

Modèle de propagation opportuniste pour soulager l'infrastructure 3G

John Whitbeck^{1,2, †}, Jérémie Leguay¹, Vania Conan¹, et Marcelo Dias de Amorim²

¹ Thalès Communications, 160 bd de Valmy, 92704 Colombes

² UPMC Sorbonne Universités, 4 Place Jussieu, 75005 Paris

Nous étudions la diffusion massive de contenus en déplaçant une partie du trafic du réseau d'infrastructure 3G vers un réseau opportuniste sans pour autant sacrifier la fiabilité. Dans ce papier, nous étudions un modèle de propagation de messages dans un réseau opportuniste afin de pouvoir prédire l'évolution de la prochaine propagation et calculer le nombre optimal de copies à injecter dans le réseau au début d'une diffusion.

Keywords: Réseaux opportunistes, processus de Poisson, boucle de contrôle

1 Introduction

En décembre 2009, le trafic de données sur les téléphones mobiles a dépassé, à l'échelle mondiale, celui de la voix, et devrait continuer à doubler annuellement pendant les cinq années à venir [Cis]. Cette charge pèse sur les ressources spectrales limitées des opérateurs, à tel point que plusieurs d'entre eux, américains et européens, ont annoncé la fin des contrats 3G illimités [ZDN].

Comment alléger la charge sur les réseaux d'infrastructure ? Nous proposons d'assister le réseau d'infrastructure (par ex. 3G) en le combinant avec un réseau opportuniste (par ex. Wi-Fi en mode ad hoc) tout en garantissant un taux de livraison des messages de 100% sous de fortes contraintes de délai [WLL⁺]. En particulier, nous avons cherché à minimiser la charge sur l'infrastructure tout en diffusant massivement un contenu, comme des informations de trafic routier ou un podcast d'informations, dans un délai bref et à un grand nombre d'abonnés. L'idée centrale consiste à n'envoyer que *quelques copies* du contenu par l'infrastructure et ensuite de les propager de proche en proche par des communications opportunistes. Des acquittements sont remontés à la source par le réseau d'infrastructure afin que celle-ci puisse suivre la propagation du contenu et décider, le cas échéant, de réinjecter de nouvelles copies afin d'atteindre tous les abonnés avant l'expiration du délai (Figure 1).

Dans un autre papier, nous avons évalué cette solution sur un scénario véhiculaire à grande échelle (plus de 10 000 véhicules) issu de mesures de trafic routier dans la ville de Bologne. Avec pour objectif de diffuser un message de 1 Mo à l'ensemble des véhicules dans la ville en moins d'une minute, on parvient à réduire de plus de 90% la charge sur l'infrastructure même avec des stratégies de réinjections très simples. Par exemple, on peut fixer un objectif linéaire pour le nombre de voitures ayant reçu le message en fonction du temps restant et réinjecter dès que le nombre d'acquittements est inférieur.

Cependant, nos résultats suggèrent qu'il est crucial d'avoir un modèle prédictif de la propagation des messages injectés. De plus, le nombre initial de copies injectées *au début* de la diffusion d'un message semble plus important que les détails de la stratégie de réinjection *pendant* cette diffusion. Dans ce papier, nous étudions donc un modèle de propagation de contenu dans les réseaux ad hoc qui prédit à tout moment le nombre optimal de copies à injecter par l'infrastructure afin d'atteindre tous les participants dans le temps imparti. Nous verrons ensuite comment une estimation en-ligne des paramètres du modèle converge rapidement.

[†]Travaux financés en partie par le projet CROWD (ANR-08-VERS-006).

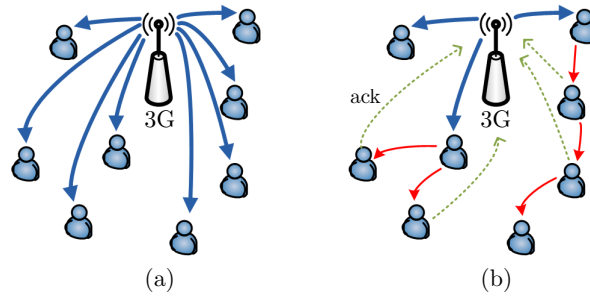


FIGURE 1: (a) Infrastructure seule : la 3G est utilisée pour envoyer une copie individuellement à chaque participant. (b) Système hybride : les communications opportunistes sont utilisées dès que possible et des acquittements sont remontés afin de fermer la boucle de contrôle. La charge sur l'infrastructure est ainsi considérablement réduite.

2 Modélisation

Dans cette partie, nous proposerons d'abord un modèle de diffusion opportuniste d'un message, puis nous montrerons qu'il admet une stratégie de réinjection optimale.

Dans la suite, nous considérerons un réseau mobile ad hoc sans-fil constitué de N nœuds. De plus, chaque nœud est relié à internet via une connexion 3G. Une source derrière l'infrastructure cherche à transmettre, avec un délai maximal D , un message à l'ensemble de ces nœuds. Pour cela, elle envoie une copie du message à un sous-ensemble initial des nœuds. Chaque nœud porteur du message tente ensuite de le diffuser à tous les nœuds qu'il rencontre jusqu'à expiration du message. Dans la suite du papier on parlera de propagation *épidémique*. Un nœud porteur du message est dit *infecté* tandis qu'un nœud ne l'ayant pas encore reçu est dit *sain* [VB00]. À tout moment, l'infrastructure peut choisir de *réinjecter* un certain nombre de copies supplémentaires si elle estime que, vu l'état de la propagation, tous les nœuds ne seront pas infectés avant la fin du délai. Dans tous les cas, juste avant l'expiration du délai, l'infrastructure envoie le message à tous ceux qui ne l'auraient pas encore reçu.

2.1 Approximation d'une épidémie poissonnienne

On considère que chaque paire de nœuds mobiles se *rencontre* selon un processus de Poisson d'intensité λ . Dans le contexte des réseaux opportunistes, une rencontre désigne un instant pendant lequel deux nœuds sont en portée radio. On néglige ici la durée des transmissions sur le lien ad hoc direct. Chaque rencontre constitue donc une opportunité pour transmettre le message.

On étudie la propagation d'une épidémie dans le réseau. Soit $i(t) \in \{1, 2, \dots, N\}$ le nombre de nœuds infectés dans le réseau à l'instant t . $i(t)$ évolue selon un processus de Poisson "non homogène". En effet, lorsque $i(t)$ nœuds sont infectés et $N - i(t)$ sont sains, il y a $i(t) [N - i(t)]$ rencontres qui peuvent accroître $i(t)$ d'une unité. On a donc :

- $Pr[i(t + dt) - i(t) = 1] = \lambda i(t) [N - i(t)] dt + o(dt)$;
- $Pr[i(t + dt) - i(t) > 1] = o(dt)$.

À partir de ce modèle classique, il est possible d'exprimer, connaissant le nombre de nœuds infectés à un instant t , l'espérance du nombre de nœuds infectés à l'expiration du délai. Malheureusement, l'expression obtenue est peu exploitable pour étudier les stratégies de réinjections.

Cependant, Zhang et al. montrent que pour un grand nombre de nœuds N , l'espérance du nombre de nœuds infectés $i(t)$ peut être très bien approximée par la solution de l'équation différentielle $\frac{di}{dt} = \lambda i(t) (N - i(t))$ [ZNK07]. Cette approximation et son pouvoir prédictif ont été validés sur un grand nombre de scénarios épidémiques à base de mobilité aléatoire [ZNK07].

Soit i_0 le nombre de nœuds infectés à $t = 0$. L'espérance du nombre de nœuds infectés à t peut donc être approximée par :

$$E[i(t)|i_0] \simeq \frac{N}{1 + \frac{N-i_0}{i_0} e^{-\lambda N t}} \quad (1)$$

2.2 Réinjections optimales de copies

Définitions. Pour clarifier les formules, on pose $e_t = e^{-N\lambda(D-t)}$. On note $E_D(i, t)$ l'espérance du nombre de nœuds infectés à l'expiration du délai D connaissant $i(t)$. Avec l'équation (1), on a immédiatement :

$$E_D(i, t) = \frac{Ni}{i + (N-i)e_t}. \quad (2)$$

De plus, on définit le gain $G_D^m(i, t)$ espéré en ajoutant m copies dans le réseau sachant que i nœuds sont infectés à t . Avec la formule 2, on a :

$$G_D^m(i, t) = E_D(i+m, t) - E_D(i, t) = \frac{mN^2e_t}{(i + (N-i)e_t)(i+m + (N-i-m)e_t)}. \quad (3)$$

Lors de la réinjection de m copies, le bénéfice espéré est $B_D^m(i, t) = G_D^m(i, t) - m$. En effet, vu que l'on cherche à minimiser la charge sur l'infrastructure, les copies que l'on rajoute constituent un coût. Pour qu'une réinjection soit "rentable", il faut qu'elle conduise à davantage de nouvelles infections par la voie épidémique qu'elle n'a coûté sur l'infrastructure. Ce bénéfice peut être négatif. En effet, on verra qu'au delà d'un certain nombre de nœuds infectés, plus aucune réinjection n'est rentable, et qu'il vaut mieux attendre et compléter juste avant la fin du délai.

On remarque que $G_D^1(i, t)$ est une fonction strictement décroissante de i . Cela correspond à l'idée intuitive que le gain apporté par chaque nouvelle copie est inférieur au gain de la précédente copie. Dans notre cas, cela veut dire que la meilleure stratégie de réinjection consiste à mettre exactement le bon nombre de copies dès la création du message. Par ailleurs, $G_D^m(i, D) = m$, c'est-à-dire que les copies injectés à la toute fin rapportent exactement ce qu'elles ont coûté.

Lemme 1. À l'instant t , le bénéfice maximal est obtenu pour le plus grand m tel que $G_D^1(i+m-1, t) > 1$.

Preuve. Le bénéfice obtenu en ajoutant m copies à l'instant t peut se réécrire :

$$B_D^m(i, t) = G_D^m(i, t) - m = \left(\sum_{l=0}^{m-1} G_D^1(i+l, t) \right) - m = \sum_{l=0}^{m-1} (G_D^1(i+l, t) - 1)$$

$G_D^1(i, t)$ est une fonction décroissante de i , donc la première valeur de l tel que $G_D^1(i+l, t) < 1$ diminue le bénéfice tandis que toutes les précédentes l'ont augmenté. ■

Lemme 2. Si $i \leq \frac{N}{1+e^{\lambda N(D-t)/2}} - 1$, alors $G_D^1(i, t) > 1$; si $i \geq \frac{N}{1+e^{\lambda N(D-t)/2}}$, alors $G_D^1(i, t) < 1$.

Preuve. À partir de la formule (3), le gain peut se réécrire :

$$G_D^1(m, t) = \frac{E_D(i, t) N - E_D(i+1, t)}{i N - i - 1}$$

Comme $E_D(i, t)/i$ et $N - E_D(i, t)/(n-i)$ sont toutes deux des fonctions décroissantes de i , on obtient l'encadrement suivant :

$$\frac{E_D(i+1, t) N - E_D(i+1, t)}{i+1 N - i - 1} < G_D^1(i, t) < \frac{E_D(i, t) N - E_D(i, t)}{i N - i}$$

Supposons un instant que i évolue continûment et considérons le terme de droite. Il s'agit d'une fonction continue et strictement décroissante en i , qui est égale à 1 si et seulement si $i = N - E_D^m(i, t)$. C'est une équation du second degré en i qui a pour unique racine positive $i_+ = \frac{N}{1+e^{\lambda N(D-t)/2}}$. On obtient donc $i \geq i_+ \implies G_D^1(i, t) < 1$. De la même façon, on prouve l'autre moitié du lemme. ■

Enseignements. Si la diffusion épidémique est conforme au modèle poissonnien décrit ci-dessus, alors la meilleure stratégie consiste pour l'infrastructure à injecter initialement $i_{opt}(N, \lambda, D-t) = \left\lceil \frac{N}{1+e^{\lambda N(D-t)/2}} \right\rceil$ copies puis attendre la fin du délai pour compléter. Ceci suppose que λ est connu ou mesurable. Dans la section suivante, nous verrons comment utiliser les résultats de cette section pour diffuser en temps limité un message à des utilisateurs mobiles en minimisant la charge sur l'infrastructure.

3 Estimation en ligne de λ

Avant d'appliquer le modèle sur un cas réel, le scénario véhiculaire de Bologne évoqué dans l'introduction, il est nécessaire de pouvoir estimer les paramètres du modèle. Dans notre cas, D est fixé par le temps de vie d'une minute des messages ; N , le nombre de voitures (jusqu'à 4 494, en moyenne 3 540) varie selon le flux de voitures qui entrent et sortent de la ville ; λ est a priori inconnu. Il est donc nécessaire d'estimer λ en-ligne. Grâce aux acquittements, la source connaît la courbe du taux d'infection du précédent message. Dans ce papier on se contente d'estimer λ en prenant deux points, le taux d'infection initial et l'instant auquel le taux d'infection dépasse 0.5, avec la formule suivante :

$$\tilde{\lambda}N = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{i_2(N - i_1)}{i_1(N - i_2)} \right). \quad (4)$$

La première injection se fait, arbitrairement, avec une unique copie. La figure 2 montre la convergence de l'estimation de λ et ainsi du nombre initial i_{opt} de copies envoyées en fonction du temps. La première estimation de λ varie beaucoup. En effet, le réseau réel n'étant pas aussi symétrique que le modèle, lorsqu'une unique copie est envoyée, le choix du véhicule initial influe significativement sur la vitesse de diffusion du message, et donc sur l'estimation de λ . En revanche, dès que l'on injecte davantage de copies, le comportement devient plus régulier et l'estimation de λ se stabilise. Sur la figure 2, à partir du troisième message, le nombre initial de copies envoyées varie légèrement autour de 7, et l'estimation de λ autour de 0.2.

4 Conclusion

Dans ce papier, nous avons proposé un modèle qui permet d'estimer le nombre optimal de copies à injecter au début d'une diffusion. Ce travail doit être poursuivi dans deux directions. D'une part, pour certains messages, l'évolution du taux d'infection présente un palier dû à l'existence de composantes connexes disjointes, et ne colle donc pas parfaitement au modèle poissonnien ci-dessus. Pour rendre compte de tels paliers, le modèle pourrait être étendu à une propagation sur une distribution de composantes connexes. D'autre part, lorsqu'un palier est détecté, les réinjections en cours de diffusion redeviennent pertinentes.

Références

- [Cis] Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2009-2014. http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html.
- [VB00] Amin Vahdat and David Becker. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical report, Duke University, 2000.
- [WLL⁺] John Whitbeck, Yoann Lopez, Jérémie Leguay, Vania Conan, and Marcelo Dias de Amorim. Relieving the wireless infrastructure : When opportunistic networks meet guaranteed delays. <http://arxiv.org/abs/1007.5459>.
- [ZDN] ZDNet.fr. Forfaits 3g : Orange siffle la fin de l'internet mobile illimité. <http://www.zdnet.fr/actualites/forfaits-3g-orange-siffle-la-fin-de-l-internet-mobile-illimite-39756186.htm>.
- [ZNKT07] Xiaolan Zhang, Giovanni Neglia, Jim Kurose, and Don Towsley. Performance modeling of epidemic routing. *Computer Networks*, 51(10):2867–2891, 2007.

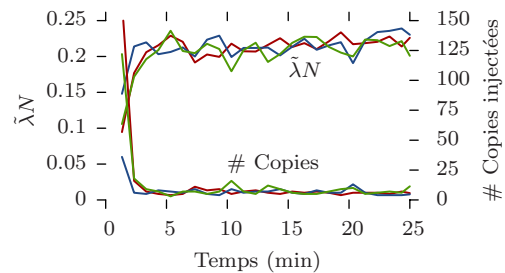


FIGURE 2: Convergence de l'estimation en-ligne de λ et nombre initial de copies injectées dans le réseau en fonction du temps pour trois exécutions.