

---

# Évaluation du modèle évolutif par arête-markovienne pour reproduire la dynamique des réseaux mobiles

Aurélie Faure de Pebeyre, Fabien Tarissan, Julien Sopena

LIP6 – CNRS – Université Pierre et Marie Curie,  
4 place Jussieu  
75005 Paris, France  
prénom.nom@lip6.fr

---

## ABSTRACT.

*RÉSUMÉ. L'avènement des équipements mobiles a amené la communauté scientifique à étudier plus intensément les systèmes d'interactions formés par des entités en mouvement. Dans ce contexte, plusieurs modèles ont été proposés pour tenter de capturer les propriétés dynamiques de tels systèmes. Parmi ceux-ci, le modèle de graphes évolutifs à arêtes markoviennes est attirant en ce qu'il met en avant les dépendances temporelles dans un graphe dynamique. Ce modèle repose sur l'identification de deux paramètres régissant respectivement l'apparition et la disparition des liens dans le graphe et fait donc l'hypothèse que ces deux paramètres sont suffisants pour caractériser cette dynamique sur l'ensemble de la durée de vie du graphe. Dans cet article nous testons la pertinence de cette hypothèse par rapport à 6 jeux de données réelles. Pour se faire, nous avons étudié la fraction de liens créés et supprimés au cours du temps. Les résultats montrent que dans 5 cas sur les 6 étudiés, la répartition de ces fractions est hétérogène, ce qui contredit l'hypothèse faite par le modèle. De plus, nous avons regardé l'impact que le modèle markovien avait sur le degré moyen des nœuds au cours du temps. Il s'avère que même dans le jeu de données favorable au modèle, ce dernier échoue à rendre compte du comportement des réseaux dynamiques de façon satisfaisante.*

*KEYWORDS: mobile networks, evolving graphs, markovian model, simulation*

*MOTS-CLÉS : réseaux mobiles, graphes évolutifs, modèle markovien, simulation*

---

DOI:10.3166/Marami.xx.1-?? © 2013 Lavoisier

## 1. Introduction

L'avènement des équipements mobiles a amené la communauté scientifique à étudier plus intensément les systèmes d'interactions formés par des entités en mouvement. Ces systèmes sont notamment caractérisés par le fait que les liens, définis par la proximité entre les différents éléments mobiles, apparaissent et disparaissent continuellement, rendant ainsi la structure même du système en constante évolution. Un enjeu crucial du domaine consiste alors à tirer parti des propriétés dynamiques de ces systèmes afin de définir des protocoles de communication efficaces et robustes (Boc *et al.*, 2007).

Si des études sur ce sujet ont déjà mis en évidence, certains phénomènes intéressants, comme par exemple les temps de contact et d'inter-contact en loi de puissance (Chaintreau, Hui *et al.*, 2007) ou l'effet accordéon (Tournoux *et al.*, 2009), peu d'entre elles proposent des modèles permettant de capturer les propriétés dynamiques de ces systèmes. Parmi les modèles de graphes évolutifs utilisés par la communauté, celui basé sur une évolution markovienne des arêtes (A. E. Clementi *et al.*, 2008; A. E. F. Clementi *et al.*, 2009) est attirant car il s'appuie sur une dépendance temporelle pour déterminer l'état du graphe à un instant en fonction de son état à l'instant précédent. Ce modèle a servi notamment de support pour conduire des études théoriques des protocoles de diffusions de type *inondation* (Baumann *et al.*, 2009; A. E. Clementi *et al.*, 2010) ou de types *push* (A. Clementi *et al.*, 2013) et mettre en avant leur efficacité.

Cependant très peu d'analyses ont été faites jusqu'à présent pour valider ce modèle au regard de la dynamique observée sur les réseaux mobiles réels. À notre connaissance seuls deux travaux (Vojnovic, Proutiere, 2011; Whitbeck *et al.*, 2011) ont apporté quelques éléments d'analyse. Mais tous deux se positionnent au regard du comportement d'un algorithme particulier de dissémination d'information et ne considèrent pas les caractéristiques intrinsèques des réseaux dynamiques.

Le présent travail entend répondre à cette question encore ouverte en analysant de façon rigoureuse les propriétés de différentes traces de réseaux mobiles et en étudiant l'adéquation du modèle markovien au regard de celles-ci sur une grande variété de jeux de données.

Le reste de cet article est organisé de la manière suivante : la section 2 définit les éléments nécessaires à l'étude présentée ici, la section 3 présente les principaux résultats liée à la confrontation des données réelles vis-à-vis des hypothèses sous-jacentes au modèle markovien tandis que la section 4 étudie plus précisément l'impact que le modèle a sur les propriétés structurelles des réseaux dynamiques. Enfin, la section 5 conclut l'article et ouvre sur des perspectives liées au travail présenté.

## 2. Contexte

Dans cette section, nous présentons plus précisément le modèle de graphes évolutifs par arête-markovienne (section 2.1) ainsi que les jeux de données sur lesquels

nous nous sommes basés pour analyser les propriétés dynamiques des réseaux mobiles et calibrer le modèle (section 2.2).

### 2.1. Modèle markovien

L'intérêt croissant pour les réseaux mobiles et les graphes dynamique a amené récemment la communauté à proposer des modèles pour rendre compte des caractéristiques nouvelles de ces réseaux. La proposition de modèles de graphes évolutifs, dû à Ferreira (Ferreira, 2002), permet de recouvrir une large variété de dynamiques. En effet, dans ce cadre, un graphe dynamique est vu comme une succession de graphes distincts à chaque instant de temps ce qui permet ainsi de se réappropriier l'ensemble des modèles de génération de graphes aléatoires connus en considérant simplement qu'à chaque instant de temps correspond une évolution d'un graphe aléatoire. Bien qu'intéressant pour sa simplicité, ce modèle ne permet pas de rendre compte des propriétés intrinsèques des réseaux dynamiques dont l'état à un instant donné dépend directement de l'état à l'instant précédent.

Plusieurs propositions ont donc tenté de capturer ce phénomène. Ainsi, J. Leskovec et al. (Leskovec *et al.*, 2005), ont basé leur modèle sur des graphes d'accroissement des sommets et des degrés. Cependant cette approche ne permet pas de tenir compte de l'instabilité des liens. Dans leur proposition Chaintreau et al. (Chaintreau, Mtibaa *et al.*, 2007) utilisent des séquences de graphes aléatoires uniformes pour analyser le diamètre des réseaux mobiles opportunistes. Pellegrini et al. (Pellegrini *et al.*, 2007) ont exploré la notion de connectivité temporelle. Malheureusement, aucun de ces modèles n'est parvenu à capter les liens existant entre des graphes de connectivité successifs.

C'est pourquoi A. Clementi et al. (A. E. Clementi *et al.*, 2008; 2010) ont récemment introduit le concept de modèle de graphes évolutifs par arête-markovienne (dénommé par la suite « modèle markovien ») qui permet de mettre en avant une telle dépendance. Dans ce modèle, étant donné un graphe  $G_t$  à un instant donné, la structure du graphe à l'instant suivant  $G_{t+1}$  dépend directement de celle de  $G_t$  et est gouvernée par deux paramètres indépendants : la probabilité  $p$  d'apparition d'une nouvelle arête et la probabilité  $d$  de disparition d'une arête existante.

L'intérêt de ce modèle est double : tout d'abord, il a été montré que quelles que soient les valeurs de  $p$  et  $d$ , et quel que soit le graphe initial  $G_0$ , un graphe évolutif généré par ce modèle convergeait vers un graphe aléatoire de type Erdos-Rényi (Erdos, Rényi, 1960) dont la probabilité d'existence de n'importe quelle arête est  $\hat{p} = \frac{p}{p+d}$ . D'autre part, il a suffisamment peu de paramètres pour permettre de conduire des études formelles rigoureuses, notamment sur l'efficacité de différents protocoles de diffusion, tout en restant basé sur un principe réaliste de dépendance temporelle.

Cependant, la concision de ce modèle est également à l'origine de sa principale faiblesse. Le fait de n'utiliser que deux paramètres pour régir l'apparition et la disparition des arêtes suppose que les valeurs prises par ces paramètres sont représentatives

de l'**ensemble** de l'évolution du graphe au cours du temps. C'est précisément cette hypothèse que nous mettons à l'épreuve dans ce travail.

## 2.2. Jeux de données

Pour tester la pertinence du modèle markovien, nous avons analysé 6 jeux de données qui présentent des réseaux de contacts dynamiques mesurés lors de différentes expériences. Chacune des expériences à l'origine de ces traces mettent en jeu des personnes portant des dispositifs capables de détecter la présence de dispositifs similaires à proximité. La fréquence à laquelle les mesures sont faites varie en fonction de l'expérience de la seconde à la minute.

Nous avons ainsi considéré pour réaliser notre étude :

– **Rollernet (Tournoux *et al.*, 2009)** : Ce jeu de données a été récolté lors d'une randonnée roller à Paris en août 2006. La randonnée dure environ 3H avec une pause de 30 min et couvre environ 30km, la randonnée se déroule dans les rue de Paris ce qui implique des ralentissements et accélérations notamment lors des passages aux feux. Des *iMotes* ont été distribués à 62 participants répartis dans tout le cortège sachant qu'il y avait environ 2500 personnes en roller. Les *iMotes* distribués utilisent la technologie du bluetooth et observent les alentours toutes les 15s.

– **Infocom 05 et Infocom06 (Chaintreau, Hui *et al.*, 2007)** : Ces deux expériences se déroulent lors de conférences Infocom respectivement à Miami et Barcelone. Comme *RollerNet*, elles utilisent la technologie *iMote* avec un scan toutes les 120s. La première (mars 2005) se déroule sur 4 jours avec 41 participants sur environ 800 personnes à la conférence. La deuxième (Avril 2006), compte 98 capteurs, parmi lesquels 78 sont des participants à la conférence, 17 sont statiques et 3 ont été placés dans les ascenseurs.

– **Unimi (Gaito *et al.*, 2009)** : Cette trace a été obtenue, à l'université de Milano, en utilisant des *Pocket Mobile Trace Recorders* (PMTR) placés sur 44 participants. Ces dispositifs envoient un signal toutes les secondes.

– **hypertex09 (SocioPatterns, n.d.)** : Utilise des *radio badges* distribués à 113 participants de la conférence Hypertext (juin 2009). Ces badges ont enregistré les contacts face à face toutes les 20s sur 2,5 jours.

– **Sociopattern (SocioPatterns, n.d.)** : Ce jeu de données a été récolté lors d'une exposition sur la propagation des infections. Il utilise lui aussi des "radio badges" distribués à l'entrée de l'exposition. C'est le seul jeu de données où toutes les personnes présentes sont munies d'un badge. L'expérience a duré 3 mois avec un enregistrement par jour. Le nombre de participants (88 à 410) varie en fonction des jours.

Le tableau 1 ci-dessous récapitule quelques-unes des caractéristiques des jeux de données mentionnés.

L'étude présentée dans cet article s'est basée sur l'ensemble de ces jeux de données, cependant pour des raisons de place nous avons choisi de ne présenter ici que 3 d'entre eux. Notre choix s'est porté sur *RollerNet*, *Infocom06* et *SocioPattern*

Table 1. Caractéristiques des jeux de données utilisés

Jeu de données	RollerNet	Infocom05	Infocom06	HT09	Socio	Unimi
Durée	3 heures	4 jours	4 jours	2,5 jours	1 jour	10 jours
Participants	62	41	98	113	151	44
Contacts	60 146	17 682	148 784	9 865	2 051	11 895
Densités moyennes	$2.2(10^{-2})$	$1.7(10^{-2})$	$1.3(10^{-2})$	$2.6(10^{-4})$	$4(10^{-4})$	$3.9(10^{-3})$
Fréquence (sec.)	15	120	120	20	20	1

car ils sont issus de 3 expériences distinctes et présentent donc des caractéristiques a priori différentes les uns des autres. De plus, la durée de ces expériences est totalement différente, ce qui permet de s'assurer que les conclusions du présent article ne sont pas dépendantes des durées d'expérience. Enfin, les résultats obtenus sur les trois autres jeux de données sont comparables aux trois présentés ici. Plus précisément, les résultats obtenus avec *Infocom05* ressemblent très clairement à ceux présentés avec *Infocom06* et ceux obtenus avec *Unimi* et *HT09* à ceux obtenus avec *SocioPattern*. Le nombre de participants est donc variable selon les jours. Notons enfin que nous ne mentionnerons ici qu'un seul jour correspondant à une activité moyenne (en nombre de participants).

### 3. Analyse de la dynamique

Cette section se concentre sur l'étude de l'évolution de l'apparition et disparition des arêtes au cours du temps dans les différents jeux de données. C'est en effet le principal élément sur lequel repose le modèle markovien qui s'appuie sur une notion d'apparition et disparition moyenne au cours du temps.

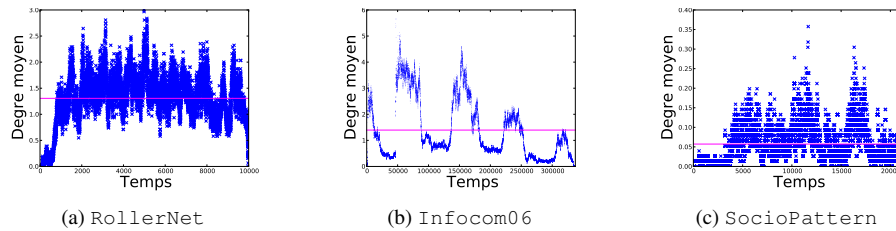


Figure 1. Évolution du degré moyen au cours du temps

Nous avons donc commencé par tracer l'évolution du degré moyen au cours du temps sur les différentes traces. Les résultats, présentés dans la figure 1, montrent que l'ensemble de ces graphes présente une très faible densité, avec un degré moyen de 1.4 pour *RollerNet*, 1.3 pour *Infocom06* et 0.06 pour *SocioPattern*, soit des densités respectives de  $2.2(10^{-2})$ ,  $1.3(10^{-2})$  et  $4(10^{-4})$ . Outre ce faible taux de connexion (particulièrement marqué pour *SocioPattern*), les courbes de la figure 1 montrent une très forte variation du nombre de liens dans les trois expériences. Cependant, si ces variations présentent un comportement "régulier" pour *RollerNet*, ce

n'est pas le cas pour les deux autres traces. Ceci est d'autant plus marqué pour `Infocom06`, où l'on distingue d'une part des périodes de relative stabilité et d'autre part des baisses et des augmentations brutales du degré moyen.

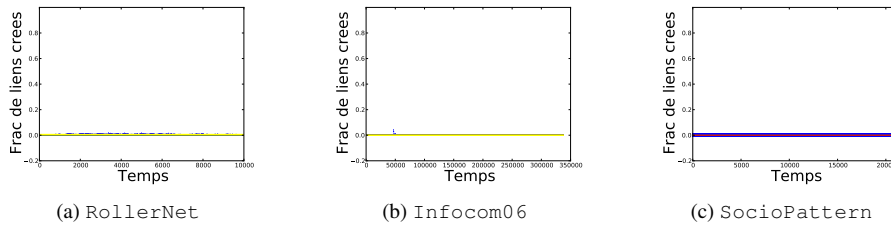


Figure 2. Évolution de la proportion de liens créés avec la moyenne (rose), la médiane (vert) et le 75-centile (jaune).

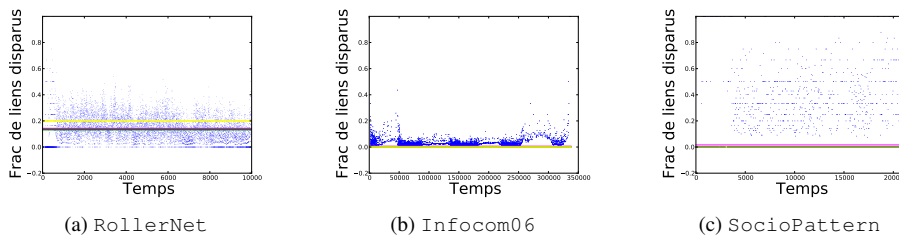


Figure 3. Évolution de la proportion de liens supprimés avec la moyenne (rose), la médiane (vert) et le 75-centile (jaune).

Le modèle Markovien utilisant des valeurs moyennes, nous avons étudié l'influence de ces variations sur les deux paramètres du modèle. Ainsi, nous avons donc calculé, pour chaque instant  $t$  la proportion de liens créés (resp. supprimés) en fonction du nombre de liens inexistant à l'instant  $(t - 1)$ . Les résultats sont présentés dans la figure 2 (resp. figure 3).

En ce qui concerne les liens créés, figure 2, on peut voir que l'intervalle des valeurs prises par celles-ci sur l'ensemble des courbes est assez grand. Ceci est particulièrement vrai pour `Infocom06` (figure 2b) et `SocioPattern` (figure 2c) sur lesquels des événements extrêmes sont clairement observables. Ceci est confirmé par le fait que la moyenne (voir tableau 2), de même que la valeur médiane et le 75-centile sont très proches de 0, indiquant une sur-représentation des faibles valeurs dans ces jeux de données. De ce point de vue, pour l'expérience `RollerNet` la notion de moyenne semble plus pertinente car elle semble effectivement se positionner au centre des valeurs prises au cours du temps.

Le même constat peut être porté sur les liens supprimés, figure 3, mais de façon exacerbée. Pour cette quantité, l'intervalle pris par les valeurs est complet ( $[0..1]$ ) et

Table 2. Valeurs moyennes des fractions de liens créés et supprimés.

Jeu de données	RollerNet	Infocom06	Socio
Fractions de liens créés (moyenne)	$3.2 (10^{-3})$	$9.5 (10^{-5})$	$9 (10^{-6})$
Fractions de liens supprimés (moyenne)	$1.4 (10^{-1})$	$4.5 (10^{-3})$	$1.6 (10^{-2})$

certaines proportions peuvent atteindre la valeur maximale, indiquant que toutes les arêtes présentes ont été supprimées. En étudiant les données réelles, ce comportement se comprend aisément car il correspond souvent à la suppression de l'*unique* arête présente (la proportion est alors égale à 1) du graphe à cet instant, ce qui arrive en général au début et à la fin de l'expérience. Là encore, l'expérience RollerNet (figure 3a) présente un visage plus homogène que les deux autres, ce qui est encore attesté par la valeur moyenne, la médiane et 75-centile.

Il semble donc, au vu de ces courbes, que la caractérisation de la dynamique d'un réseau par deux paramètres constitue une hypothèse pertinente pour RollerNet mais irréaliste pour Infocom06 et SocioPattern car les valeurs considérées ne semblent pas réparties de façon homogène au cours de l'expérience.

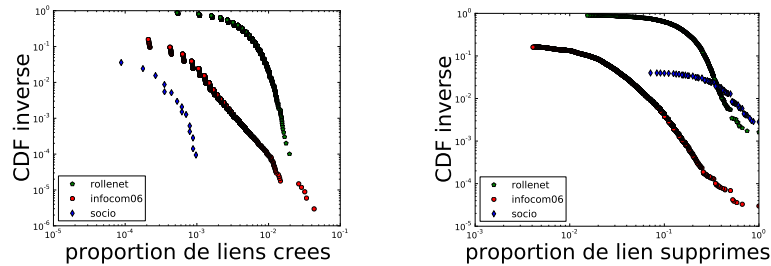


Figure 4. Distribution cumulative inverse des fractions de liens créés et supprimés.

Afin d'étayer cette analyse, la figure 4 présente la distribution cumulative inverse de ces fractions sur chacun des jeux de données. Elle confirme le fait que la valeur des fractions de liens créés (gauche) est hétérogène en ce qui concerne les jeux de données Infocom06 et SocioPattern. La courbe concernant l'expérience Infocom06 fait apparaître assez clairement une loi de puissance sur plusieurs ordres de grandeur. Pour RollerNet en revanche, la distribution cumulative s'incline brutalement autour de la valeur moyenne ( $3.2 \times 10^{-3}$ ) indiquant par là que l'ensemble des valeurs considérées s'étalent effectivement principalement autour de la moyenne. Le même constat peut être porté pour les liens supprimés (figure de droite) quoique de manière moins marquée.

La figure confirme également une observation importante pour les trois jeux de données dans le cas des liens supprimés : il existe un nombre non négligeable de fraction égale à 1. Comme montré précédemment, cette observation s'explique bien par le fait que lorsque peu de liens existent dans le réseau, la valeur de la fraction a tendance à être proche des valeurs extrêmes. Ceci est notamment marquant lorsque seul un lien

existe, la fraction valant alors soit 0 soit 1. Or ce fait semble difficilement compatible avec l'utilisation d'une valeur moyenne par le modèle markovien (cf. tableau 2).

En guise de conclusion intermédiaire, il semble donc que, à défaut de réfuter totalement le bien fondé du modèle de graphes évolutifs par arête-markovienne, l'analyse effectuée dans la présente section amène à relativiser la pertinence de l'hypothèse sous-jacente au modèle. Il semble bien que, comme la plupart des caractéristiques des graphes issus de données réelles, l'aspect dynamique des réseaux mobiles n'échappe pas au fait qu'une variété hétérogène de comportements apparaît quand on considère l'ensemble du graphe (ici, l'ensemble de la durée son évolution).

Afin de comprendre plus finement les répercussions liées à ce résultat, nous étudions à présent l'impact que le modèle markovien a vis-à-vis d'autres caractéristiques du réseau.

#### 4. Impact du modèle markovien sur les propriétés du graphe

Nous étudions dans cette section l'évolution des connexions dans les réseaux mobiles et comparons les propriétés observées sur les données réelles vis-à-vis de celles observées à partir de traces générées par le modèle markovien.

Ainsi, nous avons comparé chacune des traces réelles étudiées, avec son équivalent en modèle Markovien. Pour ce faire, nous avons utilisé les valeurs moyennes des fractions de liens supprimées et détruites présentées dans la section 3 (voir le tableau 2) et généré autant d'état que de log dans les expériences.

##### 4.1. Impact du modèle markovien sur le degré moyen

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'évolution du degré moyen au cours du temps. Ce critère de comparaison a l'avantage d'être très simple (en terme de structure) et relativement proche des paramètres du modèle puisque le degré est directement lié à l'apparition et la disparition des liens. Ceci devrait donc avantager le modèle vis-à-vis de propriétés structurelles plus fines.

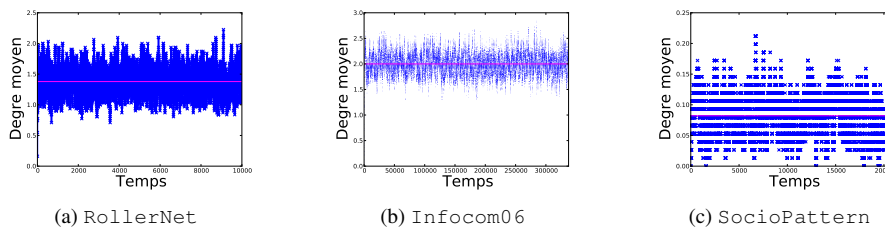


Figure 5. Évolution du degré moyen au cours du temps sur le modèle markovien.



Les résultats obtenus avec le modèle Markovien sont présentés dans la figure 5 et sont à rapprocher de ceux obtenus sur les traces réelles des jeux de données étudiés (figure 1).

Comme prévu, le modèle se montre particulièrement inadéquat pour les jeux de données *Infocom06* et *SocioPattern*. Non seulement les variations observées au cours du temps sur les données sont inexistantes dans les traces issues du modèle, ce qui était attendu étant donné le caractère homogène du modèle, mais, plus important, les événements extrêmes ont disparus. Il est notable que sur ces deux exemples, l'échelle des valeurs prises en ordonnée est modifiée (divisée par 2) entre les données réelles et le modèle.

Dans le cas de l'expérience *RollerNet* en revanche, le modèle reproduit assez bien l'évolution en dents de scie du degré moyen observé sur la trace réelle. Mis à part pour les premiers instants de vie du réseau, qui constituent naturellement une partie biaisée de la dynamique observée, le comportement est assez fidèle.

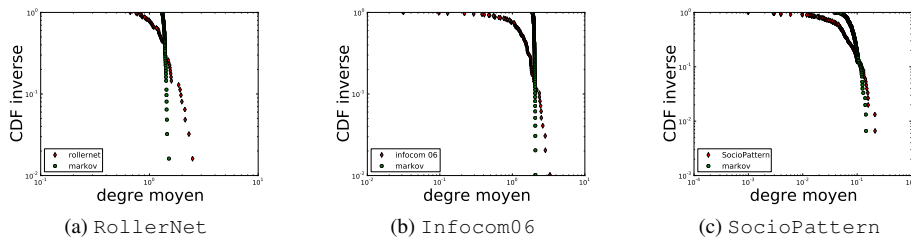


Figure 6. Comparaisons distributions cumulatives du degré moyen.

Enfin, dans le but d'affiner l'analyse précédente, nous présentons figure 7 la distribution cumulative inverse du degré moyen observé à la fois dans les données réelles et dans les traces générées artificiellement. Là encore, la distribution est différente pour les données réelles et le modèle dans le cas de *Infocom06* (milieu) et *SocioPattern* (gauche).

Ce qui est plus surprenant en revanche, c'est que la distribution est également différente dans le cas de *RollerNet*, alors que la comparaison des figures 1a et 5a tendait à montrer que l'approche Markovienne modélisait plutôt cette trace. Ceci montre que même si le caractère homogène des paramètres  $p$  et  $d$  est pertinent au regard d'un réseau mobile particulier, ceci n'implique pas pour autant son adéquation complète pour rendre compte de la dynamique globale du réseau. Si une propriété aussi simple que le degré moyen n'est pas reproduite fidèlement, il est vraisemblable que d'autres propriétés plus fines (et moins directement liées à ces paramètres) seront également mal reproduites.

#### 4.2. Impact du modèle markovien sur la distribution des degrés

On s'intéresse maintenant à la distribution des degrés, i.e. à la probabilité pour qu'un nœud du graphe ait un degré donné. Cette propriété des graphes est particulièrement intéressante et a une énorme influence sur l'efficacité des algorithmes distribués.

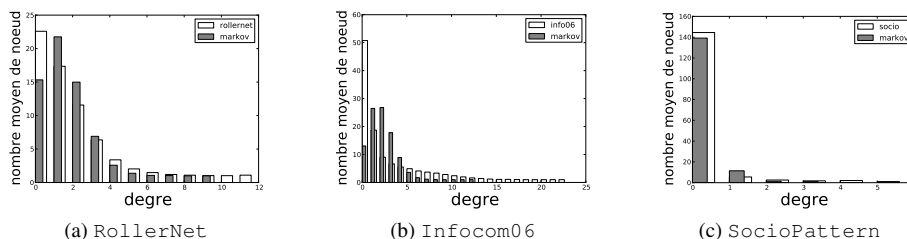


Figure 7. Comparaison des distributions moyenne des degrés.

Les trois histogrammes de la figure 7 présentent une comparaison de la distribution des degrés sur les traces réelles (en blanc) et sur leurs équivalents Markoviens (en gris). Ainsi, on y trouve pour chaque degré  $d$  (en abscisse) le nombre de nœuds étant connectés à exactement  $d$  voisins (ordonnée). Ce nombre est une moyenne sur l'ensemble des graphes d'une trace.

Considérons tout d'abord la distribution des traces réelles (histogramme blanc), on remarque que les graphes correspondant à ces expériences sont libres d'échelle, i.e. que la distribution de leur degré suit une loi de puissance. Ceci est particulièrement marqué pour *Infocom06* (figure 7b) et moins visible pour *SocioPattern* (figure 7c). Dans ce dernier cas, le très faible nombre de connexions (densité de  $4(10^{-4})$ , section 3) explique l'atténuation du phénomène.

Si l'on compare maintenant les résultats des traces réelles (histogramme blanc) avec la distribution obtenue par le modèle Markovien (en gris), on voit que ce dernier n'arrive pas à reproduire la distribution en loi de puissance. Pour comprendre ceci, il faut savoir que le graphe évolutif généré par ce modèle converge vers un graphe aléatoire de type Erdos-Rényi (Erdos, Rényi, 1960). Or la distribution des degrés de ce dernier suit une loi de Poisson (une loi binomiale).

Cette dernière comparaison montre que l'approche Markovienne reproduit assez mal la distribution des degrés observée dans les différentes expériences. Le type de graphes aléatoires générés ne permet pas en effet de reproduire fidèlement cette propriété. Il en sera d'ailleurs de même pour d'autres propriétés classiques des graphes comme l'*attachement préférentiel*, qui pourrait être induit par des déplacements vers des "centres d'intérêts" munis de capteur ou le *coefficient de clustering*, généré par les rayons de portée des dispositifs de connexion.

## 5. Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté un travail qui entendait confronter les hypothèses d'homogénéité faites par le modèle de graphes évolutifs par arête-markovienne vis-à-vis de la dynamique observée sur des données issues de réseaux dynamiques réels. L'étude a montré que dans la plupart des cas (5 cas sur les 6 étudiés), cette hypothèse était invalidée par l'analyse des traces réelles.

Par ailleurs, nous avons montré que même sur le cas `RollerNet` qui mettait en jeu une distribution homogène du paramètre lié au modèle, les traces générées par ce dernier échouait pourtant à reproduire une propriété aussi simple que le degré moyen du réseau au cours du temps. Enfin, l'étude a mis en évidence l'incapacité du modèle à simuler la distribution des degrés observée dans les jeux de données étudiés. Cette limitation, induite par le type de graphes aléatoires générés (Erdos-Rényi), peut d'ailleurs être généralisée à d'autres propriétés comme l'attachement préférentiel ou le coefficient de clustering. L'approche se montre donc incapable de modéliser des propriétés pouvant résulter de contraintes sur la mobilité ou des comportements de déplacement.

Ces résultats négatifs sont cependant à modérer au regard de l'utilisation qui est faite du modèle. Les travaux (Vojnovic, Proutiere, 2011; Whitbeck *et al.*, 2011) ont notamment montré que ce modèle pouvait se révéler adapté pour l'étude des protocoles de diffusion de type inondation. Il n'est donc pas question ici de réfuter l'utilisation de ce modèle mais bien de montrer que la question de sa représentativité en tant que modèle de la dynamique est sujette à caution.

Afin de poursuivre ce travail, il serait intéressant de regarder si une simple adaptation qui prendrait en compte le caractère hétérogène de la distribution de ces fractions ne suffirait pas à améliorer sa représentativité. Par exemple en s'appuyant non pas sur des valeurs  $p$  et  $d$  représentant des valeurs moyennes mais plutôt des paramètres d'une distribution en loi de puissance.

Il serait également intéressant de regarder des propriétés plus fines que la simple évolution du degré moyen. Celui-ci a été choisi ici pour sa proximité avec les paramètres du modèle mais il serait pertinent de regarder également la répartition des connexions qui sont faites dans les réseaux ainsi que les corrélations qui existent entre apparition et disparition des liens au cours du temps. Il est notamment vraisemblable que les périodes d'intenses apparitions d'arêtes soient reliées à des périodes de faibles disparitions de liens (et réciproquement) comme le suggère l'effet accordéon observé sur `RollerNet` (Tournoux *et al.*, 2009).

Par ailleurs, pour aller dans la continuité de l'exploitation qui est faite de ce modèle dans le domaine de la diffusion, il serait particulièrement pertinent de regarder comment des diffusions de type *gossip* (telle la diffusion push étudiée dans (A. Clementi *et al.*, 2013)) se comportent sur les données réelles et sur le modèle markovien. Ceci viendrait peut-être réaffirmer l'intérêt de ce modèle pour la communauté.

## References

- Baumann H., Crescenzi P., Fraigniaud P. (2009). Parsimonious flooding in dynamic graphs. In *Proceedings of the 28th annual acm symposium on principles of distributed computing (podc 2009)*, p. 260-269. ACM.
- Boc M., Fladenmuller A., Amorim M. D. de. (2007). Otiy: locators tracking nodes. In *Proceedings of the acm conext conference (conext '07)*, pp. 14:1–14:12. ACM.
- Chaintreau A., Hui P., Crowcroft J., Diot C., Gass R., Scott J. (2007). Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 6, No. 6, pp. 606–620.
- Chaintreau A., Mtibaa A., Massoulie L., Diot C. (2007). The diameter of opportunistic mobile networks. In *Proceedings of the 2007 acm conext conference*, pp. 12:1–12:12. New York, NY, USA, ACM.
- Clementi A., Crescenzi P., Doerr C., Fraigniaud P., Isopi M., Panconesi A. *et al.* (2013). *Rumor spreading in random evolving graphs*. arXiv preprint arXiv:1302.3828.
- Clementi A. E., Macci C., Monti A., Pasquale F., Silvestri R. (2008). *Flooding time in edge-markovian dynamic graphs*. In *Proceedings of the symposium on principles of distributed computing (podc '08)*, pp. 213–222.
- Clementi A. E., Macci C., Monti A., Pasquale F., Silvestri R. (2010). *Flooding time of edge-markovian evolving graphs*. *SIAM journal on discrete mathematics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1694–1712.
- Clementi A. E. F., Pasquale F., Monti A., Silvestri R. (2009). *Information spreading in stationary markovian evolving graphs*. In *Proceedings of IPDPS'09*, pp. 1–12. IEEE.
- Erdos P., Rényi A. (1960). *On the evolution of random graphs*. *Math. Inst. Hung. Acad. Sci.*, Vol. 5, pp. 17–61.
- Ferreira A. (2002). *On models and algorithms for dynamic communication networks: The case for evolving graphs*. In *AlgoTel'02*, pp. 155–161. INRIA Press.
- Gaito S., Pagani E., Rossi G. P. (2009). *Opportunistic forwarding in workplaces*. In *Acm workshop on online social networks (wosn)*, p. 55-60.
- Leskovec J., Kleinberg J., Faloutsos C. (2005). *Graphs over time: densification laws, shrinking diameters and possible explanations*. In *Proceedings of the international conference on knowledge discovery in data mining*, pp. 177–187. New York, NY, USA, ACM.
- Pellegrini F. D., Miorandi D., Carreras I., Chlamtac I. (2007). *A graph-based model for disconnected ad hoc networks*. In *Proceedings of INFOCOM'07*, p. 373-381. IEEE.
- SocioPatterns*. (n.d.). <http://www.sociopatterns.org/>.
- Tournoux P.-U., Leguay J., Benbadis F., Conan V., De Amorim M. D., Whitbeck J. (2009). *The accordion phenomenon: Analysis, characterization, and impact on dtn routing*. In *Proceedings of INFOCOM'09*, pp. 1116–1124.
- Vojnovic M., Proutiere A. (2011). *Hop limited flooding over dynamic networks*. In *Proceedings of INFOCOM'11*, p. 685-693.
- Whitbeck J., Conan V., Amorim M. D. de. (2011). *Performance of opportunistic epidemic routing on edge-markovian dynamic graphs*. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 59, No. 5, pp. 1259–1263.