transports, en termes de confort de déplacements, de régularité, de fiabilité et de rapidité etc. Elle a donc aussi une dimension temporelle liée à cette dimension technique. En effet les usagers organisent leurs activités selon le temps dont ils disposent et leurs déplacements sont soumis à des contraintes temporelles.

[1] Sanchez Flores, 1995. Indicateurs d'accessibilité aux infrastructures interurbaines de transports routiers : un indice de prise en compte de l'attractivité des destinations.

L'accessibilité doit traduire ce rapport de l'usager au temps. Enfin, l'accessibilité a une dimension personnelle sous-jacente aux trois dimensions précédentes, puisque les déplacements des usagers se feront en fonction des caractéristiques, des préférences et des objectifs de chacun.[2]
La notion d'accessibilité est un outil clef pour la compréhension de la mobilité des personnes. Elle est en ce sens un indicateur très utile aux décideurs publics. La partie présente les principaux indicateurs d'accessibilité.

2.2 - Les indicateurs couramment utilisés

2.2.1 - Séparation spatiale : la distance comme mesure de l'accessibilité

La mesure de l'accessibilité considérée comme la plus intuitive est celle où seule la distance (séparant les différents lieux) est prise en compte. Cette mesure ne considère donc pas le niveau d'attraction du territoire.
La distance peut être un indicateur utile pour apprécier par exemple l'homogénéité d'un réseau sur un territoire donné (équi-répartition des infrastructures autour d'un point donné ou au contraire hétérogénéité de la couverture). Elle peut également rendre compte du relief ; les courbes iso-distances peuvent alors s'apparenter à des courbes de niveaux, sachant que plus le relief sera fort, plus les arcs seront longs pour de faibles distances "vol d'oiseau".

NB : La distinction distance "à vol d'oiseau" - distance réelle est importante, car il existe en général une différence sensible entre la distance réelle obtenue en calculant les longueurs successives des éléments de réseau empruntés par un usager et la distance dite "à vol d'oiseau".

Le recours à l'indicateur "distance" est très utilisé pour les analyses de la géographie des réseaux. Pour caractériser le degré de connexion d'un nœud au reste du réseau on utilise notamment un indicateur de ***Shimbel.*** Il caractérise l'accessibilité d'un point à un ensemble de pôles ou de plusieurs points à un ensemble de pôles selon le critère distance : on pourra par exemple s'intéresser à une ville et à ses "plus proches voisins", c'est-à-dire villes avec lesquelles elle est directement connectée via le réseau de transport.

La formule utilisée est la suivante :

$$A(G)_i = \sum_{j=1}^{N} dij$$

Avec A(G)i = l'accessibilité géographique d'un endroit i.
dij = la distance entre l'endroit i et l'endroit j en passant par le chemin le plus court.
n = le nombre d'endroits.

Une formulation alternative de cette mesure de l'accessibilité consiste à intégrer des facteurs de résistance à la distance. Ces facteurs de résistance peuvent être le nombre de zones dans l'aire étudiée, ou l'importance du budget des ménages. Elle prend alors la forme suivante :

$$A_i = \sum_j A_{ij} = \sum_j f(d_{ij})$$

avec A_{ij} l'accessibilité de la zone *j* à la zone *i*, $f(d_{ij})$ est une fonction de résistance et d_{ij} est la distance entre les zones *i* et *j*.

[2] Crozet Y., Mercier A., Ovtracht N., Sapet L.. Méthodes de calcul et de représentation de l'accessibilité dans les méthodes d'évaluation des projets de transports urbains, article en cours.

Cette distance peut être appréhendée de différentes manières soit :
- du nombre de nœuds ou d'arcs, on parle de distance "physique" ;
- du temps de transport calculé ou révélé, distance "temporelle" ;
- du coût monétaire et du coût temporel, coût généralisé du déplacement.

Cette fonction de résistance peut être remplacée par un paramètre de pondération de la distance. L'équation ci-dessus s'écrit alors comme suit :

$$A_i = \sum_j w_{ij} d_{ij}$$

avec A_i est l'accessibilité depuis la zone *i*, w_{ij} un indice de pondération et d_{ij} est la distance entre les zones *i* et *j*.

Différentes mesures de l'accessibilité par la distance sont présentées dans le tableau suivant :

Auteur	Formulation	Signification
Savigear (1967)	$A_i = \frac{\sum_j g_{ij}}{\sum_j g_{ij} t_{ij}}$	g_{ij} = mesure de la demande de déplacement entre les zones *i* et *j* t_{ij} = temps de trajet entre les zones *i* et *j*
Ingram (1971)	$A_{ij} = 100.e\left(-\left(d_{ij}^2.v^{-1}\right)\right)$	*v*=distance moyenne au carré entre tous les points
Guy (1983)	$A_i = \sum_k d_{ij(k)} E_k \Big/ \sum_k E_k$	$d_{ij(k)}$ = distance euclidienne d'un magasin *j* dans lequel le bien *k* est disponible E_k =dépense moyenne par ménage en bien *k*
Allen, Liu et Singer (1993)	$A_{total} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j}^{N} \sum_{j=1}^{N} a_{ij}$	A_{total} = toutes les accessibilités pour une aire a_{ij} =temps de trajet entre les lieux *i* et *j*
Jiang, Claramunt et Batty (1999)	$A_i = \sum_j w_{ij} d_{ij}$	A_i = l'accessibilité depuis la zone *i* w_{ij} = indice de pondération d_{ij} = distance entre les zones *i* et *j*.

2.2.2 - Temps de parcours

Le temps de parcours, exprimé en minutes ou en heures, selon le cas, est relativement facile à saisir par la grande majorité des interlocuteurs. Il peut se décliner selon différents modes d'utilisation.

Depuis/vers 1 pôle, en monomodal : on calcule tous les points accessibles par un réseau donné en un temps maximum donné. Le temps de parcours peut concerner le mode routier, le mode transport collectif routier, le ferroviaire, l'aérien, … La représentation cartographique permet de mettre en évidence les zones encore enclavées par rapport à ce pôle, et où l'accessibilité est réduite du fait d'un manque d'infrastructures.

Depuis/vers … n pôles, en monomodal : on définit un ensemble de pôles/nœuds du réseau de transport (par exemple : ports, échangeurs autoroutiers, …). Puis on calcule les points du territoire accessibles à partir de n'importe lequel de ces nœuds en un temps maximum donné. Ceci permet d'obtenir la qualité de desserte du territoire par un mode, et ainsi de révéler les parties de territoire les moins bien desservies par le mode en question.

Notion de "temps de parcours à vide" et "temps de parcours en charge"

Les temps utilisés dans les calculs d'accessibilité sont le plus souvent issus de bases de données établies à partir de "vitesses moyennes" à vide ; c'est notamment le cas des bases du commerce (Navteq, Teleatlas, bases IGN, …). Ceci conduit, lorsque le calcul d'accessibilité porte sur des réseaux ou des portions de réseaux très sollicités, notamment à certaines heures de la journée, à sous-estimer ces temps, et à donner une image de l'accessibilité plutôt avantageuse. Des différences significatives apparaissent en particulier en milieu urbain (transports individuels ou collectifs routiers), ainsi qu'en interurbain lors de pointes significatives (départs de week-ends, pointes estivales, ...).

L'intégration de la charge du réseau routier, en nombre de véhicules par jour moyen ou à l'heure de pointe peut se faire à l'aide de logiciels d'affectation de trafic ; ces logiciels permettent de calculer les charges des tronçons, ainsi que la vitesse en charge, et par conséquent les temps de parcours. La relation entre trafic et vitesse renvoie à la notion de "courbes débit-vitesse", couramment utilisées dans les logiciels d'affectation de trafic.

Notion de "temps possible à destination de ... "

Le temps dans l'absolu n'est pas toujours représentatif de l'accessibilité, notamment dans le mode transport collectif. Ce dernier implique généralement des horaires, des fréquences, la notion de "temps disponible à destination de" permet de rendre compte du niveau de performance réelle du mode.

Nb : Les conditions d'accessibilité entre deux points d'un territoire donné varient également fortement selon le moment de la journée ou l'époque de la semaine, du mois, ou de l'année. Par exemple, pour une accessibilité routière, on peut déterminer une accessibilité "moyenne", rapportée au "jour moyen annuel", correspondant à un trafic représentatif du trafic "moyen" de l'année ; il n'en va plus de même en période de pointe (pointe d'été, retours de migrations estivales, ...). De même, en milieu urbain ou péri-urbain, on parlera d'accessibilité "à la journée", d'accessibilité "à l'heure de pointe du matin ou du soir". Pour le ferroviaire, on devine que du fait des horaires des trains, on n'aura pas les mêmes résultats selon les heures de la journée où l'on se situe. Il est donc important de préciser le moment ou l'époque du calcul. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on fait des comparaisons de variantes de transport : on doit les faire "toutes choses égales" (mêmes lieux, mêmes époques).

2.2.3 - Coût généralisé

L'avantage d'utiliser l'indicateur "temps" reste sa grande simplicité : c'est un indicateur "parlant", facile à interpréter par un public même néophyte. En contrepartie, il ne suffit pas à donner une idée globale de l'accessibilité, laquelle doit intégrer d'autres notions telles que : la pénibilité du parcours, le coût du trajet, le coût du temps passé, etc. D'où l'introduction possible d'un indicateur plus représentatif, prenant en compte le "coût généralisé".

2.2.4 - Les opportunités cumulées ou mesures isochrones

Cette mesure des opportunités cumulées prend en compte en même temps la distance et l'objectif du déplacement.. Sa formulation générale est la suivante :

$A_i = \sum_j W_j a_j$ avec A_i l'accessibilité depuis la zone i, a_j les opportunités de la zone j, et W_j un paramètre qui peut prendre les valeurs suivantes : $W_j = 1 \; si \; c_{ij} \leq c^*_{ij}$ et $W_j = 0$ sinon, avec

c_{ij} une mesure de coût entre les zones i et j et c^*_{ij} est le seuil de coût au-delà duquel les opportunités ne sont plus comptabilisées[3].

L'interprétation n'est pas toujours aisée dans la mesure où une variation d'accessibilité peut venir à la fois d'une évolution du nombre d'opportunités atteintes et d'une variation du temps de déplacement.

En effet, ces mesures ne déterminent pas le ratio opportunités/distance mais le nombre d'opportunités atteintes. En outre, si la contrainte distance se desserre, alors l'accessibilité augmente. De plus, ce type de mesure attribue une pondération identique à toutes les opportunités d'une zone.

2.2.5 - Les mesures gravitaires

Les mesures dites gravitaires sont apparues dès les années 1950. En 1959, Hansen pose les fondements pour utiliser la théorie gravitaire pour mesurer l'accessibilité aux opportunités. Selon Hansen, l'accessibilité est considérée comme une mesure de la séparation spatiale des activités autour d'un point, ajustée par la capacité et la volonté des individus de franchir cette barrière spatiale.

L'accessibilité gravitaire apparaît donc comme le produit de deux facteurs: la présence d'opportunités (telle que les emplois, les commerces, les loisirs), qualifiée "d'éléments moteurs du déplacement" et le coût du déplacement (distance, temps ou coût généralisé) qualifié comme l'élément résistant du déplacement". On peut représenter la forme de l'accessibilité gravitaire de la manière suivante :

$$A_i = \sum_j D_j f(c_{ij})$$

avec A_i l'accessibilité depuis la zone *i*, D_j l'attractivité de la zone j, qui correspond généralement aux opportunités présentes dans la zone *j* ou au nombre de destinations situées dans la zone j susceptibles de satisfaire le besoin considéré et $f(c_{ij})$ une fonction de résistance au coût de déplacement.

Ainsi, les trois principaux composantes du modèle gravitaire sont :

La caractérisation des attractivités de la zone (emplois, loisirs, commerces, parcs naturels): les D_j Lorsque l'on cherche l'accessibilité à l'emploi, l'attractivité de la zone est souvent quantifiée par le nombre d'emplois de la zone.

La mesure du déplacement (la séparation spatiale) entre les zones (temps ou distance): les *cij*. Concernant la séparation spatiale, plusieurs méthodes peuvent être retenues : distance euclidienne, distance réseau, temps de trajet, coût du trajet.

La forme de la fonction de résistance du déplacement *f*. La question qui fait le plus débat dans la communauté scientifique est celle sur le choix de la fonction de résistance. La majorité des études utilisent soit une fonction puissance soit une fonction exponentielle. Le choix entre ces deux fonctions peut se faire autour de 4 points principaux :

- la comparabilité des paramètres,
- la croissance attendue des coûts,
- le comportement des deux fonctions lorsque le coût tend vers 0,
- la question de l'agrégation des déplacements individuels.

De la littérature académique, semble se dégager le fait que la fonction puissance semble plus pertinente pour des déplacements longs; pour les déplacements "courts" la fonction exponentielle

[3] Certaines mesures du type isochrone font peser la contrainte sur le nombre d'opportunités à atteindre et calculent le temps, la distance ou le coût pour les atteindre.

apparaît plus adaptée. Ainsi, si l'on traite des déplacements urbains (courte distance) la fonction de résistance de forme exponentielle apparaît plus adaptée ; pour des déplacements inter-urbains, la forme puissance paraît être la mieux adaptée.

L'accessibilité au sens de l'instruction provisoire DGR de 2007 :

Un exemple de mesure gravitaire

Dans l'annexe 13 de cette instruction, on croise le coût généralisé du déplacement avec la quantité de biens ou de services de la zone que l'on cherche à atteindre. L'accessibilité s'écrit alors :

$$A_{i.} = \sum_{j} Q_j e^{-\alpha t_{ij}}$$

Avec J : l'ensemble des destinations accessibles y compris la zone i

Qj : quantité de biens ou services présents dans la destination j

$e^{-\alpha t_{ij}}$: coefficient d'éloignement

tij : temps de parcours entre i et j

α prend des valeurs différentes selon le motif et dépend de la zone d'étude. Il doit être déterminé à partir d'enquêtes permettant de mesurer l'élasticité au temps des usagers de la zone.

La comparaison des valeurs d'indice d'accessibilité de chaque zone permet d'identifier les secteurs tirant le meilleur bénéfice de l'aménagement.

On peut définir et calculer un indicateur global, représentatif de l'ensemble du périmètre, par sommation des accessibilités de chaque zone : $A = \sum_{i} Ai$. Ce calcul se fait pour plusieurs situations possibles d'aménagement, ou de transport ; il permet de comparer des scénarios d'aménagement à une situation de référence et donc des scénarios entre eux.

C'est sur cet indicateur que se concentre la présente étude, en revenant sur ses justifications théoriques et son calibrage dans les parties suivantes.

2.2.6 - Accessibilité à un "panel de biens"

Cette notion a été développée notamment dans le cadre d'une thèse présentée par D. Caubel pour répondre à une lacune concernant l'évaluation économique : les outils d'évaluation, utilisés en France pour éclairer les décideurs sur les politiques de transports en milieu urbain, n'intègrent pas pleinement la dimension sociale de ces politiques. La thèse propose entre autres, à l'issue d'un travail de connaissance sur le tissu social d'une grande agglomération - Lyon - la construction d'un indicateur d'accessibilité à un panel de biens. Cet indicateur mesure, pour un mode de déplacement donné, pour chaque service du panel de biens et depuis le lieu de résidence, le temps maximal d'accès au nombre d'activités pour 1 000 habitants. Le temps d'accès au "panel de biens" est le temps qu'il faut pour couvrir une surface disposant d'une densité de services équivalente à la moyenne sur l'agglomération.

2.2.7 - Les mesures "time-geography"

L'accessibilité est analysée à partir de contraintes spatiales et temporelles que l'individu rencontre pour réaliser une activité.

Dans cette mesure de l'accessibilité, les contraintes spatiales et temporelles sont considérées équivalentes. Des prismes spatio-temporels sont utilisés pour représenter les itinéraires des individus dans l'espace et le temps. Ces prismes spatio-temporels peuvent être considérés comme des mesures de l'accessibilité, c'est-à-dire qu'ils donnent les opportunités des zones potentielles lesquelles peuvent être obtenues par la contrainte temps prédéfinie.

Les inconvénients de ce type de mesures sont leur degré de désagrégation. En effet, obtenir le budget-temps des individus et leurs contraintes, demande un grand nombre de données. Les applications de ce type de mesure sont souvent restreintes à de petites régions et sur un petit échantillon de population car le coût en information est très élevé.

3 - Indicateur gravitaire : applications et justification théorique

3.1 - Loi de distribution gravitaire des déplacements

3.1.1 - Principes du modèle

L'indicateur gravitaire d'accessibilité est présent notamment dans l'étape de distribution des déplacements.

Le modèle gravitaire vise à modéliser les flux de déplacements dans une aire d'étude divisée en plusieurs zones. Ce modèle est dit agrégé du fait qu'on n'y différencie pas les caractéristiques des individus appartenant à une même zone. En effet, on tente à travers ce type de modèle de modéliser les statistiques observées, en identifiant des lois de masse régissant les interactions entre les zones.

Ces lois de masse sont issues des considérations suivantes :

- lorsqu'un individu décide de se déplacer, c'est dans le but de réaliser une activité quelconque qu'il ne peut réaliser là où il se situe. L'usager va avoir le choix entre plusieurs opportunités qui seront localisées dans des zones différentes. La première idée développée dans le modèle gravitaire est que l'usager aura plus de chance de trouver ce qu'il recherche (un emploi par exemple) dans une zone proposant plus d'opportunités que dans une autre. Ainsi la probabilité qu'un individu se déplace vers une zone i sera d'autant plus importante que le nombre d'opportunités dans cette zone est élevé, c'est ce qu'on appelle l'effet des masses attractives ou réceptrices ;

- la seconde considération consiste à dire que le déplacement, bien qu'il soit nécessaire pour atteindre l'opportunité souhaitée, représente une contrainte pour l'usager. Cette contrainte est à la fois temporelle et financière. L'usager aura donc tendance à vouloir minimiser ce coût de déplacement, appelé plus généralement coût généralisé. Ce coût dépréciera, pour l'usager, l'intérêt de l'opportunité à atteindre. Ainsi plus une opportunité nécessitera un déplacement long et coûteux, plus la probabilité que l'usager la choisisse sera faible.

3.1.2 - Le modèle

Pour tenter de modéliser la distribution des déplacements, Wilson a donc cherché une fonction prenant en compte ces deux considérations et minimisant l'écart avec les déplacements réels constatés par les enquêtes.

Wilson obtient une fonction de répartition des déplacements par motif de la forme suivante[4] :

$$\mathbf{Tij} = \mathbf{Oi} * \frac{Dj * f(cij)}{\sum_j \mathbf{Dj} * \mathbf{f(cij)}}$$

Avec Tij le flux de déplacements de la zone i vers la zone j, Dj le nombre d'opportunités dans la zone j pour un motif de déplacement donné, Oi la masse émettrice de déplacement de la zone i, Cij représente le coût généralisé du déplacement et f(cij) est la fonction résistive du déplacement.

La forme de la fonction résistive varie selon différentes études, cependant il semble que deux types de fonctions semblent obtenir le consensus :

- l'exponentielle négative $e^{-\beta Cij}$ utilisée dans le cas d'un milieu étudié homogène (milieu urbain, courts déplacements)[5] ;
- la puissance négative $Cij^{-\gamma}$ utilisée dans le cas d'un milieu étudié hétérogène (milieu périurbain, longs déplacements)[6] ;
- les coefficients β et γ sont des coefficients traduisant la vitesse de décroissance de l'intérêt porté à l'opportunité en fonction de son éloignement.

On peut faire une analogie avec la loi gravitaire de Newton. Une masse m2 attirant une masse m1 par une force F qui varie selon le poids de chacune des masses et la distance qui les sépare serait alors comparée à une zone j qui attirerait la population d'une zone i selon un trafic Tij qui varie selon le nombre de personnes habitant la zone i et le nombre d'opportunités qu'offre la zone j selon le coût généralisé du déplacement entre les deux zones. C'est pour cela que le modèle proposé par Wilson est qualifié de gravitaire.

Hansen (1959) fait le lien entre accessibilité et le modèle gravitaire proposé par Wilson en proposant une définition mathématique de l'accessibilité gravitaire d'une zone i :

$$Ai = \sum_j Dj * f(cij, \beta) = \sum_j Dj * e^{-\beta Cij}$$

Cette définition traduit l'idée que l'individu se trouve devant un éventail de choix d'opportunités, qu'il pondère chacune selon le coût du déplacement pour s'y rendre. Cette notion d'accessibilité gravitaire établit un lien entre élément moteur du déplacement (l'opportunité) et l'élément résistif du déplacement (le coût du déplacement). De la même manière on peut établir la définition de l'accessibilité gravitaire partielle d'une zone i vers une zone j :

$$Aij = Dj * e^{-\beta Cij}$$

Cette accessibilité partielle traduit une sorte de potentiel d'interaction entre deux zones.

[4] Bonnafous A., Masson S., 2003. Evaluation des politiques de transports et équité spatiale. *Revue D'Economie Régionale et Urbaine*, Vol.4 :547-572.
[5] Wilson A.G, 1967. A statistical theory of spatial distribution models. Transportation Research.
[6] Reggiani et al, 2010, Regional labour markets and job accessibility in City Network systems in Germany

La loi de distribution gravitaire du trafic s'écrit alors :

$$Tij = Oi * \frac{Aij}{Ai} = Oi * Pij$$

Avec $\mathbf{Pij = \frac{Aij}{Ai}}$ la probabilité qu'un individu se déplace de la zone i vers la zone j.

Cependant ce modèle ne prend pas en compte le phénomène de concurrence entre les différentes zones. En effet le modèle suppose que l'urbanisation est homogène i.e. que les caractéristiques démographiques et économiques soient les mêmes en chaque zone. Ce phénomène de concurrence peut être imagé par l'exemple suivant.

Une zone d'emploi se trouve à proximité de plusieurs zones résidentielles. Le nombre d'emploi de cette zone n'est pas suffisant pour fournir un travail aux actifs des zones résidentielles, l'emploi de la zone d'activité est donc rare pour les actifs des zones résidentielles. Le modèle présenté ci-dessus ne prend pas en compte cette rareté, en effet si on l'applique, on trouvera que le nombre d'actifs des zones résidentielles souhaitant se déplacer dans la zone d'activité sera supérieur au nombre d'emplois réellement proposés par cette zone. Il faut donc introduire une contrainte de réception. De la même manière, il faudrait introduire des contraintes d'émission permettant de fixer le nombre d'émissions (travailleurs). Wilson introduit ainsi trois contraintes aux marges nécessaires pour caler le modèle :

La somme des flux en direction d'une zone ne peut excéder le nombre d'opportunités que propose cette zone i.e. pour toute zone j on a

$$\sum_i Tij = Dj$$

.

De la même façon, le flux total partant d'une zone i ne peut excéder la masse émettrice de la zone i.e. pour toute zone i on a

$$\sum_j Tij = Oi$$

Les déplacements doivent se faire dans une enveloppe budgétaire donnée. On a

$$\sum_i \sum_j Tij * Cij = C$$

Souhaitant introduire ces contraintes dans le modèle gravitaire, Wilson propose l'expression suivante :

$$\mathbf{Tij = Oi * ai * bj * Ej * e^{-\beta Cij}}$$

Avec $ai = \frac{1}{\sum_j bj * Ej * e^{-\beta Cij}}$ et $bi = \frac{1}{\sum_i ai * Oi * e^{-\beta Cij}}$.[7]

[7] Geurs K., Ritsema Van Eck, 2001. Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of lande use transport scenarios, and related social and economic impacts.

Le coefficient a_i assure le fait que le trafic provenant de la zone i soit égale au nombre d'actifs ayant un emploi de la zone i. Le coefficient bi assure le fait que le trafic en destination de j soit égale au nombre d'emplois qu'offre la zone j. Ces deux coefficients sont interdépendants, ils se définissent en fonction de l'autre, i.e. par itération. On commence par fixer b_j= 1 pour estimer a_i, grâce à la valeur de ai on calcule b_j et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un équilibre pour ces deux valeurs soit trouvé. Le modèle présenté ci-dessus est un modèle dit doublement contraint utilisé lorsque les opportunités (ici les emplois) et les résidences sont fixées. Dans le cas où la contrainte ne se fait que sur l'un des deux paramètres, on parle de modèle simplement contraint. Dans le cas où seulement les résidences sont fixées on a b_j= 1 et

$$ai = \frac{1}{\sum_j Ej * e^{-\beta cij}}$$

3.1.3 - Limites du modèle gravitaire

Bien que le modèle gravitaire soit le plus utilisé dans les modèles de distribution des déplacements, il présente quelques limites. Ce modèle dépend fortement du zonage choisi. En effet, on ne distingue pas les préférences de chacun en termes de mobilité pour des individus d'une même zone. Cette agrégation de données n'est pas toujours justifiée. Les habitants d'une zone ont par exemple des caractéristiques socio-économiques différentes qui font qu'ils n'ont pas les mêmes besoins de déplacements. On a donc tout intérêt, pour limiter cette agrégation de données à limiter la taille des zones et donc à affiner le maillage du territoire. Cependant, plus le maillage sera fin, plus les informations à utiliser devront être précises et plus il faudra veiller à disposer d'un nombre suffisant de données pour avoir la légitimité de tirer des conclusions[8]. De plus, ce modèle dépend également de la définition d'une aire d'étude. La conséquence directe d'une telle contrainte est qu'on considère que l'aire d'étude n'interagit pas avec ce qui lui est extérieur. Par exemple, si, en termes de distribution des déplacements domicile-travail, on s'intéresse aux déplacements dans le territoire français ; on définit l'aire d'étude comme étant la France ; alors on ne prend pas en compte les communes frontalières européennes interagissant avec les communes françaises, ce qui créera un biais dans notre estimation puisqu'on considère que les habitants des communes frontalières par exemple ne peuvent pas aller travailler dans ces communes européennes. On parle d'effet de marges. Ce modèle est donc dépendant du zonage choisi et de l'aire d'étude choisie.

Cependant, un tel modèle permet de différencier les mobilités selon les zones géographiques, et utilise des données facilement calculables pour un modèle facilement exploitable, compréhensible et plutôt fiable.

3.2 - Lois gravitaires et principes de modélisation

Classiquement, pour estimer les trafics via une modélisation, on recourt à un modèle dit à quatre étapes. Ce modèle est constitué des étapes de génération, distribution, choix modal et affectation qui traduisent, de façon simplifiée, les choix successifs effectués par l'usager pour se déplacer : combien de déplacements ? De quelle origine vers quelle destination ? Par quel mode ? Par quel itinéraire ? Sans faire de présentation exhaustive de ces modèles, nous allons exposer succinctement les principes de ces modèles :

- la génération consiste à estimer dans un modèle le nombre de déplacements qui seront émis et attirés par chaque zone. Cette étape considère, en règle générale, que les déplacements générés et attirés par une zone sont une combinaison linéaire des différentes données socio-économiques de la zone (nombre d'habitants, nombre d'actifs, d'emplois…). Cette étape permet de répondre à la question du nombre de déplacements ;

[8] Bonnel P, 2006, Analyse et Prévision de la Demande en Transport.

- la distribution consiste à lier chaque déplacement émis à un déplacement attiré, ce qui permet de donner une origine et une destination à un déplacement. C'est cette étape qui fait, dans la plupart des cas, recours à des modèles de distribution gravitaire ;

- le choix modal consiste à déterminer le mode utilisé pour chaque déplacement. En général, on utilise des structures de type logit, parfois emboîté, avec un choix sur l'approche (agrégée ou désagrégée). Quelle que soit l'approche retenue, on passe par le biais de fonctions d'utilités, qui sont des combinaisons linéaires de plusieurs facteurs déterminants du choix modal. Cette étape permet donc de définir la part des différents modes sur chaque origine destination (OD). A l'issue de cette étape, on dispose donc d'une matrice OD de demande de déplacement pour chaque mode modélisé ;

- l'affectation permet enfin de confronter l'offre de transport à la demande de transport. Les usagers sont ventilés sur les divers réseaux de transport. Il existe de nombreux modèles d'affectation, ils reposent sur la comparaison des coûts généralisés des différentes alternatives.

Ces modèles à quatre étapes sont couramment utilisés en milieu urbain. En ce qui concerne le milieu interurbain, il est possible de citer le modèle de déplacement BASIF du CETE Normandie-Centre, MODEV du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), le modèle TRANS-TOOLS financé par la Commission Européenne.

L'exposé rapide des principes des différentes étapes permet de comprendre aisément que la modification des coûts généralisés donc de l'accessibilité intervient au niveau de l'étape de distribution via la modification de la répartition de la demande de déplacement. Le modèle, calé sur les comportements, prend donc en compte donc en théorie la variation d'utilité induite par la modification d'accessibilité due au projet évalué, et le surplus final calculé intègre donc bien, en théorie, complètement la variation d'utilité pour les usagers, qu'ils soient induits, reportés d'autres modes ou itinéraires ou qu'ils restent sur le même itinéraire.

En effet, il faut noter que les différentes étapes exposées précédemment sont liées et qu'il est conseillé de procéder à des itérations successives. Ces itérations permettent d'introduire des phénomènes de rétroaction et donc de modéliser les modifications de comportement des usagers en réaction à une modification des coûts de circulation.

On note cependant que dans certains cas les étapes de génération, de distribution et de répartition modale ne sont pas réalisées. En d'autres termes, la demande de transport n'est pas modélisée, mais constitue une donnée d'entrée du modèle. Elle est évaluée à partir d'observations des flux de déplacements via des enquêtes ou des comptages qui permettent de construire les matrices OD pour les différents modes. Ces matrices OD sont ensuite affectées sur le réseau, c'est-à-dire que les usagers sont répartis sur les différents itinéraires possibles en fonction des coûts généralisés de ces divers itinéraires.

4 - Méthode de mise à jour de coefficient de l'instruction provisoire routes

4.1 - Annexe 13 de l'instruction cadre de 2007

Dans le modèle gravitaire de Wilson et dans le calcul de la variation du surplus des usagers à travers l'étape de distribution, on note la présence de l'indicateur d'accessibilité gravitaire Ai= $Dj * f(cij)$. Cet indicateur dépend comme on l'a vu d'une fonction résistive au coût du déplacement f(cij).

Il y a donc de grands enjeux à calibrer les éléments de cette fonction afin de pouvoir calculer les indicateurs d'accessibilité. Rappelons qu'il y a deux principales formes pour cette fonction résistive, une de la forme exponentielle négative $e^{-\beta cij}$, et l'autre du type puissance négative $C_{ij}^{-\gamma}$.

L'instruction cadre provisoire relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers de 2007 préconise de calculer les gains d'accessibilité d'un nouveau projet de transports. Pour cela elle propose d'utiliser, dans l'étude des déplacements professionnels l'indicateur d'accessibilité suivant, Ai= $\sum_j Ej * e^{-\beta * Tij}$ avec β = 0.47 et Tij en heure. Un découpage du territoire français en zones d'emplois y est également préconisé. Une zone d'emplois représente un espace géographique dans lequel la plupart des actifs travaillent et résident. Il y a aujourd'hui 371 zones d'emplois en France.

4.2 - Source de l'annexe 13

Nous nous sommes donc intéressés à la méthode utilisée pour calibrer cette fonction résistive. Les études qui ont abouti à ce coefficient, ont été réalisées par MM. Orus et Sanchez en 1995. Dans le cadre de ce mémoire, ils ont en effet proposé différents coefficients pour cet indicateur selon les motifs de déplacements suivants :

- les déplacements domicile-travail,
- les déplacements professionnels,
- les déplacements liés aux loisirs,
- les déplacements liés aux affaires personnelles.

Prenons l'exemple des déplacements domicile-travail pour illustrer la méthode de travail suivie. L'étude se propose de calculer l'indicateur d'accessibilité Ai sous la forme suivante :

$$Ai = \sum_j Ej * e^{-\beta * tij}$$

.

On note tout d'abord qu'on ne prend pas en compte le coût généralisé mais seulement le temps de parcours entre les différentes zones. Pour les déplacements interurbains, ni les péages ni le coût d'utilisation du véhicule ne sont donc pris en considération. Le modèle ne prend pas en compte le coût financier du voyage, ce qui pourrait y introduire un biais important en surestimant notamment les destinations accessibles par autoroutes. On note également que cette étude porte exclusivement sur les

déplacements par route, alors que l'accessibilité d'une zone est supposée traduire la capacité des personnes à atteindre les opportunités du territoire quel que soit le mode utilisé. Par exemple, si l'on s'intéresse au calcul de l'accessibilité partielle d'une commune de province à Paris, et si l'on suppose que celle-ci se situe à 5h de route de Paris et à 2h en TGV, il serait illogique de considérer que l'accessibilité partielle de la commune soit basée uniquement sur le temps de déplacement par route. Enfin, le choix de la forme exponentielle de l'indicateur n'est pas sans conséquence. Par exemple, on peut se demander si la forme puissance n'aurait pas été pas plus adaptée. En effet, si on étudie les déplacements interurbains, on peut supposer que la répartition des activités et des populations est hétérogène i.e. que chaque zone a des caractéristiques très différentes, ce qui n'est pas forcément le cas en milieu urbain. Or Reggiani (*cf.* ci-dessus) préconise d'utiliser une fonction résistive de la forme d'une puissance négative en milieu hétérogène. Des biais peuvent donc être introduits par le choix de la forme de la fonction de décroissance.

Pour calibrer son indicateur, Sanchez (1995), suppose que la fréquence de déplacements est fonction de la distance. Cette fonction résistive est une exponentielle qui rappelle la loi de distribution gravitaire des déplacements. On a ainsi :

$$y = \alpha e^{-\beta d}$$

Où y est la fréquence de déplacements, d la distance en km, α et β des coefficients à calibrer.

Cette formule est appliquée aux 4 grands motifs (travail, affaires personnelles, affaires professionnelles, loisirs).

Pour les motifs travail et affaires personnelles, les enquêtes Sétra (Panel 1984) permettent de calibrer les paramètres. Pour les motifs affaires professionnelles et loisirs, l'enquête Transport et Télécommunication de 1993 a été utilisée.

Sanchez obtient les résultats suivants :

Type d'accessibilité	α	β	Coefficient de corrélation
Travail quotidien	1.139	0.0564	0.9708
Services à la population	0.913	0.0479	0.9724
Zones touristiques	0.476	0.00215	0.9099
Affaires professionnelles	1.020	0.0047	0.9947

Figure 1: résultats du calibrage des courbes de niveau d'accessibilité

En utilisant les paramètres descriptifs des déplacements professionnels, on a donc une fonction de résistance à la distance qui est f = exp(-0,0047.d). Ensuite, pour pouvoir proposer cette même formule avec une variable temporelle, les auteurs ont effectué des hypothèses sur la vitesse de circulation des individus. Ainsi ils retiennent l'hypothèse que 75% du temps de déplacement est passé sur nationale (90 km/h) et 25% sur autoroute (130 km/h) et donc que la vitesse moyenne est de 100km/h. La fonction de résistance devient donc f (t)= exp(-0,47.t) avec le temps en heure.

On note que l'hypothèse sur une vitesse moyenne de circulation est une hypothèse forte qui peut introduire des biais importants. Ce modèle est repris dans la note de J.P. Orus et O. Sanchez sur la révision du schéma directeur routier national (1995). C'est ce coefficient qui est proposé dans l'instruction cadre de 2007 pour mesurer l'accessibilité aux emplois. C'est ainsi le motif affaires professionnelles (et non le motif domicile-travail) qui a été retenu pour mesurer l'accessibilité aux emplois. On peut s'interroger sur les raisons et les conséquences en matière de calcul de gains d'accessibilité d'un tel choix.

Par ailleurs, le modèle présenté ci-dessus ne prend pas en compte le rôle d'attraction des opportunités (qui diffèrent selon le motif) dans la distribution des déplacements. Le modèle se contente de fournir une description de la distribution globale des déplacements selon la distance ou le temps de parcours uniquement. Or, l'attractivité des opportunités est considérée, à travers le modèle gravitaire, comme étant l'élément moteur des déplacements. Ceci constitue une limite importante du modèle ci-dessus. Il paraît ainsi peu pertinent de relier le coefficient beta calculé par ce modèle avec celui de l'indicateur d'accessibilité, cet indicateur étant intimement lié avec la notion de zonage et la notion d'opportunité.

Outre cette limite, les données sur lesquelles se base le calibrage datent de 1993 et de 1984 et sont donc relativement anciennes. Il pourrait être intéressant de mettre à jour ce coefficient pour vérifier sa pertinence sur des données actuelles.

On se propose donc d'effectuer une mise à jour de ce coefficient pour les déplacements interurbains. Il s'agira plus exactement de re-calibrer le coefficient proposé dans l'instruction cadre, et d'étendre celui-ci à d'autres motifs de déplacements.

4.3 - Méthode

4.3.1 - Recueil de données

Le modèle de distribution gravitaire permet, comme indiqué plus haut, de relier la distribution des déplacements dans un territoire avec l'indicateur gravitaire d'accessibilité. La distribution des déplacements peut être observée par différentes enquêtes.

Si l'on travaille par exemple sur les déplacements domicile-travail, de nombreuses enquêtes ont été réalisées et permettent de recenser avec précision les déplacements effectués sur l'ensemble du territoire français pour le motif domicile-travail. Les bases de données les plus récentes analysant ces flux sont les suivantes :

- l'Enquête nationale Transport Déplacement (ENTD) réalisée en 2008 ;
- le recensement 2007-2008 de l'INSEE, avec la base de données nationale recensant tous les flux domicile-travail ;
- les enquêtes déplacement réalisées sur des départements entiers, recensées par le CERTU.

Il s'agit alors d'analyser ces différentes bases et d'utiliser la ou les bases les plus adéquates pour les objectifs que nous avons et pour la méthode que nous souhaitons appliquer.

On dispose par les données INSEE de la description des déplacements domicile-travail pour l'ensemble de la population française. Ces données ont été recueillies dans le cadre du recensement de la population 2008 par l'INSEE. Ce recensement se base sur une collecte d'informations annuelle, concernant successivement tous les territoires communaux au cours d'une période de cinq ans. Les communes de moins de 10 000 habitants réalisent une enquête de recensement portant sur toute la population, à raison d'une commune sur cinq chaque année. Les communes de 10 000 habitants ou plus, réalisent tous les ans une enquête par sondage auprès d'un échantillon d'adresses représentant 8 % de leurs logements. En cumulant cinq enquêtes, l'ensemble des habitants des communes de moins de 10 000 habitants et 40 % environ de la population des communes de 10 000 habitants ou plus sont pris en compte. Cependant, les données utilisées ci-après sont issues d'une enquête complémentaire du recensement de la population. Cette enquête, pour les communes de moins de 10 000 habitants, porte sur un quart des ménages. Pour les communes de 10 000 habitants ou plus, l'exploitation complémentaire porte sur l'ensemble des bulletins collectés auprès des ménages, soit 40 % environ de la population. Le faible pourcentage des personnes enquêtées dans les communes de moins de 10 000 habitants fait qu'il faut utiliser avec précaution les flux ayant un effectif peu élevé.

On utilise deux bases de données issues de ce recensement disponibles sur le site INSEE :

- les données recensant les flux de déplacements domicile-travail pour l'ensemble des communes de France ainsi que pour les arrondissements de Paris, Lyon et Marseille. Pour chaque origine destination, est indiqué le code INSEE de la commune d'arrivée et celui la commune de départ ainsi que le nombre de navetteurs ;

- les données recensant, pour chaque commune, le nombre de navetteurs par mode de transport selon la position lieu de travail.

Avec l'ENTD, on dispose d'informations sur les distances parcourues et les temps de parcours pour différents motifs comme les déplacements domicile-travail, domicile-étude, domicile-garderie. Néanmoins, on ne dispose pas d'informations précises sur la localisation des individus enquêtés et des lieux de travail pour des raisons de confidentialité des informations. D'autres bases de données ont été construites par des organismes différents sur chaque département et ne couvrent pas tout le territoire français.

On utilisera donc dans un premier temps la base de données de l'INSEE.

4.3.2 - Zonage du territoire

On rappelle la formule du modèle de distribution gravitaire des déplacements doublement contraint :

$$\mathbf{Tij} = \mathbf{Oi} * \mathbf{ai} * \mathbf{bj} * \mathbf{Ej} * f(Cij)$$

Avec $ai = 1/(\sum_j [bj * Ej * fCij])$ et $bj = \frac{1}{\sum_i ai * Oi * f(Cij)}$.

Pour utiliser ce modèle il convient tout d'abord de choisir un zonage assez fin pour permettre de décrire au mieux les déplacements domicile-travail au niveau interurbain, tout en veillant à ce qu'on dispose d'informations suffisamment précises et fiables sur ces déplacements dans les enquêtes citées ci-dessus.

Dans un premier temps, on s'intéresse au calibrage de la fonction résistive du modèle de distribution gravitaire pour les déplacements interurbains pour le motif domicile-travail. On préconise donc pour le zonage, un découpage du territoire français à l'échelle communale. Cette échelle apparaît légitime puisqu'elle propose un maillage assez fin du territoire français (plus de 36 000 communes), et permet de décrire correctement les déplacements interurbains. On se propose également au vu de l'importance des flux générés par les trois grandes communes que sont Paris, Lyon et Marseille, de les décomposer en arrondissements. De plus, dans les études réalisées, les informations sont disponibles sur l'ensemble du territoire français à l'échelle communale mais pas à une échelle plus fine. Les calculs nécessaires pour calibrer les fonctions résistives rendent illusoire de manipuler des informations plus précises (en travaillant sur des données communales on manipule déjà des matrices de plus de 36000 par 36000).

4.3.3 - Calcul du coût de déplacement

Une fois ce zonage effectué, il faut calculer le coût de déplacement entre chaque zone. Dans un premier temps on ne prend en compte que le temps de déplacement, i;e; une fonction résistive F dépendant exclusivement du temps de parcours. Pour calculer les temps de parcours entre chaque commune le logiciel TransCAD® est utilisé pour modéliser le réseau.

4.3.4 - Calibrage de la fonction résistive du déplacement

On teste plusieurs formes pour la fonction résistive: une forme exponentielle (a), une forme puissance (b) et une forme mixte (c) :

$$f(Cij) = f(tij) = e^{-\beta tij}$$

$$f(Cij) = f(tij) = tij^{-\beta}$$

$$f(Cij) = f(tij) = tij^{-\beta} * e^{-\alpha tij}$$

Pour chacune de ces formes, on teste l'effet d'un seuil sur les flux initiaux de la base de données. En effet, comme il est possible que les flux ayant un faible effectif ne soient pas significatifs, il peut être intéressant de ne prendre en compte que les flux dépassant un certain effectif.

On teste un calibrage sur différents types de régions (urbaines et rurales) pour tester la variabilité des coefficients trouvés selon les caractéristiques d'un territoire.

Enfin on utilisera un modèle doublement contraint pour réaliser ce calibrage.

5 - Mise en œuvre de la méthode

5.1 - Calcul des temps de parcours

On présente dans cette partie comment et avec quelles hypothèses a été calculé le temps de parcours à l'aide du logiciel TransCAD®.

5.1.1 - Fonctionnement du logiciel-définitions

TransCAD® est un logiciel de modélisation des déplacements permettant entre autres de calculer des temps de parcours entre zones d'un territoire, et de calibrer des modèles de distribution des déplacements. TransCAD® a été utilisé dans un premier temps pour calculer les temps de parcours entre les différentes communes françaises et les arrondissements de Paris, Lyon et Marseille.

Dans TransCAD®, une aire d'étude est découpée en plusieurs zones : il s'agit du maillage du territoire ou zonage. Chaque zone est représentée par un point portant toutes les caractéristiques de la zone et de sa population. Ce point est appelé le centroïde de la zone. On considère donc que tous les déplacements en provenance de la commune s'effectueront depuis ce point et tous les déplacements ayant pour destination la commune étudiée, arriveront à ce point. Cela signifie qu'un individu ou un emploi n'est plus localisé en un point précis de la zone, mais est situé au centroïde de la zone.

Ensuite, il faut définir un réseau, ce réseau va permettre de représenter l'offre de transports entre les différentes zones. Ce réseau est composé de deux types d'éléments, les nœuds et les liens. Les liens sont eux-mêmes scindés en deux catégories que sont les liens de réseau et les connecteurs de centroïdes. Les nœuds sont composés des centroïdes de zone, définis ci-dessus, et des nœuds de réseau.

Les liens de réseau représentent une infrastructure réelle et chaque lien possède des caractéristiques, appelées attributs, qui lui sont propres permettant de calculer les coûts de déplacement sur ces axes (péage, longueur, vitesse à vide, capacité etc.).

Les connecteurs de centroïdes vont permettre de relier les centroïdes au réseau de transports. Ce sont des liens fictifs dont les attributs permettront de calculer un temps moyen nécessaire aux personnes d'une zone pour accéder au réseau de transports.

Un nœud de réseau n'a pas nécessairement une représentation physique mais peut toutefois être interprété comme un carrefour. Il représente en effet une intersection entre les liens de réseau. Les nœuds assurent donc la connexité du réseau.

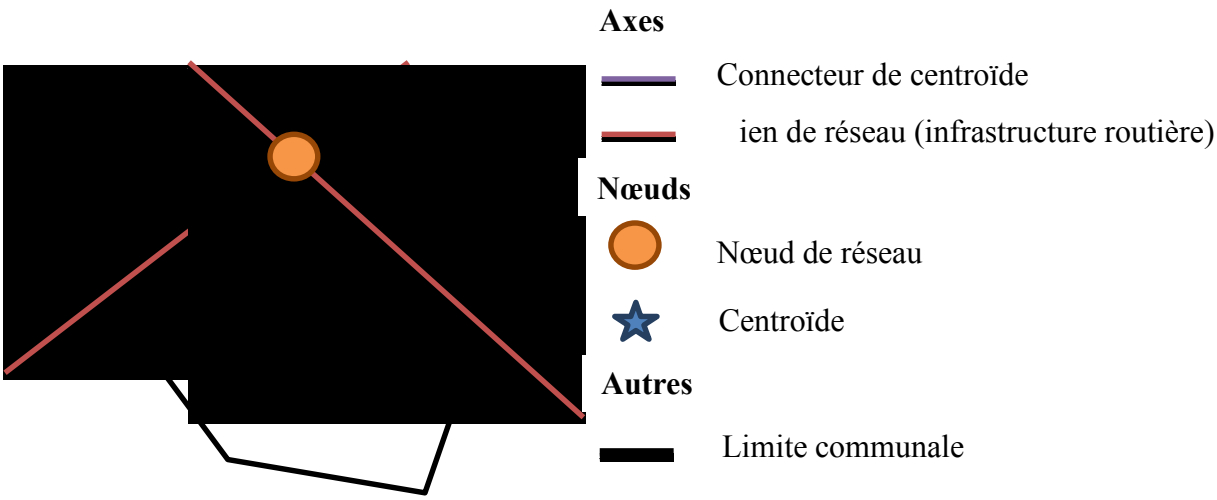


Figure 2 : schéma récapitulatif des outils de modélisation

5.1.2 - Création du zonage-importation du réseau.

Pour obtenir un maillage à l'échelle communale et à l'échelle de l'arrondissement pour les villes de Paris, Lyon et Marseille, on a utilisé un fond de carte représentant les communes du territoire français. A chaque commune TransCAD® définit automatiquement un centroïde qu'il situe au centre de gravité géométrique de la zone et qui possède toutes les caractéristiques de la zone notamment leur code INSEE. Pour représenter les arrondissements de Paris, Lyon et Marseille on a supprimé ces trois communes et dessiné à la main les arrondissements pour chacune de ces trois communes.

Les communes de Corse ainsi que les communes des départements d'outre-mer n'ont pas été retenues du cadre cette étude.

Ainsi, le maillage proposé comporte 36242 zones, dont la représentation géographique est la suivante:

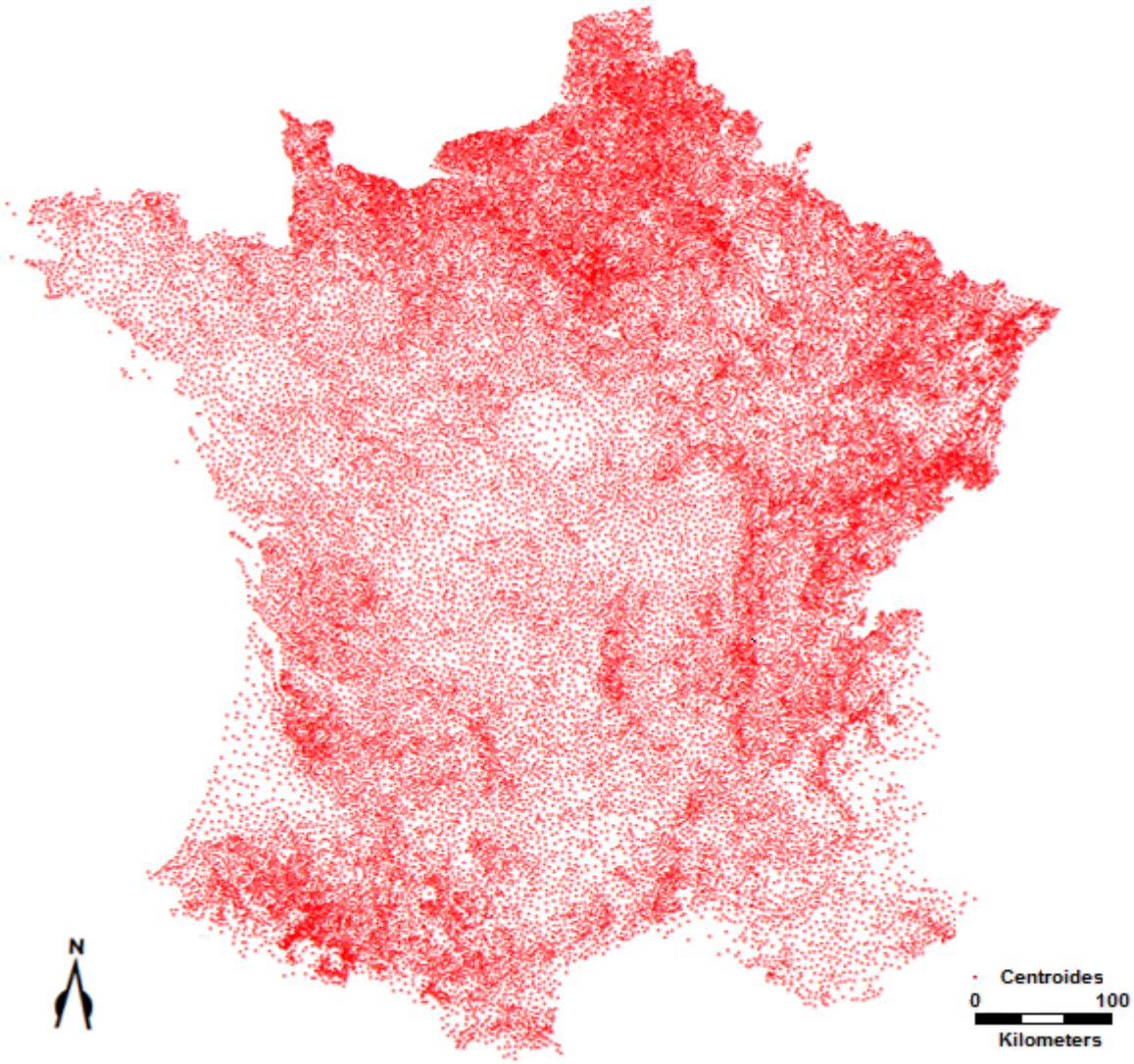


Figure 3 : zonage du territoire français

Pour modéliser le réseau, la base « 30 000 arcs » du Sétra est utilisée. Elle comporte aujourd'hui 43733 axes et 76917 nœuds.

Chaque lien de réseau est renseigné par des attributs définissant entre autre le « type de voie » de l'arc et les caractéristiques du relief de la zone traversée par l'arc. Ces attributs permettent de calculer la vitesse à vide sur les arcs.

Le tableau suivant décrit les vitesses à vide utilisées pour chaque type d'arc :

TYPE	ROUTE	Vitesse à vide en km/h
1	5m	80
2	6m	80
3	7m	91
4	3 voies/9m	91
5	3 voies/10.5m	91
6	4 voies/14m	91
7	2x2 voies (carrefour plan)	110
8	2x2 voies (autoroute concédée)	131
9	2x3 voies (autoroute concédée)	131
90	2x4 voies (autoroute concédée)	131
10	2x2 voies (route express)	110
11	7m (route express)	99
12	2x2 voies (carrefour giratoire)	110
13	2x2 voies (ar non concédée)	131
14	2x3 voies (ar non concédée)	131
140	2x4 voies (ar non concédée)	131
15	2x2 voies (voie rapide urbaine)	80
16	2x3 voies (voie rapide urbaine)	80
160	2x4 voies (voie rapide urbaine)	80
20	Urbain petite agglo	57
21	2 voies normales	46
22	2 voies rapides	72
23	3 voies normales	46
24	3 voies rapides	72
25	4 voies normales	46
26	4 voies rapides	72
27	2 voies larges	46
28	6 voies normales	46
29	6 voies rapides	72

Figure 4 : table de typologie utilisée par le Setra sous TransCAD®

Les liens de réseau ainsi définis, il faut connecter le zonage au réseau, i.e. les centroïdes du zonage aux nœuds de réseau. TransCAD® considère automatiquement que le temps d'accès au réseau est nul. Ainsi pour n'importe quelle commune où que l'on soit, on considère que l'accès au réseau principal est immédiat. Il est évidemment peu probable que ce soit le cas. En effet, les infrastructures présentes dans la carte « Arc 30 000 » représentent les routes importantes, souvent situées en périphérie de l'agglomération.

Pour limiter les erreurs introduites on fait les hypothèses suivantes :

- pour accéder au réseau les usagers se déplacent en milieu urbain à une vitesse moyenne de 38 km/h (valeur prise dans les recherches de Orus et Sanchez pour la vitesse moyenne pour le motif domicile-travail) ;

- la connexion se fait aux trois nœuds les plus proches du centroïde pour éviter l'introduction de biais trop importants sur la longueur des déplacements ;

- la distance parcourue pour accéder au réseau est la distance, entre le centre de gravité de la zone qui se trouve être, dans le cadre fixé par nos hypothèses, le centroïde, et le nœud de réseau connecté. Cette distance représente donc une distance moyenne au réseau pour les habitants de la commune étudiée.

La longueur des liens de réseau est définie dans TransCAD®, c'est la longueur réelle des arcs mesurée sur le terrain. La longueur utilisée pour les centroïdes est la longueur définie graphiquement. Chaque arc a donc un attribut renseigné sur sa longueur (en km).

5.1.3 - Calcul des temps de parcours

La vitesse de circulation à vide et les longueurs de chaque arc étant définies, on peut calculer les temps de parcours à vide pour chaque arc. On ajoute donc un attribut à la table de donnée correspondant au temps de parcours à vide nécessaire pour parcourir l'arc.

Ensuite TransCAD® permet de calculer le temps de parcours à vide minimal pour se rendre d'un point A vers un point B. Pour appliquer le modèle gravitaire nous souhaitons connaître les temps de parcours t_{ij} entre chaque zone i.e. les temps de parcours entre chaque centroïde. Pour cela deux hypothèses sont nécessaires :

- on suppose que le parcours retenu par l'usager pour se rendre d'une zone i à une zone j est celui qui minimise son temps de parcours ;

- on suppose que les trajets s'effectuent sans contraintes de congestion i.e. que les vitesses des usagers sur les arcs sont les vitesses à vide.

En appliquant le programme, on obtient donc une matrice 36242 * 36242 représentant les temps de parcours entre chaque commune repérée par son code INSEE.

(*Nb* : la diagonale de cette matrice est remplie de zéros, ce qui s'explique par le choix du zonage et les hypothèses sous-tendues. En effet les activités et la population d'une commune étant concentrées en un point, le centroïde, on considère donc que le temps de déplacement d'un habitant d'une commune est nul si celui-ci se rend au travail dans cette même commune).

(*Nb* : les temps de parcours obtenus en minutes ont été testés via les temps de parcours donnés par le site internet Via Michelin. Les valeurs correspondent d'une manière plutôt satisfaisante).

Matrix1 - Shortest Path (Shortest Path - Temps)

	1001	1002	1004	1005	1006
1001	--	60.57	54.28	29.57	88.46
1002	60.57	--	22.70	69.33	63.00
1004	54.28	22.70	--	58.28	51.23
1005	29.57	69.33	58.28	--	89.88
1006	88.46	63.00	51.23	89.88	--

Figure 5 : matrice Origine-Destination

Afin de considérer un temps de déplacement pour les déplacements intra zonaux on choisit d'appliquer la même méthode que celle employée dans le modèle de trafic MODUS utilisée par la DRIEA. Ainsi on propose de définir une distance intra zonale caractéristique de la zone représentant la longueur moyenne d'un déplacement interne à la zone. Pour une zone de surface S, distante des trois zones les plus proches de D1, D2, D3, on définit la distance intra zonale par la formule suivante [9]:

$$\frac{Dt^2}{\pi} = \sqrt{S} * \sqrt[3]{D1 * D2 * D3}$$

Soit :

$$Dt = \sqrt{\frac{\sqrt{S}}{\pi} * \sqrt[3]{D1 * D2 * D3}}$$

Cette formule procède par moyenne pour tenir compte de la taille de la zone, qui impacte la distance que l'on peut y parcourir et la distance moyenne pour sortir de la zone, appréhendée grâce aux trois zones les plus proches.

5.2 - Création de la matrice des flux

5.2.1 - Obtention de la matrice Origine-Destination

Pour créer la matrice des flux, c'est-à-dire la matrice contenant le nombre de flux constaté par les études pour chaque Origine Destination, on rappelle que l'on utilise les données INSEE suivantes :

- données recensant les flux de déplacements domicile-travail pour l'ensemble des communes de France ainsi que pour les arrondissements de Paris, Lyon et Marseille. Pour chaque origine destination, est indiqué le code INSEE de la commune d'arrivée et celui de la commune de départ ainsi que le nombre de navetteurs ;

- données recensant pour chaque commune le nombre de navetteurs par mode de transport selon la position du lieu de travail. Quatre positions de lieux de travail sont distingués : si le lieu de travail est localisé dans la même commune que l'individu enquêté, dans le même département (mais pas dans la même commune), dans la même région (mais pas dans le même département) ou dans une autre région de France.

La première base de données importée, sur le logiciel TransCAD®, fournit pour chaque origine destination le nombre de navetteurs correspondant, il est en effet nécessaire pour calibrer le modèle, de connaître pour chaque commune le trafic T_{ij}, s'identifiant ici au nombre de navetteurs.

5.2.2 - Obtention des flux en véhicule personnel

Les temps de parcours disponibles étant des temps de parcours par route, on retient seulement les navetteurs utilisant leur véhicule personnel. Il faut pour cela appliquer aux flux disponibles dans la première base un coefficient correcteur permettant de ne retenir que ces derniers.

[9] Direction régionale de l'équipement Ile de France, 2008. Modus v2.1 Documentation détaillée du modèle de déplacements de la DREIF.

Pour déterminer ce coefficient on utilise les données INSEE, qui nous renseignent sur le taux d'utilisation de la voiture par commune et par catégorie de lieux de travail. On affecte à chaque commune d'origine et selon le type de déplacements effectués (même commune, même département, même région, autres) un coefficient rectificateur.

La méthode suivie est la suivante. Pour chaque origine destination présente dans la base de donnée recensant les flux par origine destination, a ajouté quatre nouveaux attributs, MC (Même Commune), MD (Même Département), MR (Même Région), A (Autres) correspondant aux catégories de lieux de travail définis dans la seconde base. On renseigne ces attributs de la façon suivante :

$$MC = \begin{cases} 1 \text{ pour les déplacements restant dans la même commune} \\ 0 \text{ pour les autres déplcements} \end{cases}$$

$$MD = \begin{cases} 1 \text{ pour les déplacements restant dans le même département et dont } MC = 0 \\ 0 \text{ pour les autres} \end{cases}$$

$$MR = \begin{cases} 1 \text{ pour les déplacements restant dans la même region et dont } MD = 0 \\ 0 \text{ pour les autres} \end{cases}$$

$$A = \begin{cases} 1 \text{ pour les déplacements dont } MR = 0 \\ 0 \text{ pour les autres} \end{cases}$$

Pour chaque catégorie de lieux de travail (définies ci-dessus) et pour chaque commune, on a calculé le pourcentage de navetteurs utilisant leur véhicule particulier pour se rendre au travail. On a importé le résultat dans la base de données des flux en ajoutant 4 nouveaux attributs MC%, MD%, MR%, A%.

Ces nouveaux attributs renseignés permettent de créer un nouvel attribut nommé « Flux VP » défini de la manière suivante :

$$Flux\ VP = Flux * (MC * MC\% + MD * MD\% + MR * MR\% + A * A\%)$$

Si on fait l'hypothèse que pour une même catégorie de lieu de travail, la part modale du véhicule particulier est la même pour toutes les origines destinations, alors Flux VP correspond donc bien au nombre de navetteurs utilisant leur véhicule personnel pour l'origine destination étudiée.

La base de données étant enfin complétée, nous créons la matrice Origine Déplacement renseignée sur le nombre de navetteurs constaté pour chacune d'entre elles.

Il suffit ensuite de construire la matrice des flux correspondante.

5.3 - Calibrage et résultats

Les matrices de flux et la matrice des temps de parcours étant réalisées, on peut effectuer les premiers calibrages. On a effectué ce calibrage pour les trois formes de la fonction résistive grâce à un modèle doublement contraint :

$$f(Cij) = f(tij) = e^{-\beta tij}$$

$$f(Cij) = f(tij) = tij^{-\beta}$$

$$f(Cij) = f(tij) = a * tij^{-\beta} * e^{-\gamma tij}$$

On teste également l'effet de la mise en place d'un seuil sur les données d'entrées : on retient uniquement les flux de plus de 100 personnes entre les différentes communes, de façon à ne prendre en compte que les déplacements significatifs.

5.3.1 - Résultats

Après calibrage des différentes fonctions et avec les tests sur différents seuils on obtient les résultats suivants :

	Seuil 0	Seuil 100
Forme (a) : flux totaux	**0,135**	**0,2051**
Forme (a) Flux VP	**0,134**	**0,2174**
Forme (b) Flux VP	**3,8959**	
Fonction résistive Orus et Sanchez	**0,03591**	**-**

Figure 6 : résultat du calibrage sur la France

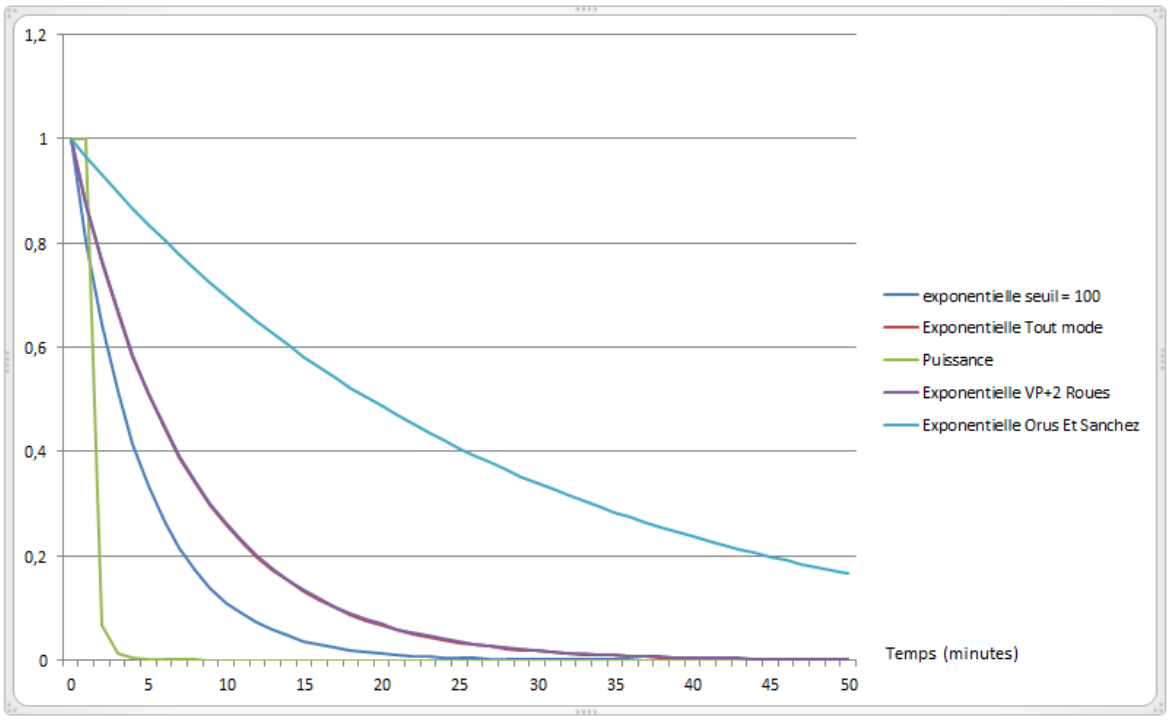


Figure 7: fonctions résistives calibrées sur la France entière

5.3.2 - Analyse des résultats

La première observation à faire est que l'hypothèse sur la répartition modale, n'a pas beaucoup de conséquences sur les résultats finaux. En effet, les coefficients et les fonctions résistives trouvés grâce aux flux totaux et aux flux en véhicules personnels sont très similaires. Cela ne veut toutefois pas dire que le comportement des personnes utilisant les transports en commun est comparable à celui des personnes utilisant leur véhicule personnel. Simplement, le nombre de personnes sur la France entière utilisant les transports en commun, n'est pas assez important pour modifier significativement les coefficients trouvés lors du calibrage.

- l'effet de la mise en place d'un seuil est très important. Le coefficient se trouve fortement augmenté ce qui signifie la distance entre une opportunité et un individu est un facteur plus discriminant encore. Ce résultat semble logique puisqu'en mettant un seuil de 100 sur le nombre de flux, on ne comptabilise plus les couples Origine Destination où les flux sont inférieurs à 100 individus. Or les individus ne travaillant pas dans leur propre commune ou dans les communes avoisinantes sont les moins nombreux i.e. les couples d'OD séparés par une distance moyenne ou grande sont donc pour la plupart filtrés, ce qui a pour conséquence de surreprésenter les trajets à courte distance par rapport aux autres ;

- la fonction puissance parait peu adaptée aux déplacements domicile-travail : tendant très vite vers zéro elle ne permet pas de prendre en considération les opportunités situées à plus de 8 minutes du domicile des individus.

On note également une importante différence avec la fonction résistive trouvée par Orus et Sanchez et celle calculée ici. Le coefficient déterminé ici étant plus élevé notre fonction résistive décroît plus rapidement que celle proposée dans l'instruction cadre. C'est également un résultat logique. En effet, à travers la méthode de Orus et Sanchez, on considère que la probabilité qu'un déplacement entre une origine et une destination soit réalisé, dépend uniquement de la distance entre ces deux lieux.

Dans le raisonnement suivi dans la présente étude, on considère que la probabilité qu'un déplacement se fasse entre un couple d'OD dépend de la distance qui les sépare et également du nombre d'opportunités dans la zone de destination. Ainsi, si on considère seulement les distances de déplacement, le modèle utilisé ici sous-estimera les destinations lointaines puisque la fonction résistive de ce modèle décroît plus rapidement. Cependant si on compte les opportunités des zones, les destinations lointaines possédant beaucoup d'opportunités seront revalorisées, ce qui n'est pas le cas dans le raisonnement suivi par Orus et Sanchez. Ainsi, si on utilise le coefficient trouvé par Orus et Sanchez dans le cadre d'un modèle de trafic, on risque de surévaluer les opportunités lointaines. Imageons ces deux raisonnements par un exemple très simplifié pour bien comprendre la distinction entre les deux méthodes :

Méthode utilisée dans cette étude :

On considère que la distribution des déplacements s'effectue selon la loi de distribution gravitaire. On tente de trouver le meilleur coefficient et la meilleure forme de la fonction résistive qui permet d'atteindre les flux réellement observés à partir de la loi de distribution gravitaire. La probabilité qu'un déplacement de la commune A vers la commune B ait lieu sera égale à :

$$\frac{Eb * \exp(-\beta * Dab)}{Ea * \exp(-\beta * Dab) + Ec * \exp(-\beta * Dac)}$$

Méthode utilisée par Orus et Sanchez :

Grâce aux données des enquêtes déplacements, on calcule la variation du nombre de déplacements en fonction de la distance, on calcule cette fonction grâce à la régression linéaire.

La probabilité qu'un déplacement de distance Dab se fasse sera alors égale à :

$$\alpha' * \exp(-\beta' * Dab)$$

Où α' est un coefficient déduit de la régression linéaire.

5.4 - Limites

La méthode développée dans cette étude révèle quelques limites liées aux hypothèses prises.

Tout d'abord, des effets de marges sont introduits par le choix de l'aire d'étude. En effet, en choisissant la France comme aire d'étude, on ne prend pas en compte les communes frontalières interagissant avec certaines communes françaises. Ainsi, dans le calibrage présenté, un biais sera introduit par le fait qu'on ne prend pas en compte les déplacements en destinations de ces communes étrangères qui peuvent être nombreux lorsque les communes françaises sont situées proches d'une frontière. Néanmoins, on peut tout de même considérer que ce biais est acceptable aux vues du faible nombre de déplacements vers une commune étrangère par rapport au nombre de déplacements total.

Les hypothèses faites sur le temps d'accès au réseau introduisent également des biais potentiels. En effet, la distance à parcourir pour accéder au réseau qui a été retenu est la longueur du connecteur de centroïde qui est un segment reliant le centroïde aux trois nœuds les plus proches. Cette distance moyenne est certainement sous-estimée puisqu'on ne considère pas la distance moyenne réelle d'accès au réseau, que nous pourrions calculer grâce au réseau secondaire. Ensuite, la vitesse de circulation retenue est de 38 km/h ce qui est largement surestimé en milieu urbain où celle-ci est plus proche des 20 km/h. Cependant travaillant sur des communes rurales comme urbaines nous devions trouver une valeur commune.

Le réseau utilisé, n'est pas un réseau fin, seuls les axes principaux y sont retenus ce qui simplifie énormément la complexité réelle du réseau. Les temps de parcours se trouvent donc être biaisés.

Notons également que l'on ne prend pas en compte le coût généralisé mais seulement le temps de parcours. On privilégie donc systématiquement les itinéraires utilisant les axes rapides et coûteux alors que les individus peuvent choisir d'utiliser des itinéraires moins rapides mais moins chers.

Enfin, on peut se questionner sur la pertinence du zonage choisi. En effet, on note que près de 20 % des déplacements étudiés sont des déplacements dont l'origine et la destination sont la même commune et sont donc considérés comme intra zonaux. Ces déplacements sont ceux dont on est le moins à même de connaître la distance et le temps de parcours exacts et sont par conséquent ceux qui introduiront des biais importants comme indiqué dans la partie suivante. Néanmoins les données disponibles ne permettent pas d'étudier les déplacements à une échelle plus fine.

5.5 - Tests sur différentes régions

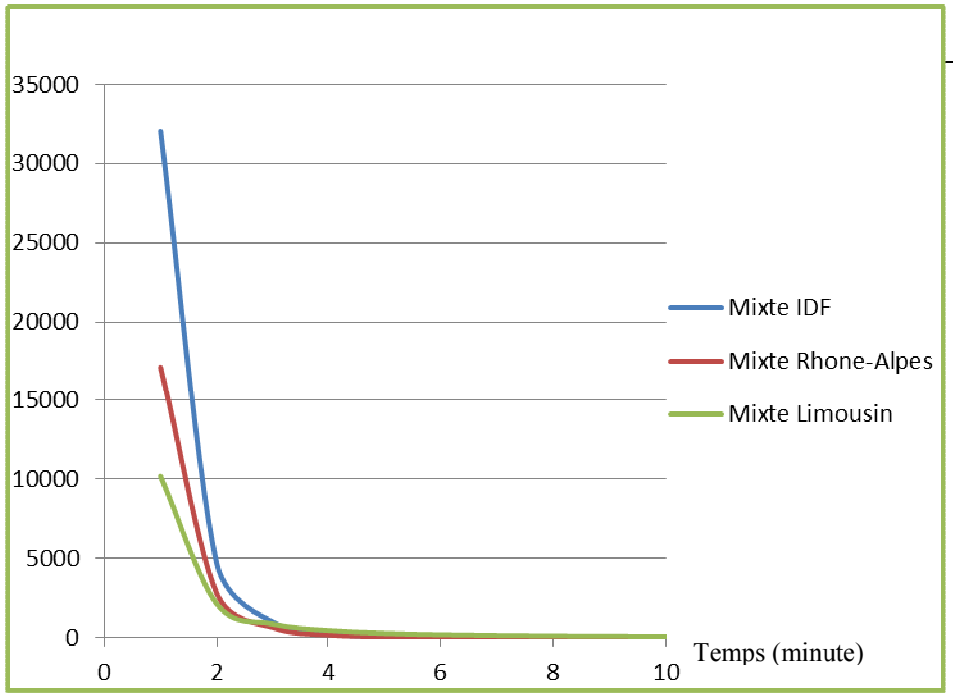
5.5.1 - Tests de variabilité

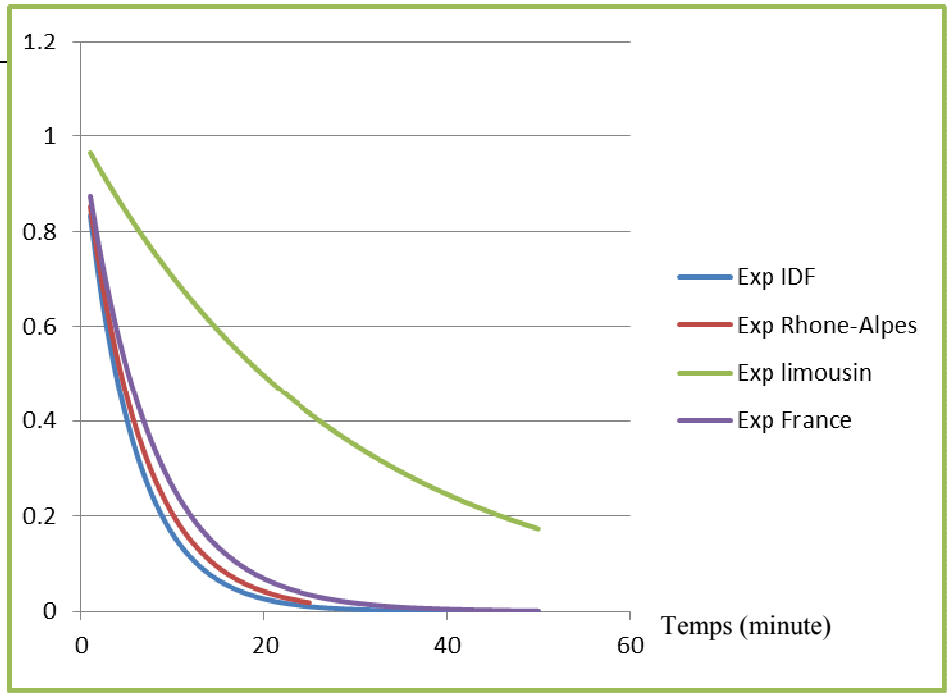
Afin de tester la variabilité des coefficients trouvés on se propose dans cette partie de calibrer la fonction de distribution de déplacement pour différents types de région. On a ainsi souhaité la calibrer sur la région Ile-de-France (à caractère très dense avec 976 hab./km²), sur la région Rhône-Alpes (à caractère moyennement dense avec 144 hab./km²) et la région du Limousin (à caractère peu dense avec 44 hab./km²). Cependant TransCAD® ne permet de travailler qu'avec des matrices carrées, on ne peut donc pas étudier les flux en provenance d'une de ces régions et à destination des autres régions françaises (matrice 742* 36242 pour le Limousin par exemple).

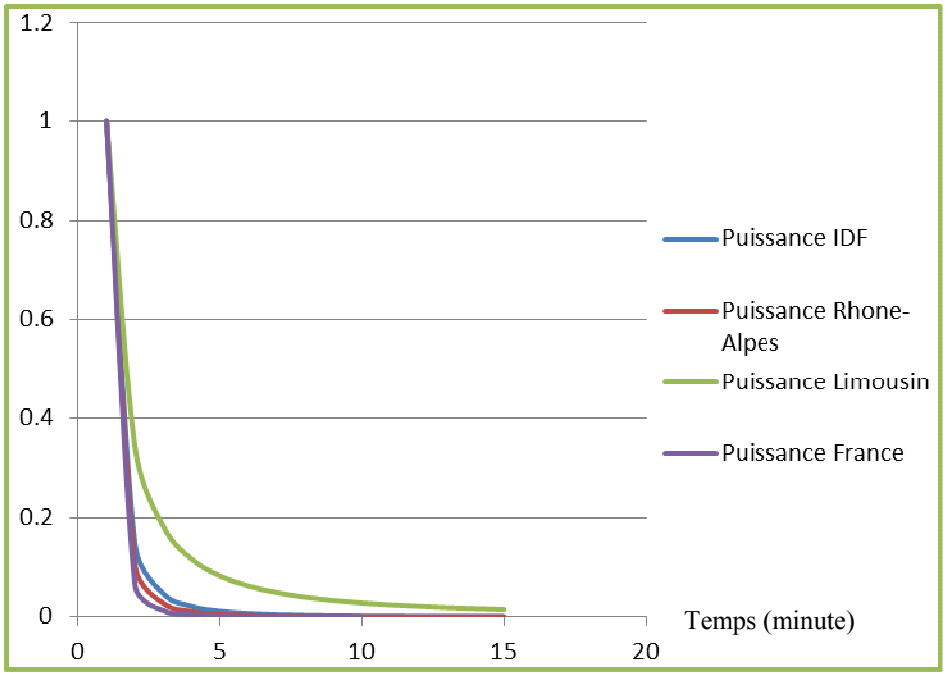
On considèrera donc seulement les flux internes à ces régions. Ce qui représente une hypothèse forte, certes, mais qui nous permet d'avoir une idée de la variabilité des coefficients selon le type de région. On procède avec la même méthode que sur la France entière pour chaque région. Après calibrage on obtient les résultats suivants :

	Fonction exponentielle	**Fonction exponentielle (seuil 100)**	**Fonction puissance**	**Fonction Mixte**
Ile de France	0,182	0,252	2,792	α=94407 (sans unité) β= 1,21 (sans unité) γ=1,08 (min^{-1})
Rhône-Alpes	0,159	0,23	3.28	α=48122 (sans unité) β= 1,12 (sans unité) γ=1,033 (min^{-1})
Limousin	0,035	0,061	1,554	α=10195 (sans unité) β= 2,25 (sans unité) γ= 0 (min^{-1})
France entière	0,134	0,217	0,397	-

Figure 8 : résultats sur les régions sélectionnées







0

Figure 9 : résultats du calibrage sur les régions sélectionnées

Les résultats obtenus sont légèrement surévalués puisqu'on ne prend pas en compte les déplacements qui ont pour destination une commune d'une autre région et qui sont donc principalement des déplacements longs.

Néanmoins, les coefficients trouvés en région Ile de France et en région Rhône-Alpes sont similaires et sont tous deux proches de celui trouvé pour la France entière. Toutefois les coefficients trouvés pour ces deux régions sont largement supérieurs à celui trouvé par Orus et Sanchez.

Le Limousin présente un comportement différent avec un coefficient nettement plus faible que les autres. Ce résultat parait logique. En effet, contrairement aux régions denses et urbaines, le Limousin est une région plutôt rurale et peu dense. Les zones d'activités et les zones résidentielles sont donc disposées d'une manière éparse sur le territoire et il y a peu ou pas de congestion. La population de la région du Limousin est donc de ce fait disposée à se déplacer plus loin pour accéder aux emplois.

Les coefficients varient donc beaucoup selon les régions et leurs caractéristiques. On peut alors se demander s'il ne serait pas plus approprié de calibrer les lois de distribution sur des zones dont les caractéristiques socio-démographiques sont similaires.

5.5.2 - Application gravitaire

Méthode

On a réalisé les applications sur les trois régions précédemment étudiées, en testant les coefficients trouvés à l'échelle nationale et ceux trouvés à l'échelle locale.

Pour tester la validité et/ou les limites des résultats, il faut réaliser une application de la loi de distribution de déplacements retenue pour chaque fonction résistive trouvée, afin de tester l'efficacité de chacune d'elles en termes de prévisions de trafic. Pour cela il faut pour chaque région et pour chaque commune obtenir le nombre de flux sortants (émissions) et le nombre d'opportunités (attractions). En effet ces deux paramètres sont présents dans la loi de distribution gravitaire. A partir de la matrice des flux (matrice origine-destination) on calcule la somme de chaque ligne et celle de chaque colonne. La somme d'une ligne représente les flux sortants de la commune correspondante, et la somme d'une colonne représente les opportunités de la commune correspondante. Ceci constitue ainsi une table des émissions et des attractions de chaque commune.

Grâce à la matrice des temps de parcours, la table des émissions et des attractions, et grâce aux résultats du calibrage précédent, la loi gravitaire peut être appliquée. On obtient alors une matrice origine destination. Pour tester la pertinence du modèle utilisé on compare la matrice obtenue avec la matrice des flux réels. Pour cela on effectue le calcul suivant :

$$\frac{\Sigma_j \Sigma_i |T'ij - Tij|}{Ttot}$$

T'ij, Tij, Ttot représentent respectivement les déplacements prévus de la zone i vers la zone j, les déplacements constatés de i vers j et le nombre de déplacements total sur la zone d'étude.

Ce terme fournit, pour chaque fonction résistive, un indicateur sur l'efficacité en terme de modélisation de trafic.

Résultats

	Forme Exponentielle-coefficient national	Forme Exponentielle-coefficient local	Forme puissance-coefficient local	Forme Mixte-coefficient local
Ile de France	**0,605**	**0,580**	**0,590**	**0,534**
Rhône-Alpes	**0,474**	**0,457**	**0,670**	**0,455**
Limousin	**0,340**	**0,719**	**0,497**	**0,419**

Figure 10 : résultats de l'application gravitaire sur les régions sélectionnées

On note des écarts significatifs entre les flux constatés et les flux prévus. Plusieurs explications peuvent être avancées. Premièrement des biais sont introduits à cause des hypothèses. En effet, l'utilisation de matrice carrée, c'est-à-dire le fait de ne considérer que les flux internes aux régions, introduit un effet de marges non négligeable. Enfin le maillage choisi est assez fin, ainsi un flux peut être affecté sur une mauvaise destination et sera donc compté à ce titre comme une erreur alors que la différence en longueur de déplacements et en nombre d'opportunités atteintes n'est pas importante entre le vrai déplacement et celui prévu. Ces écarts seraient donc probablement plus faibles si les résultats étaient agrégés à une échelle plus grande comme le canton par exemple.

Par ailleurs, les déplacements intra zonaux apparaissent sous-estimés par le modèle utilisé dans cette étude. Cela peut provenir du fait que l'on ne tient pas compte de la congestion qui tendrait à augmenter les temps de déplacements et donc à privilégier les opportunités situées près du domicile. Les résultats sont donc probablement moins pertinents dans les régions denses, où les temps de déplacements sont les plus sous-estimés. Néanmoins pour prendre en compte la congestion, il faudrait passer par une phase d'affectation du trafic sur l'ensemble du territoire français, ce qui représente des temps de calculs importants.

D'un point de vue général, la fonction mixte parait plus adaptée, elle fournit les meilleurs résultats sur deux des trois régions, et le second sur la région du Limousin. Il parait donc important d'effectuer les calculs nécessaires à son calibrage sur l'ensemble du territoire français. La fonction puissance parait peu à même de convenir pour le motif domicile-travail. Les déplacements de courte voir très courte distance dont les déplacements intra zonaux sont, pour ce type de fonction, surestimés. Toutefois la pertinence des résultats pour un type de fonction donné semble dépendre des caractéristiques de la région.

Par ailleurs, il ressort de meilleurs résultats pour la région du Limousin avec la forme exponentielle et le coefficient national qu'avec le coefficient trouvé par un calibrage effectué sur la région. Une explication peut toutefois être formulée. Comme l'indique le calibrage de la fonction exponentielle, la population de la région du Limousin semble disposée à se déplacer plus loin pour se rendre au travail. L'effet de marges est donc amplifié de par cette caractéristique ce qui introduit des biais importants dans les résultats de l'application gravitaire avec le coefficient local.

6 - Mise à jour des fonctions résistives

6.1 - Objectifs

Les résultats obtenus dans cette étude, sur la base des données INSEE, apparaissent significativement différents de ceux proposés dans l'annexe 13 de l'instruction. Il peut être utile de tester le modèle sur un autre jeu de données provenant de l'ENTD.

L'enquête de l'ENTD donne des informations sur la distance parcourue pour les trajets domicile-travail, domicile-étude, domicile-garderie, sur le temps de trajet correspondant et sur le mode de transport utilisé. Cependant on ne dispose pas des informations précises sur la position du domicile et la position des lieux de travail des personnes enquêtées. Ces informations sont limitées au canton, ce qui ne permet pas d'utiliser la méthode précédente. En effet, le point faible du modèle utilisé comme expliqué ci-dessus est la finesse du zonage. Avec des informations limitées au canton les imprécisions sur la réelle distance des déplacements qu'ils soient intra zonaux ou non, deviendraient importantes. On se limite donc dans cette partie à mettre à jour les coefficients pour les motifs énoncés ci-dessus avec la même méthode que celle développée dans les travaux de Orus et Sanchez.

On utilise donc la table de l'ENTD qui représente la table exhaustive des déplacements domicile vers le lieu de travail, le lieu d'étude ou le lieu de garderie (TEG) des individus. Chaque individu est pondéré suivant un coefficient de redressement. On dispose, entre autres, de la distance parcourue entre le domicile et le TEG, la distance routière entre le domicile et le TEG, du temps de trajet et le mode de transport utilisé. On se propose de calibrer selon ces différents paramètres les coefficients correspondants pour les trois motifs.

6.2 - Exemple du motif domicile-travail

La méthode pour le motif domicile-travail est la suivante: on ne retient que les déplacements dont le motif est domicile travail, sans condition sur le mode utilisé et dont la longueur du trajet n'est pas nulle ou non renseignée. Une fois les données sélectionnées on regroupe tous les flux dont le trajet est de même longueur, ainsi que les effectifs pour chaque kilomètre.

Ces points sont représentés sur les graphiques suivants:

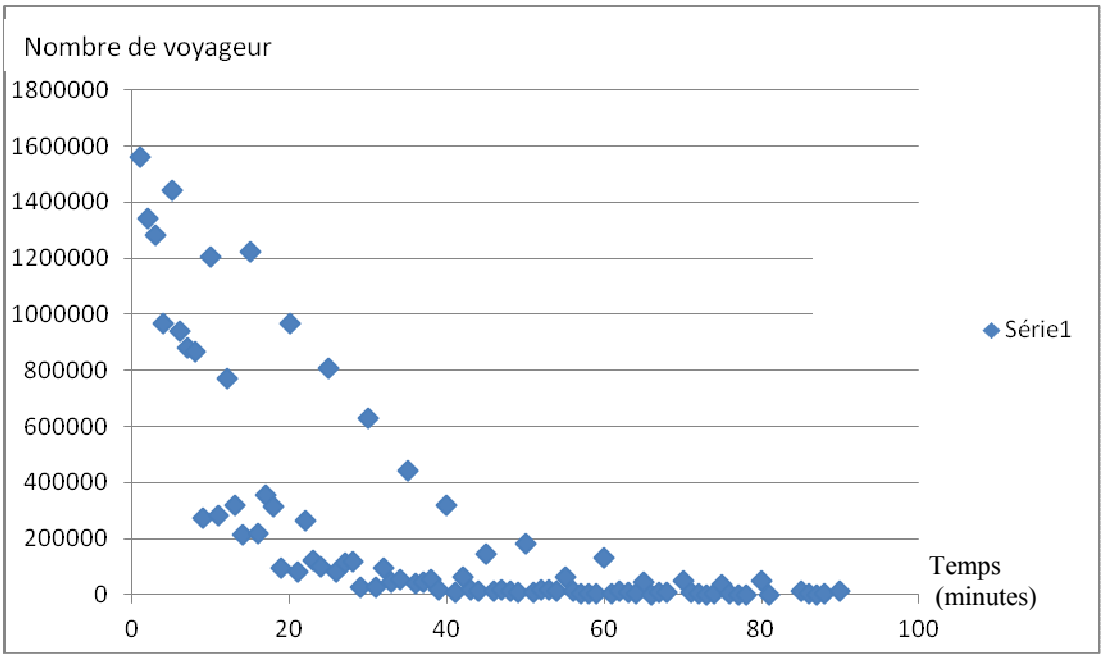


Figure 11 : graphique représentant le nombre de flux en fonction de la distance

Pour lisser le graphique obtenu, les flux compris dans un intervalle de deux kilomètres sont regroupés. La distance retenue pour chaque intervalle est la valeur moyenne de celui-ci. Le graphique suivant présente les résultats de cette agrégation :

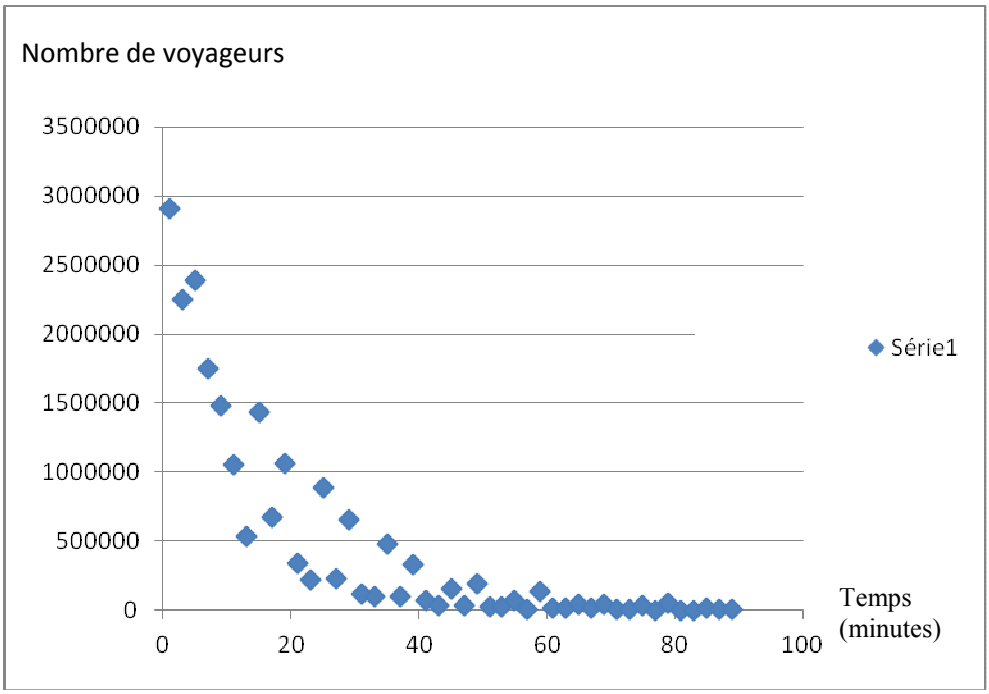


Figure 12 : graphique représentant le nombre de flux en fonction de la distance après lissage

Le logarithme des effectifs en fonction de la longueur des déplacements, est représenté sur le graphique suivant :

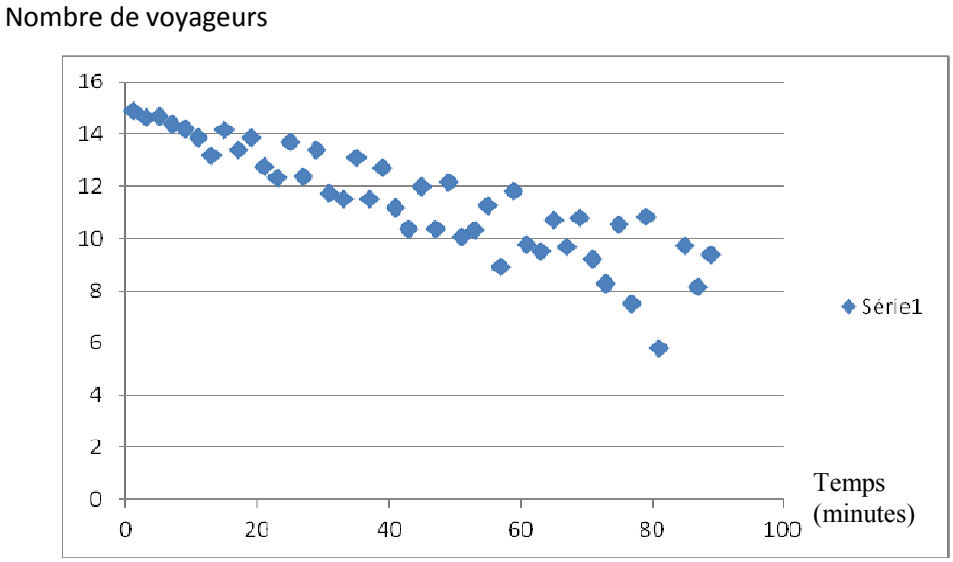


Figure 13 : graphique représentant le logarithme du flux en fonction de la distance

La régression linéaire effectuée est la suivante :

$$\ln y = \alpha + \beta * x$$

(i.e. $y = C * \exp(\beta * x)$)

Où y est le nombre de flux dont le trajet est de longueur x. On trouve :

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*
Constante	14,7207352	0,2925045	50,3265258	3,5802E-39
Variable X 1	-0,07362356	0,00573158	-12,8452528	3,8666E-16

Coefficient de détermination R^2	**0,79227105**
Erreur-type	0,97408459

Figure 14 : résultats de la régression linéaire

Notons qu'on effectue ces calculs avec le nombre de déplacements, plutôt qu'avec la fréquence de déplacements utilisée dans la méthode d'Orus et Sanchez. Les résultats sont tout de même comparables puisque les méthodes sont équivalentes, l'introduction d'un coefficient multiplicateur n'affectant pas le coefficient β trouvé.

6.3 - Résultats

On applique la même méthode avec les différentes variables, les différents critères et les différents motifs, ce qui donne résultats suivants :

	Distance routière (VP et moto)	**Temps (VP et moto)**	**Distance (tout mode)**	**Temps (tout mode)**
Domicile-Travail	0,068	0,059	0,074	0,059
Domicile-Etude	0,07	0,046	0,054	0,053
Domicile-Garderie	-	0,127	0,135	0,102

Figure 15 : résultats du calibrage avec régression linéaire

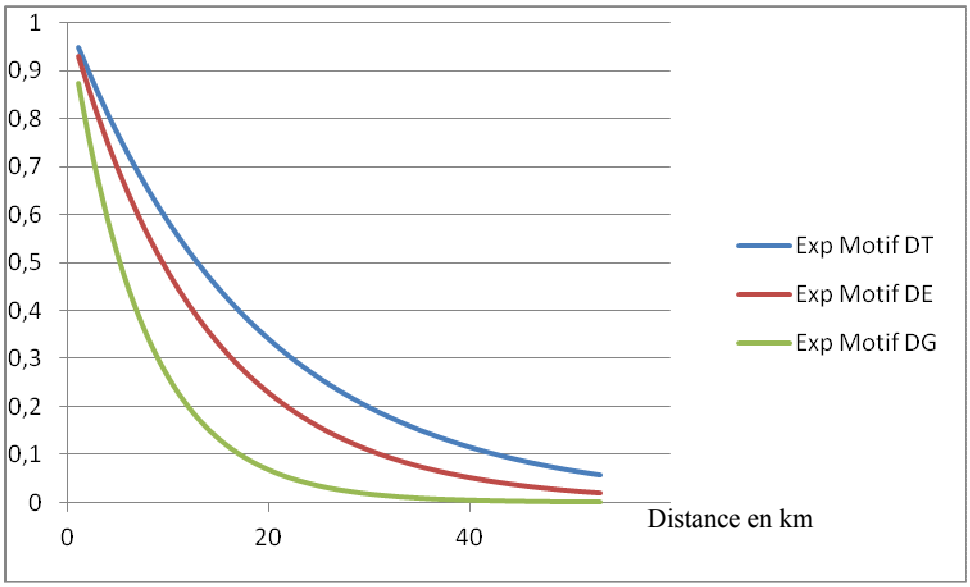


Figure 16 : fonctions résistives pour les différents motifs

Les résultats présentés ci-dessus ont été obtenus avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0.7.

Les résultats trouvés indiquent notamment que les usagers sont en moyenne prêts à voyager plus loin pour aller au travail que pour amener son enfant à la garderie. Les personnes se rendant à leur lieu d'étude se déplacent moins loin que ceux qui vont au travail. Ceci semble cohérent avec les résultats d'autres enquêtes déplacements. Le motif étude concerne des personnes jeunes ne bénéficiant souvent pas de véhicule particulier et se rendant la plupart du temps dans leur commune de résidence. Les distances à parcourir sont donc en moyenne plus faibles que pour ceux allant au travail.

La comparaison des coefficients dépendant de la variable « distance » avec ceux dépendant de la variable « temps » donne des informations sur la vitesse moyenne de circulation. Ainsi si on regarde les déplacements, tous modes confondus, on note que le coefficient reste invariant pour le motif étude lorsqu'on passe de la variable distance à la variable temps, alors que celui-ci diminue pour le motif travail. Ceci n'est pas illogique puisqu'on peut penser que les étudiants se déplacent davantage en transport en commun que les actifs ayant un emploi et que par conséquent, les déplacements pour études présentent une vitesse de circulation plus faible que les autres.

Les résultats ci-dessus apparaissent donc cohérents et statistiquement significatifs. Les coefficients β apparaissent plus faibles que ceux trouvés grâce à la méthode prenant en compte les opportunités, comme le coefficient proposé par Orus et Sanchez.

7 - Eléments de conclusion

Deux méthodes ont été utilisées dans le cadre de cette étude pour calibrer la fonction de décroissance de l'indicateur gravitaire d'accessibilité.

La première méthode, ne prenant pas en compte le rôle des opportunités, est simple d'utilisation et permet de proposer une actualisation des coefficients proposés dans l'instruction en ne changeant pas la méthode utilisée. La deuxième méthode, plus complexe, permet de prendre en compte le rôle des opportunités dans le calibrage de la fonction résistive et est donc plus représentative des réels gains d'accessibilité du territoire considéré.

Les résultats principaux obtenus dans le cadre de cette étude peuvent être synthétisés de la façon suivante :

Méthode sans prise en compte des opportunités :

La fonction de décroissance de l'indicateur gravitaire d'accessibilité qui ressort des estimations précédentes, avec leurs limites, est la suivante :

- f(Tij) = Exp **(-0,059** * Tij) pour le motif domicile - travail

- f(Tij) = Exp **(-0,046** * Tij) pour le motif domicile - étude
- f(Tij) = Exp **(-0,127** * Tij) pour le motif domicile - garderie

Méthode prenant en compte les opportunités :

- La fonction de décroissance de l'indicateur gravitaire d'accessibilité telle qu'elle ressort des estimations précédentes, avec leurs limites, est : f(Tij) = Exp **(-0,134** * Tij) pour le motif domicile – travail.
- Il est nécessaire de calibrer la fonction mixte qui parait plus adaptée.

On peut noter que ces coefficients ont été obtenus en considérant que le temps de parcours constitue le principal facteur explicatif de l'accessibilité. Un approfondissement considérant le coût généralisé pourrait être mené, mais il nécessite de creuser la question des paramètres de ce coût généralisé à prendre en compte.

La méthode prenant en compte les opportunités permet de montrer que la structuration d'un territoire en termes de répartition des activités et des populations, loin d'être due au hasard, s'adapte en permanence aux caractéristiques d'une zone. L'implantation d'une zone d'activités influera par exemple sur la répartition de la population en modifiant l'accessibilité des zones alentours, tout comme l'implantation d'une nouvelle infrastructure.

De la même façon, la position des zones à forte accessibilité influencera le choix d'implantation d'une nouvelle entreprise. Ceci ouvre des pistes pour l'amélioration de l'étape de génération des modèles de trafic, en reliant les gains d'accessibilité engendrés par un projet et les impacts à moyen terme sur les structurations des activités et de la localisation des ménages sur le territoire.

8 - Bibliographie

- Performance of Accessibility Measures in Europe Baradaran, Ramjerdi, 2001.
- Evaluation des politiques de transports et équité spatiale. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, Bonnafous A., Masson S., 2003. Vol.4 :547-572.
- Analyse et Prévision de la Demande en Transpor, Bonnel P, 2006.
- L'accessibilité : du concept a l'outil d'évaluation des politiques de mobilité urbain durable, Crozet.Y, Ovtracht.N, Thiebaut. V, 2009.
- Méthodes de calcul et de représentation de l'accessibilité dans les méthodes d'évaluation des projets de transport urbain, Crozet Y., Mercier A., Ovtracht N., Sapet L., article en cours.
- Direction régionale de l'équipement Ile-de-France, 2008. Modus v2.1 Documentation détaillée du modèle de déplacements de la DREIF.
- De la mesure de l'utilité des travaux publics, Dupuit J., 1844.
- Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land use transport scenarios, and related social and economic impacts. Geurs K., Ritsema Van Eck, 2001.
- How accessibility shapes land use, Journal of American Institute of Planners Hansen W G, 1959.
- Indicators of urban accessibility: Theory and application Koenig Gilbert., 1980.
- Théorie économique de l'accessibilité urbaine. In: Revue économique. Volume 25, n°2, Koenig Gilbert, 1974. 1974. pp. 275-297.
- Transports urbains et calcul économique, Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, 1997.
- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport. Ministère de l'Equipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, 2004.
- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains. Ministère de l'Equipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, 2007.
- "User benefit in the evaluation of transport and land use plans". Journal of transport economics policy, Neubuger H., 1971..
- Méthodologie de prise en compte des objectifs d'aménagement du territoire avec un critère d'accessibilité, Orus J.P., Sanchez Flores O., 1995.
- Evaluation économique des politiques de transport et indicateurs d'accessibilité spatiale : l'apport des SIG, Raux C., Mercier A., Ovtracht N., 2008. *Cybergeo*, article 435.

- Reggiani et al, 2010, Regional labour markets and job accessibility in City Network systems in Germany.
- Indicateurs d'accessibilité aux infrastructures interurbaines de transport routier : un indice de prise en compte de l'attractivité des destinations. Sanchez Flores, 1995.
- Calage et validation des modèles de trafic. Sétra, 2010.
- Evaluation de l'accessibilité territoriale à partir d'études de cas. Sétra, 2012.
- A statistical theory of spatial distribution models. Transportation Research. Wilson A.G, 1967.

Pôle de Compétences et d'Innovation "Évaluation des Projets et Politiques de Transport"

Ce document a été élaboré sous le pilotage du Sétra par le PCI "Évaluation des Projets et Politiques de transports".

L'action du PCI concerne l'expérimentation, l'élaboration, l'approfondissement, l'analyse et l'adaptation de méthodes et procédures d'évaluation et de concertation des projets et politiques de transports, ainsi que la déclinaison des principes conceptuels portés par les textes référents du ministère.

Le PCI est situé au CETE du Sud-Ouest et au CETE de l'Ouest.

Rédacteurs

Thomas VILLALBA – CETE du Sud Ouest - PCI EPPT
Téléphone : 33 (0) 3 81 21 69 32
mel : thomas.villalba@developpement-durable.gouv.fr

Hélène LE MAÎTRE – Sétra – CSTM-DEOST
Téléphone : 33 (0) 1 60 52 33 02
mél : helene.le-maitre@developpement-durable.gouv.fr

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
110 avenue de Paris, 77171 SOURDUN France
Téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :
• Internet : http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr
• Intranet (Réseau ministère) : http://intra.setra.i2

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.
© 2013 Sétra – Référence : 1311w – ISRN : EQ-SETRA--13-ED07--FR

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEDDE