



# Étude de l'intermodalité pour le délestage des réseaux d'infrastructure

Benjamin Baron, Prométhée Spathis, Hervé Rivano, Marcelo Dias de Amorim

## ► To cite this version:

Benjamin Baron, Prométhée Spathis, Hervé Rivano, Marcelo Dias de Amorim. Étude de l'intermodalité pour le délestage des réseaux d'infrastructure. ALGOTEL 2015 - 17èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, Jun 2015, Beaune, France. hal-01148427

HAL Id: hal-01148427

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01148427>

Submitted on 4 May 2015

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

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

# Étude de l'intermodalité pour le délestage des réseaux d'infrastructure

B. Baron<sup>1</sup>, P. Spathis<sup>1</sup>, H. Rivano<sup>2</sup>, M. Dias de Amorim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIP6/CNRS – UPMC Sorbonne Universités

<sup>2</sup>Inria, Université de Lyon, INSA-Lyon CITI

Nous proposons de tirer parti des déplacements des véhicules des particuliers sur les routes pour permettre aux réseaux d'infrastructure de délester une partie de leur trafic de manière opportuniste. Pour réaliser un tel service, les données sont réparties sur les véhicules équipés de disques durs. La sélection des véhicules se fait en fonction de leur itinéraire et ce afin de répondre aux contraintes qui caractérisent les données à transférer. L'allocation des transferts de données s'avère être un problème complexe pour un réseau routier à très grande l'échelle. Aussi, nous proposons un algorithme de réduction de l'infrastructure routière qui calcule un réseau de recouvrement dont les liens logiques agrègent plusieurs segments de route. Nous formulons alors le problème de l'allocation des transferts de données sous forme d'un modèle de programmation linéaire. Ce modèle définit une stratégie d'allocation des données qui maximise le débit total réalisé par les flots de véhicules impliqués dans ces transferts.

**Keywords :** Offloading, réseaux véhiculaires, big data, programmation linéaire.

## 1 Introduction et motivations

L'*offloading* fait référence aux techniques de délestage mises en œuvre pour repousser les limites en termes de bande passante qui pèsent à l'heure actuelle sur les réseaux d'infrastructure tels que l'Internet [Cis14]. Nous proposons de tirer parti des véhicules des particuliers pour transporter, de manière opportuniste, des données tolérantes aux délais. Les données sont détournées du réseau d'infrastructure et transférées sur les véhicules équipés à cet effet de capacité de stockage. En combinant deux modes de transport, cette technique de délestage s'apparente au transport intermodal de marchandises tel que le ferroutage [FH94]. Les véhicules matérialisent des liens connectant des emplacements spécifiques, appelés *points de délestage*. Les points de délestage se comportent comme des relais d'échange où les véhicules sont amenés à stationner suffisamment longtemps pour recevoir ou entreposer les données (par exemple, des stations de recharge de batterie ou des parkings). Avant d'atteindre leur destination finale, les données sont transportées de proche en proche, en suivant une succession de points de délestage. Les données y sont transférées sur les véhicules dont le trajet coïncide avec le point de délestage suivant.

Dans cet article, nous proposons d'évaluer l'utilisation des véhicules circulant sur le réseau routier comme technique de délestage, comme illustré sur la Figure 1. Les véhicules en circulation sont assimilés aux ressources disponibles dans le réseau routier. Les demandes de délestage provoquent des transferts de données, chacun caractérisé par le délai d'acheminement attendu et la quantité de données à transférer. Le délestage d'un transfert de données depuis le réseau d'infrastructure revient à allouer les ressources du réseau routier selon une politique tenant compte des contraintes exprimées en termes de délai et de débit qui caractérisent ce transfert. La définition d'une politique d'allocation des ressources est un problème NP-complet [KRT99] et les techniques traditionnelles de réduction ne sont pas applicables en raison de la complexité de la topologie routière et du nombre de véhicules circulant sur les routes.

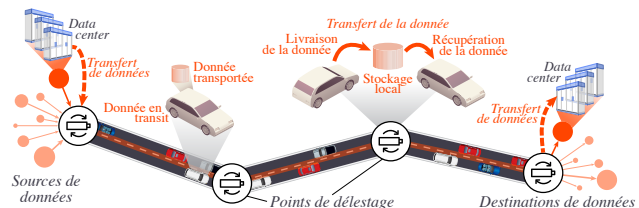


FIGURE 1 : Illustration du service de délestage.

Afin de contourner cette complexité, nous employons une approche en deux phases. D’une part, nous simplifions le réseau routier en construisant un réseau de recouvrement, appelé “réseau de délestage” qui offre une vue logique du réseau routier sous-jacent (Figure 2). En éliminant un grand nombre de routes inutiles, la complexité due à la taille du réseau est mieux maîtrisée. D’autre part, nous proposons une formulation de l’assignation des transferts de données sous forme d’un modèle de programmation linéaire pour déterminer le chemin logique optimal pour le transport des données délestées (Section 2). Enfin, nous évaluons la capacité de notre système de délestage sur l’infrastructure routière française avec des données de trafic routier réelles (Section 3).

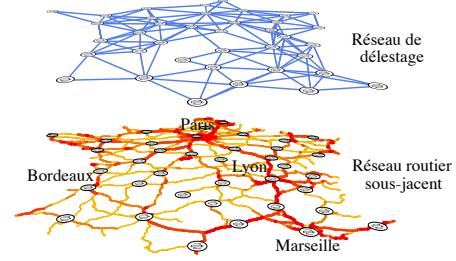


FIGURE 2 : Le réseau routier français (en bas) coloré en fonction du trafic moyen journalier annuel (TMJA) et une représentation du réseau de délestage (en haut).

## 2 Modèle de délestage des données

Nous représentons le réseau routier par un graphe orienté composé de tronçons de routes (les liens) et d’intersections (les noeuds). Les points de délestage sont situés aux intersections ou le long des tronçons.

**Réseau de délestage en surcouche.** Afin de nous affranchir de la complexité du réseau routier, nous proposons un algorithme de réduction du réseau routier. Notre algorithme construit un réseau de recouvrement, appelé *réseau de délestage*, qui offre une vue logique simplifiée du réseau routier sous-jacent. Le réseau de recouvrement est représenté par un graphe orienté noté  $G^O$ , où les noeuds  $N^O$  sont les points de délestage. Les liens logiques  $L^O$  qui connectent les points de délestage résultent de l’agrégation des segments de route du réseau routier  $G^R$  sous-jacent. Un lien logique  $(i, j)$  de  $L^O$  est caractérisé par sa capacité  $c(i, j)$  calculée en fonction du trafic routier, son délai de propagation  $t(i, j)$  qui représente le temps de trajet moyen le long des routes sous-jacentes et par un taux d’erreur  $l(i, j)$ . Le taux d’erreur correspond à la proportion des véhicules n’arrivant pas à destination en raison de pannes ou de changements d’itinéraires non anticipés.

**Demande de délestage.** Une demande de délestage entre deux points de délestage  $s$  et  $t$  est caractérisée par la quantité de données à transférer  $\mathcal{B}^{st}$  et un délai imparti pour transporter ces données  $\mathcal{T}^{st}$ . Les taux d’erreur des liens empruntés sont absorbés pour obtenir des transferts fiables en appliquant les deux méthodes suivantes : (i) encodage des données selon des techniques de suréchantillonnage qui procèdent par ajout de redondance (par exemple, RAID) et (ii) retransmission des données perdues sur un lien logique depuis le point de délestage précédent (par exemple, SR-ARQ [LC04]). Ces deux méthodes augmentent la quantité de données à transporter par un facteur multiplicatif noté respectivement  $w_{\text{red}}^{st}$  pour les techniques de redondance et  $w_{\text{ret}}^{st}$  pour celles basées sur la retransmission des données. L’utilisation de la redondance permet néanmoins de réduire les pertes sur chaque lien logique, dont le taux de perte passe de  $l(i, j)$  à  $l'(i, j)$ . Le nombre de (re)transmissions d’une donnée sur un lien logique  $(i, j)$  est donné par  $R^{st}(i, j) = w_{\text{ret}}^{st}(i, j) = 1 / (1 - l'(i, j))$ .

**Allocations des ressources.** Nous formulons le problème de l’allocation des ressources du réseau routier sous forme d’un modèle de programmation linéaire. L’ensemble des demandes de délestage est noté  $\mathcal{R}$ . Pour une demande de délestage entre  $s$  et  $t$  ( $s, t \in N^O$ ), nous considérons l’ensemble  $\mathcal{P}^{st}$  des chemins logiques reliant  $s$  à  $t$ . Pour  $p \in \mathcal{P}^{st}$ , un flot  $f(p)$  correspond au nombre de véhicules transportant les données sur le chemin  $p$  pendant une période donnée. Les données à délester sont transportées par les véhicules appartenant aux flots  $f(p)$ , à déterminer de façon à maximiser le débit résultant du transport des données sur l’ensemble des chemins  $p \in \mathcal{P}^{st}$  pour toutes les demandes de délestage de  $(s, t) \in \mathcal{R}$  :  $\sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p)$ .

La durée d’un transfert entre  $s$  et  $t$  est bornée par le délai imparti  $\mathcal{T}^{st}$  et s’exprime comme la somme des temps de chargement de  $\mathcal{B}^{st}$  sur les véhicules circulant sur les chemins logiques  $p \in \mathcal{P}^{st}$  et de la moyenne des temps de trajet  $t(p)$  de chacun de ces chemins logiques, pondéré par le flot alloué sur ces chemins :

$$\frac{\mathcal{B}^{st}}{\sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p)} + \frac{\sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p)t(p)}{\sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p)} \leq \mathcal{T}^{st} \iff \sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p)(\mathcal{T}^{st} - t(p)) \geq \mathcal{B}^{st}. \quad (1)$$

Le temps de trajet  $t(p)$  d’un chemin logique  $p$  est exprimé par la somme des temps de trajet  $t(i, j)$  de chaque lien logique  $(i, j)$  composant  $p$  et des temps  $t_i$  nécessaires pour vider ou remplir les mémoires des

véhicules passant par chaque point de délestage  $i$  de  $p$ . Le temps de trajet sur le chemin logique dépend également du nombre de transmissions  $R^{st}(i, j)$  nécessaires sur chaque lien logique pour fiabiliser le transfert des données :  $t(p) = \sum_{(i,j) \in p} [R^{st}(i, j)(t(i, j) + t_i)]$ .

Le débit  $f(p)$  résultant de l'allocation des données aux flots de véhicules d'un chemin logique  $p$  est contraint par la capacité  $c(i, j)$  des liens logiques de  $p$ . La quantité de données allouées inclut également les facteurs  $w_{\text{red}}^{st}$  et  $w_{\text{ret}}^{st}$  issus des mécanismes de redondance et de retransmission, respectivement :

$$\sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} w_{\text{red}}^{st} \sum_{p \in \mathcal{P}^{st} \text{ t.q. } (i,j) \in p} w_{\text{ret}}^{st}(i, j) f(p) \leq c(i, j). \quad (2)$$

L'objectif de notre problème d'allocation des ressources du réseau de délestage est de maximiser le débit total résultant de l'allocation des flots de véhicules pour le transport des données délestées. Notre problème est contraint par la capacité de chaque lien logique et par le temps imparti pour compléter le transfert des données. Pour calculer l'allocation qui satisfait ces contraintes, tout en maintenant une utilisation efficace des ressources, nous résolvons le problème linéaire suivant :

$$\begin{aligned} \text{Maximiser : } & \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p), \text{ sujet à} \\ \forall (i, j), & \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} w_{\text{red}}^{st} \sum_{p \in \mathcal{P}^{st} \text{ t.q. } (i,j) \in p} w_{\text{ret}}^{st}(i, j) f(p) \leq c(i, j) \text{ et } \forall (s, t), \sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p) (\mathcal{T}^{st} - t(p)) \geq \mathcal{B}^{st}. \end{aligned}$$

**Contribution.** En se basant sur le réseau de délestage qui permet réduire la complexité du réseau routier, ce programme linéaire permet d'allouer efficacement les ressources du réseau routier en sélectionnant les chemins logiques optimaux à affecter pour transporter les données délestées. Remarquons que l'on obtient la quantité de données délestées  $\mathcal{B}^{st}$  pendant le délai imparti  $\mathcal{T}^{st}$  au transfert entre  $s$  et  $t$  à partir de la contrainte sur le délai de l'Eq. (1) :  $\mathcal{B}^{st} = \sum_{p \in \mathcal{P}^{st}} f(p) (\mathcal{T}^{st} - t(p))$ .

### 3 Évaluation sur les routes françaises

**Données.** Pour évaluer notre modèle de délestage des données, nous utilisons les données routières de la DTITM (Direction Technique Infrastructures de Transports et Matériaux). Ces données comportent les trafics moyens journaliers annuels (TMJA) de 2011 sur 20 000 km d'autoroutes et routes nationales en France <sup>†</sup>. Les points de délestage de données représentent des stations de chargement pour véhicules électriques. Pour les besoins de cet article, nous avons simulé un plan de déploiement de ces stations sur le territoire français à l'aide d'un algorithme d'allocation de facilités.

**Création du réseau de délestage.** Le réseau de délestage est créé en considérant les stations de chargement précédemment déployées. Les stations voisines sont connectées en sélectionnant un ensemble de routes dans le réseau routier français [AD<sup>+</sup>13]. Les routes sélectionnées coïncident au plus à 80% avec la route la plus courte, tandis que leur distance est au plus 1,5 fois celle de la route la plus courte. Pour estimer le trafic routier sur ces routes, nous utilisons le modèle d'assignement de trafic C-Logit. Ce modèle assigne un poids aux routes connectant les stations voisines situées dans un rayon de 300 km (l'autonomie supposée des véhicules considérés). Finalement, nous utilisons le modèle proposé par Zuylen et Willumsen pour inférer la matrice origine-destination du réseau de délestage [VZW80]. Ce modèle utilise les données routières de la DTITM pour déterminer le volume de trafic entre paires de stations de chargement. Nous choisissons des paramètres volontairement pessimistes : nous supposons uniquement 10% du parc automobile français équipé d'un espace de stockage égal à 1 TB sur chaque véhicule. La Figure 3a montre le nombre de chemins en fonction du temps de trajet. Nous constatons que le réseau de délestage permet de simplifier l'infrastructure routière tout en préservant les propriétés des chemins acceptables avant agrégation.

**Allocation des demandes.** Nous considérons trois demandes *concurrentes* de 10 PB de données chacun : (1) de Paris à Lyon, (2) de Paris à Bordeaux et (3) de Paris à Marseille. Les résultats présentés sont obtenus pour un temps de stationnement aux stations de chargement de 30 minutes (temps de charge des véhicules

<sup>†</sup>. Données de la DGITM/DIT – SETRA – IGN (<http://tinyurl.com/otfbewv>)

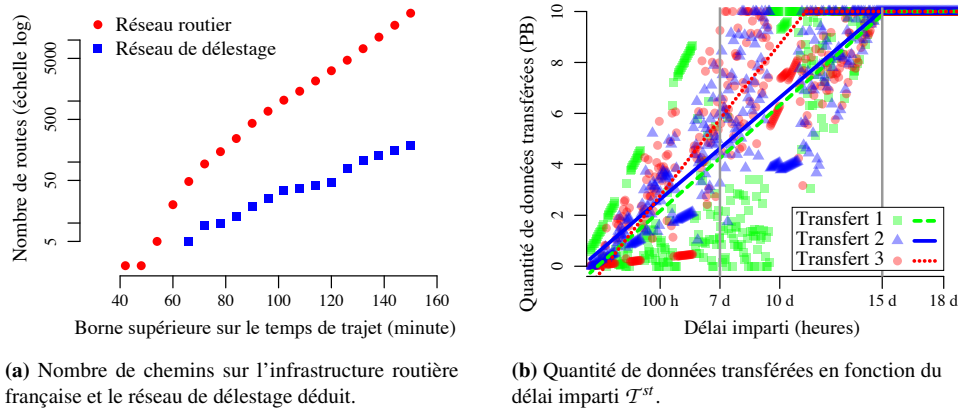


FIGURE 3 : Évaluation sur l'infrastructure routière française

électriques) et le taux de pertes des liens logiques de 30% (un véhicule sur trois, environ, ne transporte pas les données jusqu'à la prochaine station). Les données sont redondées à l'aide de RAID6 et retransmises sur les liens logiques à l'aide de SR-ARQ [LC04]. La Figure 3b représente la quantité de données transférées en fonction du délai imparti  $T^{st}$  (la durée du transfert) vers chacune des trois destinations. Les résultats sont ajustés à l'aide d'un modèle de régression linéaire. Les demandes étant en concurrence, l'augmentation du temps imparti peut faire augmenter la quantité de données transférées pour une demande et faire chuter celles des autres (alors que la quantité totale de données transférée pour les trois demandes de délestage augmente). Nous observons que le transfert 3 parvient à livrer les 10 PB de données en seulement sept jours. Les deux autres transferts 1 et 2 mettent au plus 15 jours pour finaliser la livraison des 10 PB de données. Remarquons que l'allocation des transferts 1 et 2 assure une utilisation comparable des ressources, les transferts n'étant pas en compétition (chemins disjoints) et les tronçons de route vers Lyon et Bordeaux présentant des propriétés similaires. De plus, une quantité plus importante de données est transportée en moyenne pour le compte du transfert 3, comparativement aux autres transferts, les routes ralliant Marseille offrant une plus grande capacité en termes de trafic routier que celles ralliant Lyon.

## 4 Conclusion et perspectives

Nous avons proposé une technique de délestage des réseaux d'infrastructure basée sur l'utilisation opportuniste de véhicules circulant sur le réseau routier. Pour évaluer cette technique, nous commençons par simplifier l'infrastructure routière sous la forme d'un réseau de recouvrement où chaque lien agrège une ou plusieurs des routes sous-jacentes. Nous formulons alors le problème de l'allocation des ressources du réseau de délestage à l'aide d'un programme linéaire contraint par le délai imparti pour compléter les transferts de données et par la capacité offerte par les flots de véhicules. Dans des travaux futurs, nous prendrons en compte la dynamique du trafic routier en capturant les variations diurnes et saisonnières, ainsi que les aspects liés à la sécurité des données et des utilisateurs (confidentialité, respect de la vie privée, consistance).

## Références

- [AD<sup>+</sup>13] Ittai Abraham, Daniel Delling, et al. Alternative routes in road networks. *ACM JEA*, 2013.
- [Cis14] Cisco Visual Networking Index (VNI). Forecast and methodology, 2013-2018, 2014.
- [FH94] Douglas K Fleming and Yehuda Hayuth. Spatial characteristics of transportation hubs : centrality and intermediacy. *Journal of Transport Geography*, 1994.
- [KRT99] Jon Kleinberg, Yuval Rabani, and Éva Tardos. Fairness in routing and load balancing. In *40th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 1999.
- [LC04] Shu Lin and Daniel J Costello. *Error control coding*. Prentice-hall Englewood Cliffs, 2004.
- [VZW80] Henk Van Zuylen and Luis Willumsen. The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B : Methodological*, 1980.