HAL
open science

Un modèle d'approximation de diffusion pour la distribution du temps d'acheminement des paquets dans les réseaux de senseurs

Tadeusz Czachórski, Krzysztof Grochla, Ferhan Pekergin

To cite this version:

Tadeusz Czachórski, Krzysztof Grochla, Ferhan Pekergin. Un modèle d'approximation de diffusion pour la distribution du temps d'acheminement des paquets dans les réseaux de senseurs. Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP), Mar 2008, Les Arcs, France. hal-00250258

HAL Id: hal-00250258

https://hal.science/hal-00250258v1

Submitted on 11 Feb 2008

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.

Un modèle d'approximation de diffusion pour la distribution du temps d'acheminement des paquets dans les réseaux de senseurs

Tadeusz Czachórski* — **Krzysztof Grochla*** — **Ferhan Pekergin****

* *IITiS PAN*
44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5, Pologne
{tadek,kgrochla}@iitis.gliwice.pl,
** *LIPN, CNRS UMR 7030*
Université Paris-Nord, 93 430 Villetaneuse, France
pekergin@lipn.univ-paris13.fr

RÉSUMÉ. *Nous proposons un modèle qui s'appuie sur l'approximation de diffusion pour l'estimation de la fonction de densité de probabilité du temps d'acheminement des paquets dans un réseaux de senseurs sans fils à sauts multiples. Dans sa forme générale, le modèle tient compte d'une part de la non homogénéité du milieu de propagation et de la répartition des noeuds intermédiaires dans l'espace et d'autre part, des éventuels changements des caractéristiques du réseau dans le temps. La retransmission des paquets perdus est également pris en compte dans le modèle.*

ABSTRACT. *We propose a model based on diffusion aproximation to estimate the probability density function of the distribution of a packet travel time in a multihop wireless sensor network. In its general form, the model assumes that the propagation medium and the distribution of relay nodes may be nonhomogenous in space and that the system characteristics may change over time. The retransmission in case of the packet loss is also considered in the model.*

MOTS-CLÉS : *approximation de diffusion, analyse transitoire, réseaux sans fils, réseaux de senseurs*

KEYWORDS: *diffusion approximation, transient analysis, wireless networks, sensor networks*

1. Introduction

La prédiction du temps d'acheminement des paquets dans les réseaux de senseurs sans fils demeure un problème ouvert. Un réseau de senseurs [AKY 02] consiste en un large nombre de noeuds de structure simple deployés aléatoirement sur une certaine zone et capable de transférer des paquets de voisins en voisins jusqu'au noeud destinataire qui collecte les données qui lui sont transmises par des liaisons à sauts multiples.

Dans la plupart des cas, la topologie d'un tel réseau ne peut pas être connue avec précision d'autant plus qu'elle risque de changer dans le temps à cause du déplacement des noeuds ou de leur défaillance. Le manque de connaissance sur la topologie est à l'origine de nombreux algorithmes de routage spéciaux proposés pour ces réseaux [HEI 00, ROY 99]. La difficulté de mise en place d'un mécanisme d'adressage global implique par ailleurs que les décisions de routage soient prises sans information complète sur le réseau. Nous considérons le modèle proposé dans [GEL 07, GEL 07] : un réseau sans fils composé de noeuds répartis dans une certaine zone mais sans connaissance sur leur existence, l'emplacement et la fiabilité. A chaque noeud les paquets sont transmis vers un autre estimé plus proche de la destination que celui qui émet. Mais cette transmission peut éloigner le paquet de la destination ou peut le transferer à un autre noeud d'une distance égale, nécessitant le même nombre de sauts jusqu'à la destination [ZOR 03]. Il est également possible qu'un paquet ne soit pas retransmis à un noeud intermédiaire à la suite d'une défaillance de ce dernier ou qu'il soit perdu à cause d'une perturbation (bruit) ou d'un autre phénomène transitoire. Dans ce type de situations, le paquet peut être retransmis après un délai de garde soit par la source, soit par un noeud intermédiaire appartenant au chemin emprunté avant la perte et disposant encore une copie du paquet.

2. Modèle de réseau de senseurs

Récemment Gelenbe a proposé [GEL 06, GEL 07] un modèle basé sur l'approximation de diffusion afin d'estimer le temps moyen d'acheminement d'un paquet d'une source à une destination par une transmission aléatoire à sauts multiples. Dans ce modèle le processus de diffusion représente la distance définie par le nombre (minimal) de sauts que le paquet doit effectuer pour atteindre la destination. La complexité de la topologie et les contraintes de la transmission font que la diminution de cette distance au cours d'un saut n'est plus garantie, ainsi, l'évolution de cette distance dans le temps peut être considérée comme un processus aléatoire. Cette remarque rend possible la caractérisation de cette distance par un processus de diffusion. L'approximation de diffusion est une méthode classique en théorie des files d'attente, utilisée pour représenter la longueur d'une file [GEL 75] ou le temps d'attente [GEL 79] dans le cas des distributions générales et indépendantes des temps d'interarrivées et de service. Le processus de diffusion est un processus stochastique à valeurs continues mais il peut servir d'une représentation approchée pour certains processus à valeurs discrètes

comme le nombre d'entités qui attendent dans une file. Dans le cas du modèle en question, il représente le nombre (minimal) de sauts restant à faire jusqu'à la destination.

Soit $N(t)$ le nombre de sauts restant à faire à l'instant t. On définit le processus de diffusion $X(t)$ tel que la fonction de densité de probabilité associée, $f(x,t;x_0)$, approche la distribution de probabilité $p(n,t;n_0)$ du processus $N(t)$, $N(0) = n_0$, $f(n,t;n_0) \approx p(n,t;n_0)$. La fonction de densité

$$f(x,t;x_0)\,dx = P[x \leq X(t) < x + dx \mid X(0) = x_0]$$

est définie par l'équation de diffusion

$$\frac{\partial f(x,t;x_0)}{\partial t} = \frac{\alpha}{2}\frac{\partial^2 f(x,t;x_0)}{\partial x^2} - \beta\frac{\partial f(x,t;x_0)}{\partial x}\ , \qquad [1]$$

où les paramètres β et α sont respectivement la moyenne et la variance infinitésimales du processus de diffusion. Afin d'établir la correspondance avec le processus $N(t)$, ces paramètres doivent être choisis comme

$$\beta = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{E[N(t+\Delta t) - N(t)]}{\Delta t} \qquad [2]$$

$$\alpha = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{E[(N(t+\Delta t) - N(t))^2] - (E[N(t+\Delta t) - N(t)])^2}{\Delta t} \qquad [3]$$

En général, les paramètres peuvent dépendre du temps et de la valeur du processus, $\beta = \beta(x,t)$ et $\alpha = \alpha(x,t)$, puisque le medium de propagation et la répartition des noeuds relais dans l'espace peuvent être non uniformes et les caractéristiques du système peuvent changer avec le temps. Le modèle proposé tient compte de ces aspects.

Gelenbe en [GEL 07] construit un processus ergodique répétitif évoluant du point initial vers l'origine et considère les propriétés stationnaires de ce processus. Dans ce travail nous obtenons la distribution du temps de transmission (au lieu de sa moyenne) grâce à la solution transitoire de l'équation de diffusion en n'utilisant qu'un seul processus. Rappelons que le processus commence à $x_0 = N$ et se termine à la barrière absorbante située à $x = 0$. La position x du processus correspond à la distance courante mesurée en sauts, entre le paquet et sa destination. On indique les probabilités de reduire le chemin avec π_{-1}, de garder la distance avec π_0, et d'augmenter la distance d'une unité avec π_{+1}. Dans le cas de temps de transmission constant entre deux noeuds, les expressions pour β et α s'obtiennent selon équations (2), (3) à partir de π_{-1}, π_0 et π_{+1} comme :

$$\beta = \frac{\pi_{-1} \times (-1) + \pi_0 \times (0) + \pi_{+1} \times (+1)}{\text{1 unité de temps}} = \pi_{+1} - \pi_{-1},$$

$$\alpha = \frac{\pi_{-1} \times (-1)^2 + \pi_0 \times 0^2 + \pi_{+1}(+1)^2}{\text{1 unité de temps}} - \beta^2 = \pi_{+1} + \pi_{-1} - \beta^2,$$

et vice-versa :

$$\pi_0 = 1 - \alpha - \beta^2, \qquad \pi_{-1} = (\alpha - \beta + \beta^2)/2, \qquad \pi_{+1} = (\alpha + \beta + \beta^2)/2,$$

à condition que α et β satisfassent :

$$0 \leq \alpha \leq 1, \qquad -1 \leq \beta \leq 1, \qquad |\beta| \leq \alpha + \beta^2 \leq 1.$$

On remarque que pour un temps de transmission constant α et β ne peuvent pas avoir une valeur absolue dépassant 1 et α naturellement, ne peut jamais être negatif.

3. Modèle sans délai de garde et sans pertes

Dans ce cas simple nous considérons l'équation de diffusion (1) avec des coefficients constants et une barrière absorbante placée à $x = 0$. La barrière se traduit dans le modèle par la condition limite $\lim_{x\to 0} f(x,t;x_0) = 0$. Le processus commence à x_0, $X(0) = x_0$, et se termine quand il atteint la barrière. Le processus de diffusion est défini dans l'intervalle $(0,\infty)$. Exprimons par $\phi(x,t;x_0)$ la solution de l'équation de diffusion pour ce cas ; elle s'obtient par la méthode de mirroirs [COX 65],

$$\phi(x,t;x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi\alpha t}}\left[e^{-\frac{(x_0-x-|\beta|t)^2}{2\alpha t}} - e^{\frac{2\beta x_0}{\alpha}} e^{-\frac{(2x_0-|\beta|t)^2}{2\alpha t}}\right] .$$

La fonction $\phi(x,t;x_0)$ est illustrée à la figure 1. Elle permet de déterminer la densité $\gamma_{x_0,0}(t)$ de temps du premier passage de $x = x_0$ à $x = 0$ et d'exprimer par l'aide de ceci, la densité du temps de transmission d'un paquet d'une distance de $n = x_0$ sauts à la destination :

$$\gamma_{x_0,0}(t) = \lim_{x\to 0}[\frac{\alpha}{2}\frac{\partial}{\partial x}\phi(x,t;x_0) - \beta\phi(x,t;x_0)] = \frac{x_0}{\sqrt{2\Pi\alpha t^3}} e^{-\frac{(x_0-|\beta|t)^2}{2\alpha t}} .$$

Quelques courbes type pour $\gamma_{x_0,0}(t)$ sont représentées à la figure 2.

4. Introduction du délai de garde au modèle

Soit T le délai à l'expiration duquel un paquet est considéré perdu et retransmis par la source. Connaissant la densité $\gamma_{x_0,0}(t)$ du temps de premier passage de x_0 à 0, on peut déterminer la probabilité p_T qu'un paquet ne soit toujours pas arrivé à sa destination au bout d'une durée T : $p_T = \int_T^\infty \gamma_{x_0,0}(t)dt$, figure 3.

Ainsi, quand le délai de garde expire à l'instant $t = T$, on replace la masse de probabilité p_T à x_0 et on recommence le processus de diffusion en introduisant éventuellement un délai additionnel avant la reprise.

5. Modélisation d'un medium nonhomogène et sujet aux pertes

Afin de reflèter la possibilité de changement des conditions de transmission d'un saut à l'autre, le support du processus de diffusion est divisé en intervalles unitaires,

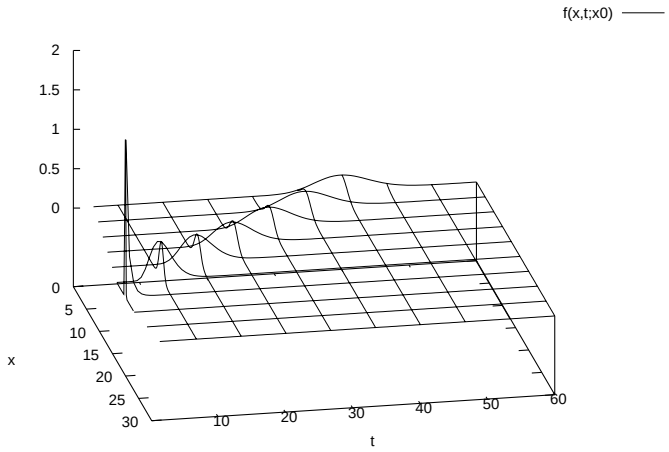

Figure 1. *Fonction de densité* $\phi(x, t; x_0)$ *du processus de diffusion avec une barrière absorbante ;* $x_0 = 20$, $\alpha = 0.1$, $\beta = -0.5$.

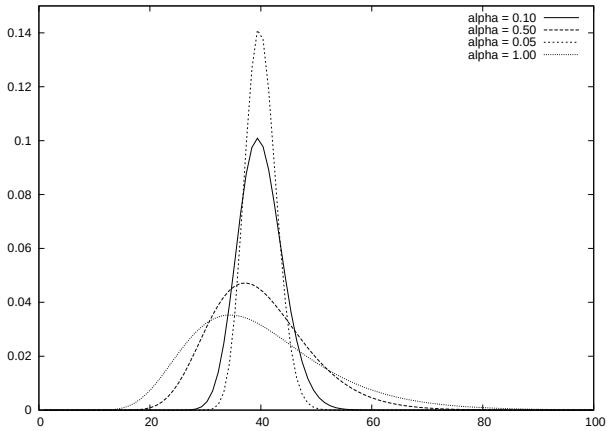

Figure 2. *Distribution du temps de premier passage de* x_0 *à* 0, $\gamma_{x_0,0}(t)$. $x_0 = 20$, $\beta = -0.5$, $\alpha = 0.05, 0.1, 0.5$ *et* 1.0.

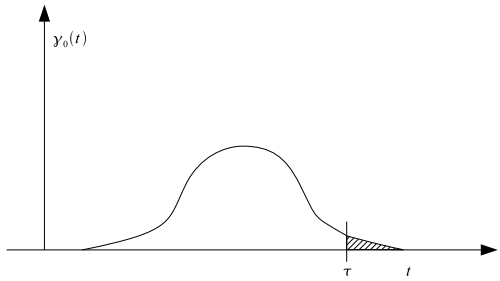

Figure 3. *Probabilité* $p_T = \int_T^\infty \gamma_{x_0,0}(t)dt$ *qu'un paquet ne soit toujours pas arrivé à la destination après la durée* T.

chacun correspondant à un bond. Les sous-intervalles sont séparés par des barrières fictives dans le but d'équilibrer les flux de densité de probabilité qui les traversent. L'intervalle associé à la totalité du processus est limité à une valeur D correspondant à la taille du réseau, $x \in [0, D]$. Le point de départ x_0 est choisi comme un point correspondant à un entier dans cet intervalle. En général $\beta < 0$, puisque normalement le paquet doit s'approcher de la destination à chaque saut, par conséquent la probabilité que le processus accède à l'extrémité droite du support est très faible. Néanmoins, pour éviter toute perte de probabilité, le processus est immédiatement replacé au point situé à la distance $x = D - \varepsilon$ s'il atteint l'extrémité droite du support, et il continue son évolution par cette position.

Un sous-intervalle i, $x \in [i-1, i]$, représente la transmission du paquet par un noeud situé à une distance i de la destination. Nous admettons que les paramètres β_i, α_i peuvent avoir des valeurs différentes pour chaque sous-intervalle, ainsi que l_i exprimant la probabilité de perte au cours du saut correspondant à cet intervalle.

Quand le processus atteint une barrière $i \neq 0, D$, il est instantanément absorbé. Mais, avec la probabilité $(1 - l_i)$ il réapparait immédiatement à l'autre côté de la barrière (transmission sans problème) et avec la probabilité l_i restante, il retourne à la barrière $x = i + 1$ ou $x = i - 1$, correspondant à la reprise de la transmission du paquet par le noeud qu'il a visité en dernier.

Soit $\gamma_i^L(t)$ le flux entrant dans la barrière $x = i$ par le côté gauche et $\gamma_i^R(t)$ le flux entrant à cette barrière par la droite. Ces flux donnent naissance à des processus de diffusion aux deux côtés de la barrière, $\gamma_i^R(t)$ réapparaît à $x = i - \varepsilon$ et $\gamma_i^L(t)$ à $x = i + \varepsilon$, mais les taux de ces flux traversant la barrière sont réduits proportionnellement avec la probablilté qu'une perte survienne pendant le saut précédent. Ainsi, pour l'intervalle i on définie les densités de probabilité $g_{i-1+\varepsilon}(t)$ et $g_{i-\varepsilon}(t)$ que le processus de diffusion recommence à l'instant t respectivement au point $x = i - 1 + \varepsilon$ et $x = i - \varepsilon$:

$$g_{i-1+\varepsilon}(t) \quad = \quad (1 - l_i)\gamma_i^L(t) + l_{i-1}\gamma_{i-1}^R(t)$$

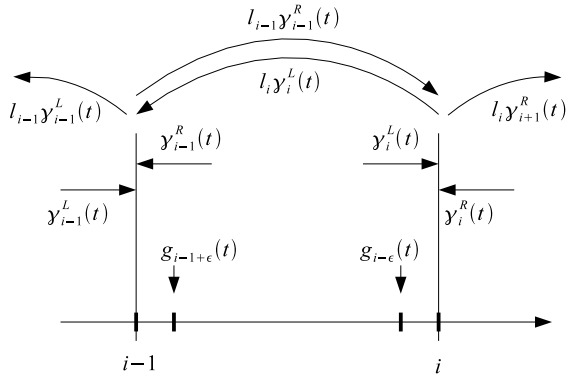

Figure 4. *Le transfert de masse de probabilité dans le cas de paramètres non homogènes de diffusion et des pertes d'un taux l_i au saut i pour $i = 2, \ldots, D-1$*

$$g_{i-\varepsilon}(t) \quad = \quad (1 - l_{i-1})\gamma^R_{i-1}(t) + l_i\gamma^L_i(t)$$

Si nous supposons que le problème survenu pendant la transmission peut être reglé par la reprise de l'émission par le noeud voisin, le flux $\gamma^L_i(t)l_i$ est envoyé à $x = i - 1 + \varepsilon$ et le flux $\gamma^R_i(t)l_i$ à $x = i + 1 - \varepsilon$. Le mouvement de la masse de probabilité pour l'intervalle i représentant un saut à une distance i est illustré à la figure 4.

Si les paquets sont retransmis après un certain délai aléatoire distribué selon la fonction de densité $l(t)$, (pour un délai constant et égal à r, $l(t) = \delta(t-r)$), l'équation précédente s'écrit comme :

$$\begin{aligned} g_{i-1+\varepsilon}(t) &= (1 - l_i)\gamma^L_i(t) + l_{i-1}\gamma^R_{i-1}(t) * l(t) \\ g_{i-\varepsilon}(t) &= (1 - l_{i-1})\gamma^R_{i-1}(t) + l_i\gamma^L_i(t) * l(t) \end{aligned}$$

où, $*$ désigne l'opération de convolution.

Dans chaque sous-intervalle on a un processus de diffusion avec deux barrières absorbantes, situées pour le sous-intervalle i à $x = i - 1$ et $x = i$, et deux points de génération à $x = i - 1 + \varepsilon$ et $x = i - \varepsilon$ où le processus recommence avec les taux respectifs de $g_{i-1+\varepsilon}(t)$ et $g_{i-\varepsilon}(t)$. La densité du processus de diffusion commençant à x_0 dans l'intervalle $(0, N)$ qui a deux barrières absorbantes aux extrémités $x = 0$ et $x = N$ est de la forme suivante, [COX 65]

$$\phi(x,t;x_0) = \begin{cases} \delta(x - x_0), t = 0 \\ \dfrac{1}{\sqrt{2\Pi\alpha t}} \displaystyle\sum_{n=-\infty}^{\infty} \Big\{ \exp\left[\frac{\beta x'_n}{\alpha} - \frac{(x - x_0 - x'_n - \beta t)^2}{2\alpha t}\right] \\ - \exp\left[\frac{\beta x''_n}{\alpha} - \frac{(x - x_0 - x''_n - \beta t)^2}{2\alpha t}\right] \Big\}, t > 0\,, \end{cases}$$

où $x'_n = 2nN$, $x''_n = -2x_0 - x'_n$.

La densité $f_i(x,t;\psi)$ peut être exprimée comme une superposition des fonctions $\phi_i(x,t;x_0)$ dans l'intervalle $(i-1,i)$

$$\begin{aligned} f_i(x,t;\psi_i) &= \phi(x,t;\psi_i) + \int_0^t g_{i-1+\varepsilon}(\tau)\phi(x,t-\tau;i-1+\varepsilon)d\tau \\ &\quad + \int_0^t g_{i-\varepsilon}(\tau)\phi(x,t-\tau;i-\varepsilon)d\tau \ . \end{aligned}$$

où la fonction ψ_i représente la condition initiale. Pour l'intervalle i, les flux $\gamma_{i-1}^L(t)$ et $\gamma_i^R(t)$ s'obtiennent comme

$$\begin{aligned} \gamma_{i-1}^R(t) &= \lim_{x\to(i-1)} [\frac{\alpha_i}{2}\frac{\partial f_i(x,t;\psi_i)}{\partial x} - \beta_i f_i(x,t;\psi_i)] \\ \gamma_i^L(t) &= -\lim_{x\to(i)} [\frac{\alpha_i}{2}\frac{\partial f_i(x,t;\psi_i)}{\partial x} - \beta_i f_i(x,t;\psi_i)] \end{aligned}$$

La solution du système correspondant à l'ensemble des équations ci-dessus est plus facile à obtenir en utilisant leurs transformées de Laplace. Par exemple, en posant $A(s)=\sqrt{\beta^2+2\alpha s}$, la transformée de Laplace de la fonction $\phi(x,t;x_0)$ est

$$\begin{aligned} \bar{\phi}(x,s;x_0) &= \frac{\exp[\frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}]}{A(s)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{|x-x_0-x_n'|}{\alpha}A(s)\right] \right. \\ &\quad \left. - \exp\left[-\frac{|x-x_0-x_n''|}{\alpha}A(s)\right] \right\} . \end{aligned}$$

Dans ce cas, toutes les convolutions deviennent des produits des transformées et ainsi la solution $f_i(x,t;\psi_i)$ est obtenue par l'inversion de sa transformée de Laplace $\bar{f}_i(x,s;\psi_i)$.

Pour l'inversion nous utilisons un algorithme simple, l'algorithme de Stehfest, qui donne la valeur d'une fonction $f(t)$ à partir de sa transformée $\bar{f}(s)$ pour chaque valeur fixe de l'argument t, par l'expression :

$$f(t) = \frac{\ln 2}{2}\sum_{i=1}^{N} V_i\, \bar{f}\left(\frac{\ln 2}{t} i\right) \ ,$$

où

$$V_i = (-1)^{H/2+i} \times \sum_{k=\lfloor \frac{i+1}{2} \rfloor}^{\min(i,H/2)} \frac{k^{H/2+1}(2k)!}{(H/2-k)!k!(k-1)!(i-k)!(2k-i)!}.$$

Ici H est un entier pair dépendant de la précision de l'ordinateur ; nous avons pris $H=14$ dans nos calculs.

Nous montrons dans les figures 5 et 6 la probabilité $p(0,t)=\int_0^t \gamma_{x_0,0}(\tau)\,d\tau$ que le processus soit fini (donc la transmision terminée) avant temps t pour les différents

valeurs de paramètres α et β. A la Fig. 5, le paramètre α est maintenu constant et β est varié de -0.2 à -0.8. Comme il est attendu, avec β de plus en plus négatif (routage plus directif vers la destination), le temps d'acheminement diminue considérablement. Il est à noter que, grâce à la supposition de *réseau fermé d'une taille finie*, la distribution du temps d'acheminement existe non seulement pour $\beta = 0$, mais aussi pour les valeurs positive de ce paramètre. En revanche, la courbe pour $\beta = -0.2$ montre clairement que pour $\beta \geq 0$, le temps d'acheminement risque de prendre des valeurs inacceptables. La figure 6 montre que pour un même de diminution de la distance vers la destination, une variabilité plus importante favorise le raccourcissement du temps d'acheminement. En gardant la même vitesse moyenne $\beta = \pi_{+1} - \pi_{-1}$, plus la probabilité π_{-1} de choisir une bonne direction est élevée, plus le temps d'acheminement raccourcit en moyenne malgré l'augmentation de la probabilité des mauvais choix. Ce résultat justifie l'utilisation des routages aléatoires dans les réseaux de senseurs.

Figure 7 présente la densité $f(x, t; x_0)$ de la distance restante à parcourir au paquet aux instants $t = 10, 20$ et 30 pour un réseau caractérisé avec les paramètres $\beta = -0.4$ et $\alpha = 0.54$. Le paquet etait initialement à une distance de $x_0 = 10$ de la destination. Figure 8 nous montre la densité $\gamma_{x_0,0}(t)$ du temps du premier passage entre x_0 et $x = 0$, donc l'approximation du temps de transmission entre le point du départ et la destination. Les valeurs choisies dans cet exemple sont :

$$\begin{aligned}
\beta = -0,4, \alpha = 0.54 \quad &\longrightarrow \quad (\pi_{-1}, \pi_0, \pi_{+1}) = (0.55, 0.3, 0, 15), \\
\beta = -0.2, \alpha = 0.54 \quad &\longrightarrow \quad (\pi_{-1}, \pi_0, \pi_{+1}) = (0.4, 0.4, 0, 2), \\
\beta = -0.3, \alpha = 0.81 \quad &\longrightarrow \quad (\pi_{-1}, \pi_0, \pi_{+1}) = (0.6, 0.1, 0, 3).
\end{aligned}$$

Figure 9 montre l'influence du taux de pertes l ($l = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) sur les densités du temps d'acheminement de paquet pour le réseau de paramètres $\beta = -0.4$ et $\alpha = 0.54$. Cette sensibilité du temps d'acheminement aux pertes est due à l'assimilation des cas de pertes et de reprise qui les succèdent, aux transmissions vers des noeuds de même distance de la destination que l'émetteur. Par conséquent, conformément à l'effet de la variabilié sur le temps d'acheminement (figure 6), la probabilité de pertes qui s'ajoute à la probabilité π_0, augmente considérablement le temps total de transmission.

6. Conclusion

Grâce à l'analyse des états transitoires, le modèle proposé dans ce travail permet de prendre en compte plus de paramètres (paramétres dépendants du temps et de la position des noeuds, taux de pertes différents pour les sauts) concernant le temps d'acheminement dans les réseaux de senseurs, que les modèles existants, y compris ceux qui s'appuient sur l'approximation de diffusion. Les résultats que l'on obtient sont également plus détaillés : le temps d'acheminement est caractérisé par sa fonction de densité au lieu de sa valeur moyenne.

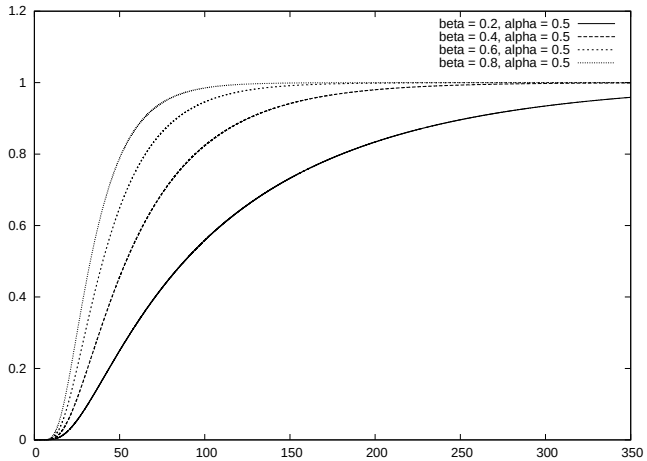

Figure 5. *Probabilité* $p(0,t)$ *pour le point initial* $x_0 = 10$*, l'intervalle de diffusion* $x \in [0,20]$*,* $\alpha = 0.5$*,* β *variable* $(\beta = -0.2, -0.4, -0.6, -0.8)$

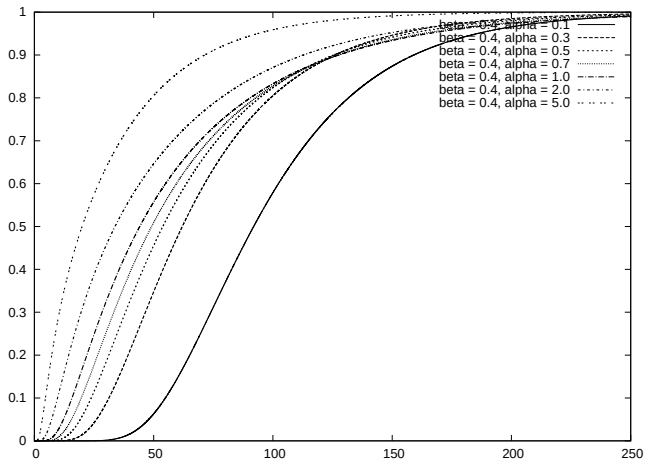

Figure 6. *Probabilité* $p(0,t)$ *pour le point initial* $x_0 = 10$*, l'intervalle de diffusion* $x \in [0,20]$*,* $\beta = -0.4$*,* α *variable* $(\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2, 5)$

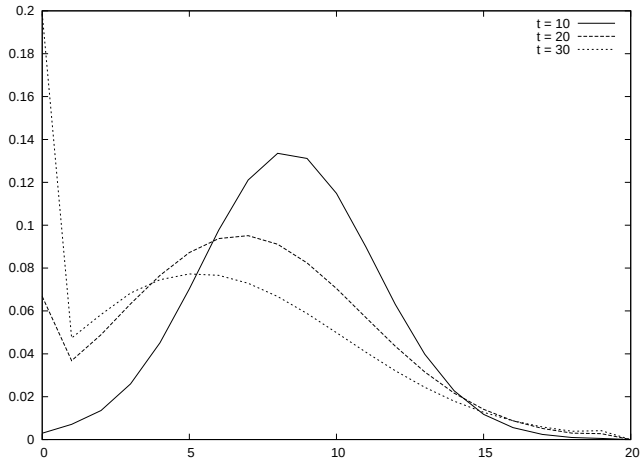

Figure 7. *La densité $f(x, t; x_0)$ de la distance restante à parcourir au paquet aux instants $t = 10, 20$ et 30 pour un réseau caractérisé avec les paramètres $\beta = -0.4$ et $\alpha = 0.54$. Le paquet initialement etait à une distance de $x_0 = 10$ de la destination.*

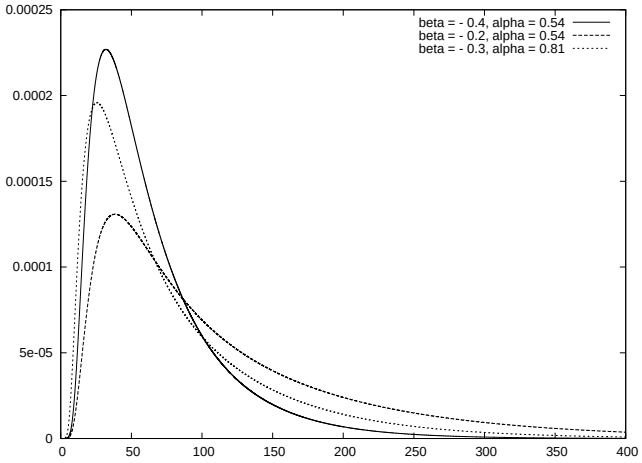

Figure 8. *La densité $\gamma_{x_0,0}(t)$ du temps du premier passage entre x_0 et $x = 0$, qui est l'approximation du temps de transmission entre le point du départ et la destination. Le paquet initialement etait à une distance de $x_0 = 10$ de la destination.*

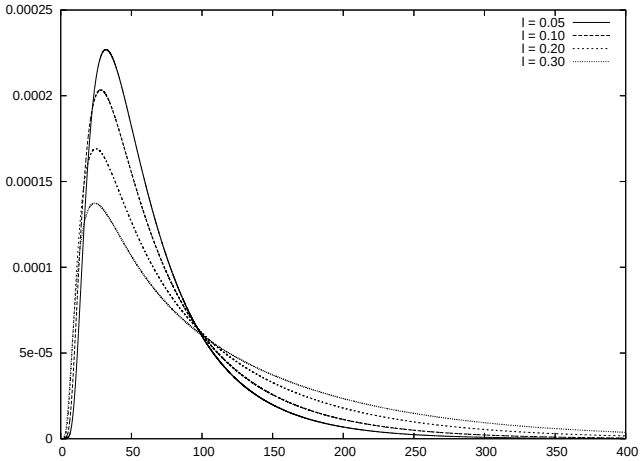

Figure 9. *L'influence de taux de pertes* l $(l = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3)$ *sur les densités du temps d'acheminement de paquet pour le réseau de paramètres* $\beta = -0.4$ *et* $\alpha = 0.54$. *Le paquet initialement etait à une distance de* $x_0 = 10$ *de la destination.*

7. Bibliographie

[AKY 02] AKYILDIZ I. F., SU W., SANKARASUBRAMANIAM Y., ÇAYIRCI E., «A survey on sensor networks», *IEEE Commun. Mag.* vol. 40, n° 8, p. 102-114, 2002.

[COX 65] COX R. P., MILLER H. D., *The Theory of Stochastic Processes*, Chapman and Hall, London 1965.

[GEL 75] GELENBE E., «On Approximate Computer Systems Models», *J. ACM*, vol. 22, n° 2, 1975.

[GEL 79] GELENBE E., «Diffusion approximations : waiting times and batch arrival», *Acta Informatica* vol. 12, p. 285-303, (1979).

[GEL 06] GELENBE E., «Travel delay in a large wireless ad hoc network», 2nd Workshop on Spatial Stochastic Models of Wireless Networks (SPASWIN), Boston, 7th April 2006.

[GEL 07] GELENBE E., «A Diffusion Model for Packet Travel time in a Random Multihop Medium», *ACM Trans. on Sensor Networks*, vol. 3, n° 2, Article 10, June 2007.

[HEI 00] HEINZELMAN W. R., CANDRAKASAN A., BALAKRISHNAN H., «Energy-efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks», *Proc. Hawaaian International Conf. on Systems Science*, January 2000.

[ROY 99] ROYER E., TOH, C., «A review of current routing protocols for ad-hoc mobile wireless networks"» *IEEE Personal Commun.* vol. 6, n°2, p. 46-55, 1999.

[ZOR 03] ZORZI M., RAO R., «Geographic random forwarding (GERAF) for ad hoc and sensor networks : Multihop performance», *IEEE Trans. Mobile Comput.* vol. 2, n° 4, 337-348, 2003.