

État de l'art des modèles de mobilité humaine appliqués aux déplacements pour des raisons scolaires

Baptiste Delaunay, Marta Ducamp, Joanna Gosse, Tony Thuillard

Décembre - mai 2024

1 Introduction

Dans le contexte de bouleversement climatique dans lequel nous vivons aujourd'hui, nous devons être capable de résilience dans tous les domaines de nos vies. Les transports ne font pas exception. Pour pouvoir aussi bien calculer l'impact des déplacements actuels que d'en prédire les évolutions futures, il faut pouvoir les modéliser. La modélisation est le fait de formaliser mathématiquement ou algorithmiquement un phénomène réel. Elle ne peut, par essence, pas prendre en compte tous les aspects du comportement réel. Dans le cadre de la construction de la bibliothèque Mobility, il est nécessaire de modéliser la mobilité des individus pour tous types de déplacements. Les motifs retenus sont ceux de l'enquête « Mobilité des personnes » de 2019 (EMP-2019), soit :

1. Achats
2. Retour au point de départ / Études / Garderie
3. Soins
4. Démarches
5. Visites
6. Accompagner ou aller chercher
7. Loisirs
8. Vacances, changer de résidence et "Autres motifs"
9. Motifs professionnels

Les déplacements pour des motifs professionnels ont déjà été implémentés dans le code de la bibliothèque, nous avons donc essayé d'élargir notre travail à d'autres motifs de déplacement. Dans le temps qui nous est imparti, nous nous sommes concentrés sur les déplacements pour des raisons scolaires, soit un champ un peu plu restreint que le motif numéro 1 de la liste.

Pour réussir à faire cette modélisation, nous devons nous appuyer sur des travaux qui ont été réalisés ultérieurement à notre travail et qui sont les plus proches de notre situation. Nous avons donc cherché à établir un état de l'art sur la modélisation des déplacements pour des raisons scolaires. A défaut de trouver des recherches qui se sont faites exactement sur notre domaine d'étude, cet état de l'art explore dans un premier temps les grands modèles et algorithmes utilisés pour représenter et prévoir les flux humains.

2 Modélisation des déplacements : les grands modèles généraux

La modélisation des déplacements humains est un champ qui s'est ouvert dans la géographie du XIX^e siècle. Alors que les migrations devenaient de plus en plus intenses, et les aménagements urbains de plus en plus centralisés, les géographes ont cherché à prédire les déplacements des personnes dans l'espace, et notamment dans un premier temps à des échelles internationales afin de prédire les migrations (TOBLER 1995). Cependant, ces tentatives de modélisation de la réalité en forme de « lois » universelles n'ont dans les faits que très peu de qualités descriptives sur le long terme, mais se concentrent sur des cas à un moment donné dans une région donnée. On peut citer par exemple « The Laws of Migration » de (RAVENSTEIN 1885), qui décrit les grandes lois des migrations et la répartition spatiale des migrants avant et après la migration. On peut par exemple citer :

1. "... même dans le cas des "comtés de dispersion", qui ont une population à répartir dans d'autres comtés, il y a un afflux de migrants à travers la frontière la plus éloignée des grands centres d'absorption". (1885 :191)
2. "Plus on s'éloigne de la source qui les alimente, moins ces courants sont rapides". (1885 :191)
3. [Nous avons] "prouvé que la plupart de nos migrants ne parcourent qu'une courte distance". (1885 :198)
4. "Pour estimer les déplacements, nous devons tenir compte du nombre de natifs de chaque comté qui fournit les migrants, ainsi que de la population des ... districts qui les absorbent". (1885 :198)

Ce type d'analyse se base sur des observations et ne prend pas en compte beaucoup de paramètres. Elle a cependant pour avantage de commencer à théoriser une loi qui se veut universelle des déplacements dans le temps.

Plus tard, au cours du XX^e siècle, d'autres recherches ont tenté de construire des modèles qui pouvaient avoir une portée culturellement moins limitée en cherchant dans la rationalité humaine, les raisons des déplacements pour ensuite en déduire des grandes lois. C'est ce que fait ZIPF 1946 dans « The P1 P2/D Hypothesis : On the Intercity Movement of Persons ». Il fait l'hypothèse que les déplacements suivent les mêmes paramètres que la gravité pour construire des modèles de déplacement au sein des États-Unis. Ainsi, selon cette théorie, la quantité de migrations entre deux villes dépend de la population (P_1 et P_2) de chacune des villes divisé par la distance (D) entre les deux villes. Ainsi, la quantité de déplacement entre les deux villes sera proportionnelle au ratio :

$$\frac{P_1 \cdot P_2}{D}$$

Avec ce type prédiction, on s'approche d'une solution algorithmique à portée universelle. De plus, on raisonne à une échelle plus proche de ce qui nous intéresse pour la modélisation pour des raisons scolaires, aussi bien au niveau géographique (ici l'échelle est adaptable à tous les niveaux ou presque), qu'au niveau du temps. En effet, Zipf ne s'intéresse pas aux migrations définitives, mais aux migrations quotidiennes entre deux villes.

Au cours des années, le modèle de Zipf a été légèrement modifié pour lui donner une meilleure capacité à générer les flux de déplacement au quotidien. Il a atteint dans la plupart des modèles la forme suivante, où F est un flux de déplacement humain :

$$F = g \frac{M_1 M_2}{r^\alpha}$$

Avec M_1 la population dans la première ville, M_2 la population dans la deuxième ville, r la distance entre les deux villes, α , un réel qui est la plupart du temps égal à 2 et g , une constante.

Ce modèle a été très largement utilisé pour appréhender des flux de personnes. Ce modèle permet notamment de modéliser le nombre de passager dans une rame de métro GOH et al. (2012), ou le l'afflux sur les autoroutes JUNG, WANG et STANLEY (2008).

Ce modèle a pour avantage d'être très simple et de pouvoir être facilement ajusté dans ses paramètres. Cela a pour effet de le rendre utilisable dans la modélisation d'un grand nombre de comportements humains. Cependant, cela ne permet pas d'étudier ces comportements en détail, et notamment pas d'identifier dans le trafic routier les endroits de saturation. Pour palier à ce problème SIMINI et al. (2021) proposent dans « A Deep Gravity model for mobility flows generation » une modélisation qui s'appuie sur des données géographiques et socio-économiques sur la population. Le réseau routier est pris en compte, au lieu de la distance brute, de même que la localisation des points d'attractivité comme les magasins, cabinets de médecins ou les écoles. Ce modèle utilise aussi des réseaux de neurones profonds qui apprennent les déplacements sur des données historiques pour pouvoir générer des flux sur la situation actuelle au mieux.

Le modèle de gravité raisonne seulement à l'échelle collective et à l'échelle d'un territoire. Il répond à la question : pour un territoire donné avec une telle population, quels seront les flux de déplacement. Le travail de LIU et YAN (2020) permet de se placer du côté de l'individu : soit pour une personne avec un environnement donné, quelle est sa destination la plus probable pour un besoin de déplacement donné? Le travail effectué par LIU et YAN (2020) permet de construire un modèle universel, qui peut s'appliquer à n'importe quel type de déplacement en se basant sur plusieurs paramètres, dont la distance et les opportunités offertes par les lieux d'attraction. Le modèle prend en compte les opportunités du lieu de départ et du lieu possible vers lequel l'individu se déplace. Il prend aussi en compte toutes les opportunités des lieux plus proches de l'individu. Il peut être formalisé mathématiquement comme ceci :

$$Q_{ij} = \int_0^\infty Pr_{mi+\alpha \cdot s_{ij}}(z) Pr_{\beta \cdot s_{ij}}(< z) Pr_{m_j}(> z) dz$$

Ici, m_i est le nombre d'opportunités au lieu i , m_j est le nombre d'opportunités au lieu j et s_{ij} est la somme des opportunités que présentent les lieux qui sont à une distance de i inférieure à la distance ij . $Pr_{mi+\alpha \cdot s_{ij}}(z)$ est la probabilité que le bénéfice maximum obtenu après $mi + \alpha \cdot s_{ij}$ échantillons soit exactement z , $Pr_{\beta \cdot s_{ij}}(< z)$ est la probabilité que le bénéfice maximum obtenu après $\beta \cdot s_{ij}$ échantillons soit inférieur à z , $Pr_{m_j}(> z)$ est la probabilité que le bénéfice maximum obtenu après m_j échantillons soit supérieur à z .

Le paramètre α reflète le comportement de l'individu qui a tendance à choisir la destination dont les avantages sont supérieurs à ceux de l'origine et des opportunités intermédiaires. Le paramètre β reflète le comportement de l'individu qui a tendance à choisir la destination dont l'avantage est supérieur à l'avantage de l'origine, et l'avantage de l'origine est supérieur à l'avantage des opportunités intermédiaires.

Ce modèle a l'avantage de prendre en compte deux influences des choix : le facteur d'exploration (α) et le facteur de prudence (β). Ces deux paramètres peuvent être ajustés lors de la génération des décisions, ce qui permet de s'approcher au mieux de la réalité des flux selon le type de mobilité à modéliser. Grâce à sa flexibilité et sa prise en compte des chemins de pensée que suivent les décisions humaines, ce modèle peut s'appliquer à une très large palette de comportements, comme la science des transports, la sociologie, l'épidémiologie des maladies infectieuses, la gestion des urgences ou l'urbanisme.

Dans ces travaux, la notion d'attractivité des lieux est toujours caractérisée par un unique facteur (dans le cas du modèle de gravité, c'est la population qui est prise en compte, et c'est une opportunité unique dans le modèle d'opportunité). Les travaux de ALIS, LEGARA et MONTEROLA (2021) permettent de complexifier l'attractivité des villes. Le modèle proposé est proche du modèle de gravité mais prend dans son poids non pas seulement la population, mais un facteur d'urbanisation des villes, qui est calculé à partir de la quantité d'équipements et de services dans un lieu donné, de la population et de la densité de population. Cette approche permet d'obtenir des meilleurs résultats que le modèle de gravité, notamment dans les pays développés. L'hypothèse au moment de la construction de ce modèle est que dans les pays développés, les personnes font attention à d'autres aspects que simplement la forte demande de main d'oeuvre pour se déplacer, mais prennent aussi en compte la présence de lieux de loisirs, d'écoles et de services de santé.

3 La modélisation des déplacements pour des raisons scolaires

Les études pour des déplacements pour des raisons scolaires sont pour leur part moins nombreuses. Peu d'administrations ou société rencontrent en effet de difficulté majeure autour des déplacements pour des motifs scolaires.

La majorité des études sont faites en Chine dans les grandes agglomérations. DAI, ZHANG et LIN 2023 s'intéressent au réseau routier et à la manière dont les déplacements scolaires créent des embouteillages, puisqu'ils se font tous à peu près à la même heure. Ces embouteillages créent un « coût » du trajet plus fort pour les individus et peut les mener à décaler leurs heures de départ, et peut aussi avoir un effet sur le taux d'emploi des populations.

Le travail de XIONG et al. 2019 étudie pour sa part au choix des modes de transports dans la ville de Pékin dans une perspective de mieux comprendre et modéliser la pollution urbaine et la quantité d'effort physique que font les enfants. Il en va de même pour le travail de MARSHALL et al. 2010, qui travaillent dans les grandes villes des Etats-Unis.

On voit donc que ces études se font à une échelle bien moindre que les modèles généraux et universels présentés précédemment. Elles sont de plus orientées pour mieux connaître des problèmes de société ou de santé publique qui sont spécifiques aux grandes agglomérations. Ces études peuvent apporter des éléments pour l'étude des déplacements pour des raisons scolaires en France, mais seulement dans la manière dont le déplacement se déroule. Ici, le choix des écoles est un problème qui n'est pas traité.

Il existe cependant quelques études qui portent précisément sur les déplacements scolaires en France. Le travail de ISAMBOURG (2024) intitulé « Mobilité scolaire, empreinte carbone et enjeux sociospatiaux » fait une modélisation à l'échelle de la région Nouvelle-Aquitaine à partir d'extrapolation de données récoltées par sondage dans le département de la Gironde. Ces études ne présentent pas des lois universelles, mais réalisent des sondages des élèves qui portent sur le choix du moyen de transport et de la distance de leur lieu de scolarisation. Les réponses données au sondage sont mises en relation avec des caractéristiques sociologiques, ce qui permet dans le contexte précis de la France, d'extrapoler les données. En cela, cette étude ressemble aux enquêtes nationales transport et déplacements (ENTD) 2008 et enquête mobilité des personnes (EMP) 2019 menées par le service des statistiques publiques tous les 10 ans environ.

4 Conclusion

Pour conclure, les mobilités humaines sont un phénomène social dont la modélisation intéresse les chercheurs et les administrateurs des territoires. Des grands modèles ont été développées et affinés au cours des années pour approcher au mieux des arbitrages individuels.

Concernant les déplacements pour des motifs scolaires, la modélisation en est encore à ses balbutiements. Les études menées ont rarement pour but de créer des lois universelles qui s'appliquent à tous les types de sociétés.

Références

- TOBLER, Waldo. « Migration : Ravenstein, Thorntwaite, and Beyond ». In : *Urban Geography - URBAN GEOGR* 16 (mai 1995), p. 327-343. DOI : [10.2747/0272-3638.16.4.327](https://doi.org/10.2747/0272-3638.16.4.327).
- RAVENSTEIN, Ernst Georg. « The Laws of Migration ». In : *Journal of the Statistical Society* 46 (1885), p. 167-235.
- ZIPF, George Kingsley. « The P1 P2/D Hypothesis : On the Intercity Movement of Persons ». In : *American Sociological Review* 11.6 (déc. 1946), p. 677-686. DOI : [10.2307/2087063](https://doi.org/10.2307/2087063). URL : <http://www.jstor.org/stable/2087063>.
- GOH, Segun et al. « Modification of the gravity model and application to the metropolitan Seoul subway system ». In : *Physical Review E* 86.2 (2012), p. 026102.
- JUNG, Woo-Sung, Fengzhong WANG et H. Eugene STANLEY. « Gravity model in the Korean highway ». In : *Europhysics Letters* 81.4 (jan. 2008), p. 48005. DOI : [10.1209/0295-5075/81/48005](https://doi.org/10.1209/0295-5075/81/48005). URL : <https://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/81/48005>.
- SIMINI, Filippo et al. « A Deep Gravity model for mobility flows generation ». In : *Nature Communications* 12.1 (nov. 2021). ID : Simini2021, p. 6576. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-021-26752-4](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26752-4). URL : <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26752-4>.
- LIU, Er-Jian et Xiao-Yong YAN. « A universal opportunity model for human mobility ». In : *Scientific Reports* 10.1 (mars 2020). ID : Liu2020, p. 4657. ISSN : 2045-2322. DOI : [10.1038/s41598-020-61613-y](https://doi.org/10.1038/s41598-020-61613-y). URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61613-y>.
- ALIS, Christian, Erika Fille LEGARA et Christopher MONTEROLA. « Generalized radiation model for human migration ». In : *Scientific Reports* 11.1 (nov. 2021). ID : Alis2021, p. 22707. ISSN : 2045-2322. DOI : [10.1038/s41598-021-02109-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-02109-1). URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02109-1>.
- DAI, Qing, Jiajia ZHANG et Zhengkui LIN. « Modeling Morning Commute with Different Kinds of Activities Based on Bottleneck Model ». In : *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 32.4 (août 2023). ID : Dai2023, p. 444-461. ISSN : 1861-9576. DOI : [10.1007/s11518-023-5565-9](https://doi.org/10.1007/s11518-023-5565-9). URL : <https://doi.org/10.1007/s11518-023-5565-9>.
- XIONG, Hui et al. « Exploring Behavioral Heterogeneities of Elementary School Students' Commute Mode Choices Through the Urban Travel Big Data of Beijing, China ». In : *IEEE Access* PP (fév. 2019), p. 1-1. DOI : [10.1109/ACCESS.2019.2897890](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897890).
- MARSHALL, Julian et al. « Vehicle Emissions during Children's School Commuting : Impacts of Education Policy ». In : *Environmental Science & Technology* 44 (mars 2010), p. 1537-1543. DOI : [10.1021/es902932n](https://doi.org/10.1021/es902932n).
- ISAMBOURG, Thibault. « Mobilité scolaire, empreinte carbone et enjeux sociospatiaux ». working paper or preprint. Jan. 2024. URL : <https://shs.hal.science/halshs-04145598>.