

# Sous-réseau optimal d'un réseau de transports perturbé

Matthieu Guillot<sup>1</sup>, Angelo Furno<sup>1</sup>, El-Houssaine Aghezzaf<sup>2</sup>, Nour-Eddin El Faouzi<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Univ. Gustave Eiffel, Univ. Lyon, ENTPE, LICIT [matthieu.guillot@univ-eiffel.fr](mailto:matthieu.guillot@univ-eiffel.fr)

<sup>2</sup> Université de Ghent, Belgique

**Mots-clés :** *Transports, sous-graphes optimaux, programmation linéaire*

## 1 Introduction

La pandémie de COVID-19 a fortement impacté nos réseaux de transports en commun en général, et la demande en particulier. En effet, durant les confinements successifs, la demande a baissé à la fois de manière quantitative car les usagers des transports en commun (TC) étaient moins nombreux globalement ; et qualitativement car certains anciens usagers des TC se sont tournés vers des transports individuels, notamment pour des raisons d'insécurité sanitaire, comme le montre une étude de l'Institut Paris Région [2] menée dans plusieurs villes du monde. Par conséquent, l'offre de transport n'étant plus adapté à la demande changeante, le réseau de TC est devenu inadéquat. Le fait de pouvoir adapter dynamiquement le réseau de TC à une demande incertaine est un gros enjeu pour l'avenir, où de telles crises seront susceptibles de se reproduire. Le network design doit désormais tenir compte de ces enjeux, car les changements d'emplois ou d'horaires ne sont pas capables seuls de permettre les adaptations requises [3, 1].

## 2 Sous-réseau optimal

Nous proposons un modèle pour déterminer un sous-réseau de TC qui garantie que (i) le temps minimal d'accès à partir de n'importe quel noeud du *réseau urbain* au sous-réseau n'augmente pas de manière *excessive* par rapport au réseau original ; (ii) le retard induit sur chaque trajet par la suppression de noeuds n'augmente pas au delà d'un certain seuil ; et (iii) le pourcentage d'élimination d'arrêts de bus est plus grand qu'un certain facteur prédéterminé. Une solution est dite optimale si elle induit un retard global pondéré (par la demande) minimal.

| Notation                  | Description  |
|---------------------------|--|
| $V$                       | Ensemble des arrêts de bus   |
| $n_t =  V $               | Nombre d'arrêts de bus   |
| $SP(v_1, v_2)$            | Temps de parcours du plus court chemin entre $v_1 \in V$ et $v_2 \in V$                |
| $U$                       | Centroides des zones urbaines  |
| $n_u =  U $               | Nombre de zones urbaines   |
| $d(u, v)$                 | Temps d'accès entre $u \in U$ et $v \in V$   |
| $d_{acc}(u)$              | Temps d'accès minimal entre $u \in U$ et $PTN$   |
| $acc(u)$                  | Plus proche arrêt de bus de $u \in U$  |
| $OD(u_1, u_2)$            | Demande entre $u_1 \in U$ et $u_2 \in U$   |
| $Pelim$                   | Pourcentage minimum d'élimination d'arrêts de bus                                      |
| $\alpha$                  | Facteur d'augmentation admissible pour tout trajet                                     |
| $k(u)$                    | Facteur d'augmentation acceptable du temps d'accès au réseau à partir de $u \in U$     |
| $V_{sol} \subseteq V$     | Sous-ensemble d'arrêts de bus constituant une solution                                 |
| $d_{acc}^{sol}(u)$        | Temps d'accès minimal de $u \in U$ à un noeud de $V_{sol}$                             |
| $Opt_{V_{sol}}(u_1, u_2)$ | Temps de parcours minimal entre $u_1 \in U$ et $u_2 \in U$ pour une solution $V_{sol}$ |

Définissons, pour tout  $u \in V$  et pour tout  $k \in \mathbb{R}_+^{n_u}$ ,  $D_u^k = \{v \in V | d(u, v) \leq k(u)d_{acc}(u)\}$ . On définit également  $M$  comme un temps d'accès maximal raisonnable.

On considère le programme linéaire ( $P$ ), dont les variables de décision sont  $x$  et  $d_{acc}^x(u)$ .

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{(u_1, u_2) \in U} OD(u_1, u_2)(d_{acc}^x(u_1) + d_{acc}^x(u_2)) \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{v \in D_u^k} x(v) \geq 1 \quad \forall u \in U \quad (1) \\
& d_{acc}^x(u) = \min_{v \in D_u^k} d(u, v) + (1 - x(v))M \quad \forall u \in U \quad (2) \\
& d_{acc}^x(u_1) + d_{acc}^x(u_2) + SP(acc(u_1), acc(u_2)) \leq \alpha(d_{acc}(u_1) + d_{acc}(u_2) + SP(acc(u_1), acc(u_2))) \quad \forall (u_1, u_2) \in U^2 \quad (3) \\
& \sum_{v \in V} x(v) \leq (1 - p_{elim})n_t \quad (4) \\
& x \in \mathbb{Z}_+^{n_t} \\
& d_{acc}^x \in \mathbb{R}_+^{n_u}
\end{aligned}$$

### 3 Résultats et Conclusion

On peut reformuler le problème ( $P$ ) comme un PLNE, car la contrainte (2) peut être linéarisée. De plus, la contrainte (1) assure qu'à partir de tout  $u \in U$ , l'augmentation du temps d'accès n'augmente pas plus que par un facteur  $k(u)$ . La contrainte (2) définit  $d_{acc}^x(u)$  comme le temps d'accès  $u$  au nouveau sous-réseau. La contrainte (3) assure que le temps de parcours de n'importe quel trajet n'augmente pas d'un facteur plus que  $\alpha$  et (4) assure que le pourcentage d'élimination des arrêts de bus est d'au moins  $p_{elim}$ . Finalement, on conclut que les solutions optimales de ( $P$ ) sont les solutions optimales du problème décrit dans la section précédente.

Ce modèle a donné lieu à un outil d'aide à la décision permettant à des opérateurs de réseaux de choisir, parmi plusieurs, le scénario qui correspond le mieux à leurs contraintes. Nous avons également appliqué le modèle à la région de Lyon avec des données réelles, comme le montre la figure 1.

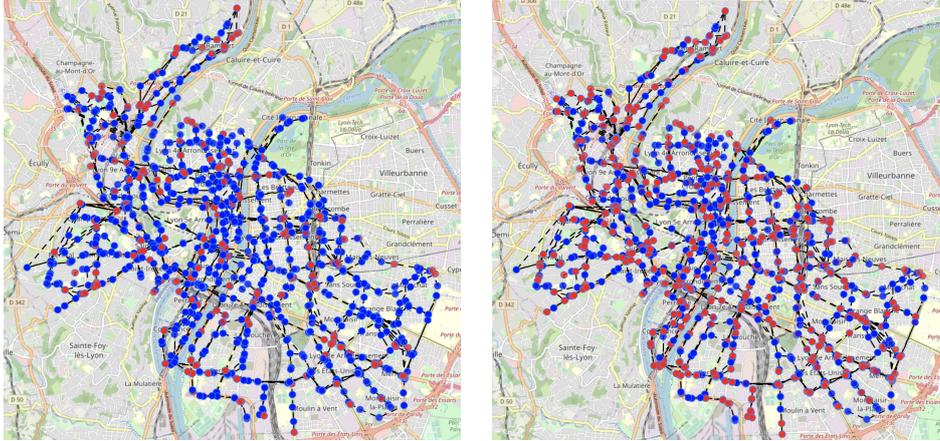


FIG. 1 – Résultats pour deux scénarios avec une réduction du réseau de 10% (à gauche) et de 60% (à droite). Les noeuds supprimés sont en rouge, les autres en bleus

### Références

- [1] L D'ACIERNO et al. "Replanning public transport services in the case of budget reductions". In : *WIT transaction on the Built Environment* 138 (2014), p. 77-88.
- [2] Collectif Transformation Mobilité Ile de FRANCE. *Analyse comparée du trafic francilien et international pendant la crise de la Covid-19*. 2021. URL : <https://collectif-transformation-mobilite-ile-de-france.fr/analyse-comparee-du-traffic-francilien-et-international-pendant-la-crise-de-la-covid-19/>.
- [3] Valérie GUIHAIRE et Jin-Kao HAO. "Transit network design and scheduling : A global review". In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 42.10 (2008), p. 1251-1273.