Modélisation et évaluation des protocoles du multicast fiable dans le contexte des réseaux actifs

Moufida Maimour, Cong-Duc Pham

RÉSUMÉ. *Les protocoles qui assurent la fiabilité aux applications du multicast ont récemment occupé le devant de la scène avec la contribution des services actifs qui permettent des nouvelles fonctions au niveau des routeurs. Contribuant principalement aux problèmes d'explosion des messages de contrôle, la limitation de la portée des retransmissions et le cache des données, ces protocoles ouvrent de nouvelles perspectives pour atteindre un grand débit et une faible latence dans les WANs. Dans cet article, nous proposons des modèles génériques pour des protocoles de multicast dans le contexte des réseaux actifs et une analyse de débit. Des comparaisons entre les différents mécanismes proposés dans les protocoles existants, i.e. ARM et AER sont faites. Quelques résultats sur le dimensionnement des réseaux actifs sont également proposés.*

ABSTRACT. *Reliable multicast protocols have recently been put in front of the scene with active services contribution where routers implement additional functionalities. Contributing mainly to feedback implosion problems, retransmission scoping and cache of data, these active protocols open new perspectives for achieving high throughput and low latency on wide-area networks. In this paper, we propose generic models of multicast protocols in an active networking environment and a throughput analysis. Comparisons between several mechanisms proposed in existing protocols, i.e. ARM and AER, are performed. Some insight on dimensioning active networks is also provided.*

MOTS-CLÉS : *Multicast IP, Multicast fiable, réseaux actifs, modélisation, évaluation des performances.*

KEYWORDS: *IP multicast, reliable multicast, active networks, modeling, performances evaluation.*

1. Introduction

Le *multicast* est un mécanisme de communication multipoint qui permet la transmission d'un paquet d'une source à un sous-ensemble des hôtes d'un réseau. Le multicast IP [DC90] fournit au niveau réseau un support efficace pour un grand nombre d'applications: dissémination de données, simulation interactive distribuée, vidéoconférence et applications coopératives. Certaines de ces applications, en plus de l'efficacité du routage, nécessitent une grande fiabilité dans la délivrance des données.

Le problème de la fiabilité en multicast est un problème très ardu. Différentes approches peuvent être proposées mais la difficulté persiste. Afin de faire le recouvrement des pertes, les premiers protocoles ne font intervenir que la source et les récepteurs. Ils adoptent alors une approche de bout en bout [SDW92], [FJL95], [PS97], [YGS95]. Les protocoles les plus récents font contribuer les routeurs de l'arbre de multicast dans le processus de recouvrement [KBK+00], [LGT98].

Les approches de bout en bout ne fournissent malheureusement pas une solution exacte à tous les problèmes inhérents au processus de recouvrement de pertes, on peut citer:

- l'explosion des NAKs,
- la duplication des retransmissions,
- la portée des NAKs et des retransmissions,
- l'adaptabilité aux changements dynamiques de la topologie du groupe de multicast.

La cause principale est le manque d'information sur la topologie au niveau des nœuds terminaux (la source et les récepteurs). La contribution des routeurs où réside cette information dans le processus de recouvrement permet de trouver des solutions plus efficaces aux problèmes cités. Il s'agit tout simplement d'adopter un arbre de contrôle identique ou très proche de l'arbre physique du multicast où les routeurs peuvent jouer un rôle plus complexe dans le processus de recouvrement.

Cette idée est déployée soit en implémentant des services simples au niveau des routeurs en plus de leur fonction principale de routage, soit en utilisant les possibilités des réseaux actifs [TSS+97]. Ces derniers constituent une nouvelle approche réseau où les routeurs peuvent faire des traitements plus adaptés aux applications sur les paquets qui les traversent. Les services actifs peuvent consister principalement en:

- Le *cache* des paquets de données pour permettre le recouvrement local et diminuer ainsi considérablement le délai de recouvrement.

- L'aggrégation et/ou la suppression locale des NAKs, et donc tenter de résoudre le problème d'explosion des NAKs.

- La retransmission des paquets perdus en multicast partiel (*subcast* : retransmission juste aux récepteurs ayant subi une perte). Ceci a l'avantage de limiter la portée des retransmissions et par conséquent la consommation en termes de bande passante.

ARM (Active Reliable Multicast) [LGT98] et AER (Active Error Recovery) [KBK+00] sont deux protocoles qui utilisent des services actifs dans des emplacements stratégiques. Le service principal consiste en un cache *best-effort* des paquets de données pour des éventuelles retransmissions locales. Cependant, chacun d'eux adopte une stratégie différente pour résoudre le problème d'explosion des NAKs.

Pour évaluer les performances de ces différentes stratégies, nous avons dérivé trois protocoles génériques. Tous les trois bénéficient du cache des paquets de données au niveau des routeurs actifs. Cependant, chacun d'eux adopte une stratégie différente pour la suppression des NAKs qui peut être combinée ou non avec le multicast partiel. Une évaluation analytique de ces protocoles qui utilise le temps de traitement dans les différents composants pour en tirer les débits maximum est proposée. Cette modélisation analytique est simple mais permet assez facilement l'obtention de bornes.

L'article est organisé comme suit. Tout d'abord les trois protocoles sont décrits dans la section 2. Nous présentons ensuite un modèle pour le réseau et les pertes dans la section 3. Ce modèle va nous servir à évaluer et comparer les trois protocoles dérivés. Ensuite les résultats obtenus sont discutés avant de conclure l'article.

2. Description des protocoles génériques

L'objet de ce paragraphe est la description des trois protocoles génériques que nous notons S1, S2 et S3. Nous désignerons par *groupe local*, dans une configuration active, l'ensemble des récepteurs reliés au même routeur actif (on considère le plus proche s'il y en a plus d'un). Un paquet en retransmission, afin de le distinguer du paquet original, sera désigné par le terme "*repair*".

Nous supposons qu'un NAK envoyé par unicast suit le chemin inverse du multicast. Cette supposition est primordiale pour pouvoir bénéficier des services actifs pour le multicast fiable. Cela peut être réalisé en implémentant un service de routage spécifique aux NAKs. Une autre approche consiste en l'utilisation d'un mécanisme qui permet à un récepteur de connaître l'identité du routeur actif auquel il est relié [KBK+00]. Nous supposons donc que l'une ou l'autre des approches est utilisée.

Nous dirons enfin qu'un NAK est *non valide* s'il est reçu par un routeur actif ou par l'emetteur, alors que celui-ci vient de traiter un NAK similaire par la retransmission appropriée. Afin d'éviter les traitements inutiles des NAKs non valides, la source et les routeurs actifs ignorent les NAKs pendant une durée de temps déterminée et ce à partir du premier traitement d'un NAK similaire. Pour notre analyse, nous supposons que le délai d'ignorance des NAKs est bien choisi, de telle sorte qu'un NAK reçu pour un paquet dont une retransmission est en cours, ne provoquera pas de nouvelles retransmissions du même paquet.

2.1. Protocole générique S1

Le protocole générique S1 est un protocole de recouvrement des pertes, qui bénéficie du cache best effort des paquets de données avec une suppression globale des NAKs. Un récepteur détectant une perte envoie immédiatement un NAK à la source. Un routeur actif est chargé de fusionner en un seul NAK l'ensemble des NAKs qu'il reçoit pour le même paquet. S1 possède les propriétés suivantes:

- La source envoie le paquet de données à l'adresse de multicast souscrite par tous les récepteurs.

- Sur réception d'un paquet de données un routeur actif stocke le paquet dans son cache s'il le peut et le transmet ensuite dans l'arbre de multicast.

- Lorsqu'un récepteur détecte la perte d'un paquet, il transmet **immédiatement** un NAK vers la source et initialise un délai de garde (DG).

- Sur réception d'un NAK, un routeur actif retransmet le paquet correspondant à tous les récepteurs de son groupe local s'il le possède.

- Sur réception d'un NAK, la source envoie le paquet correspondant à tous les récepteurs (sur l'adresse de multicast).

2.2. Protocole générique S2

Le protocole générique S2, en plus du cache des paquets de données, bénéficie d'un service de suppression *locale* des NAKs. Les récepteurs attendent pendant une durée aléatoire avant de transmettre un NAK à la source. Le but est de générer un seul NAK par groupe de récepteurs reliés au même routeur actif dans l'arbre du multicast. S2 est similaire à L1 [KKT98] (qui est une version générique de AER: *Active Error Recovery*). Ils adoptent tous les deux une stratégie de suppression locale. Néanmoins, S2 fait cette suppression uniquement entre les récepteurs (feuilles de l'arbre de multicast) reliés au même routeur actif, alors que L1 la fait également entre les nœuds intermédiares de même niveau dans l'arbre du multicast. S2 possède les propriétés suivantes:

- La source envoie les paquets de données à l'adresse du multicast.

- Sur réception d'un paquet de données, un routeur actif stocke le paquet dans son cache s'il le peut et le transmet ensuite dans l'arbre du multicast.

- lorsqu'un récepteur détecte la perte d'un paquet, il entame une période d'attente de durée aléatoire. Ensuite il envoie un NAK vers la source et initialise un DG pour une éventuelle requête.

- lorsqu'un récepteur est en attente de transmettre un NAK pour un paquet perdu et qu'il reçoit un NAK pour le même paquet de son routeur actif, il annule son NAK et initialise un DG pour se comporter comme s'il avait envoyé ce NAK. Si par contre il reçoit le paquet en question, alors il quitte le processus de recouvrement.

- Sur réception d'un NAK d'un récepteur qui lui est relié, un routeur actif envoie le paquet requis à tous les récepteurs de son groupe local s'il l'a dans son cache. Sinon il envoie ce NAK à la source et aux récepteurs de son groupe local, sauf sur le lien d'où provient ce NAK. Le but envisagé étant la suppression locale des NAKs.

- Sur réception d'un NAK, la source envoie le repair à l'adresse de multicast.

- Sur réception d'un repair, le routeur actif le transmet à tous les récepteurs de son groupe local.

2.3. Protocole générique S3

S3 est une version générique de ARM (*Active Reliable Multicast*), et consiste en une amélioration de S1 où on bénéficie d'un service de multicast partiel. La différence entre S1 et S3 se résume dans les points suivants:

- Sur réception d'un NAK, un routeur actif retransmet le paquet correspondant, s'il le possède, sur le lien d'où provient ce NAK. Sinon il inscrit ce lien dans une liste de retransmission ultérieure du repair. Ensuite il transmet le NAK vers la source.

- Sur réception d'un repair, un routeur actif qui dispose de la liste de retransmission envoie le repair uniquement aux récepteurs ayant subi la perte du paquet correspondant. Un routeur actif qui ne dispose pas de cette liste stocke le repair s'il le peut dans son cache. Sinon il le retransmet à tous les récepteurs du groupe local. On suppose pour notre évaluation que cette information est disponible au moment de la réception d'un repair.

3. Modèle d'analyse

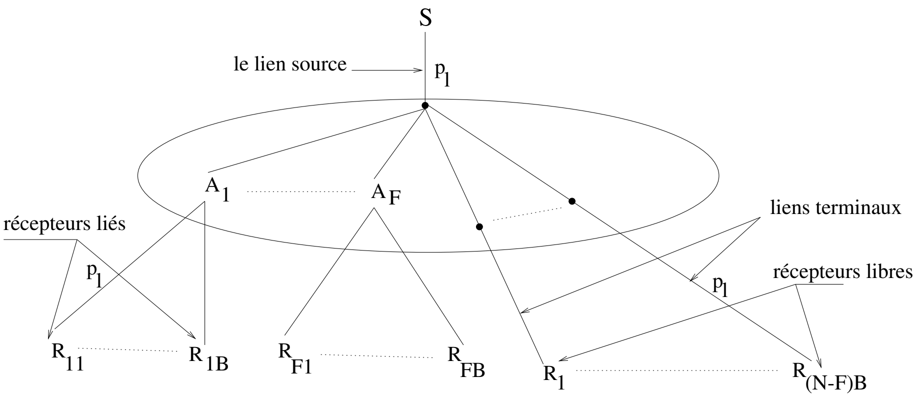


Figure 1: Modèle des réseaux et des pertes: configuration de base

Le modèle de réseau et de pertes que nous proposons est inspiré de celui de [KKT98]. Nous considérons le cas d'une seule source S qui diffuse à R récepteurs (Fig.1). Le nombre des récepteurs est supposé multiple de B pour qu'on puisse les distribuer sur $N = R/B$ groupes locaux dans le cas où tous les routeurs sont actifs. Chaque groupe local dans ce cas est constitué de B récepteurs. Nous adoptons un modèle où les routeurs actifs sont placés à la

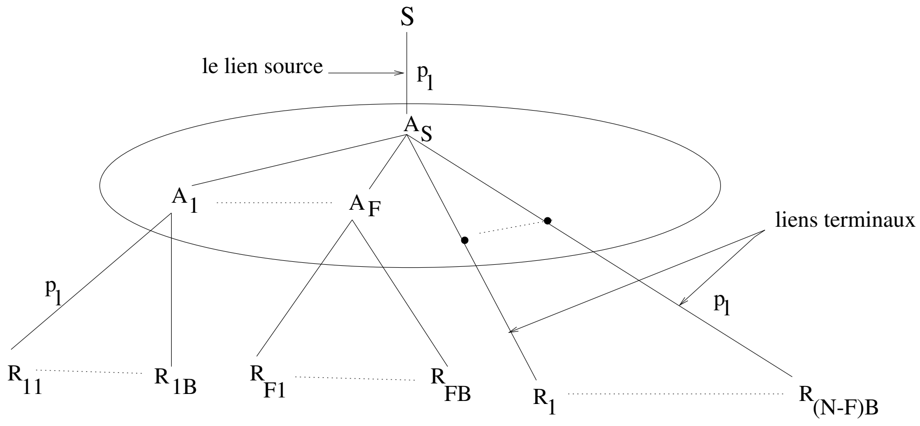


Figure 2: Modéle des réseaux et des pertes: configuration améliorée

périphérie du réseau de cœur. Cela pour deux raisons essentielles:

- Le réseau de cœur est fiable. En effet, il a été montré dans [YKT96] que les liens qui subissent le plus de pertes sont à la périphérie. Ces liens sont de deux types: Le lien "source" qui relie la source au réseau et l'ensemble des liens "terminaux" qui relient les récepteurs au réseau.

- Le réseau de cœur est un réseau à haut débit. Si on y place des routeurs actifs, il sera ralenti par les traitements effectués par ces derniers.

Notre modèle ne suppose pas que tous les routeurs à la périphérie sont actifs. En effet, on considère que F routeurs ($0 \leq F \leq N$) parmi N sont actifs (Fig.1). Chaque routeur actif A_i ($i = 1 .. F$) est responsable de B récepteurs $R_{i1}, \cdots, R_{iB}$, qui forment son groupe local. Un récepteur relié dans l'arbre du multicast à un routeur actif est dit **lié**. Les autres récepteurs non liés sont dits **libres** (Fig.1).

Pour la modélisation des pertes, p_l est la probabilité qu'une perte se produise au niveau du lien source ou d'un lien terminal. La probabilité, vue par un récepteur, qu'une perte de bout en bout aura lieu est $p = 1-(1-p_l)^2$. Dans cette analyse, la corrélation temporelle n'est pas prise en compte. Les pertes au niveau des liens terminaux sont supposées mutuellement indépendantes.

Pour les évaluations du paragraphe suivant, nous supposerons que les NAKs ne sont jamais perdus. Cette hypothèse ne pénalisera aucun des protocoles analysés. Par contre elle permet la simplification des expressions analytiques.

R	nombre total des récepteurs.
B	nombre de récepteurs liés par groupe local.
$N = R/B$	nombre de groupes locaux de récepteurs lorsque tous les récepteurs sont liés.
F	nombre des routeurs actifs associés aux récepteurs.
p	probabilité de perte d'un paquet de bout en bout.
p_l	probabilité qu'un paquet se perde au niveau du lien source ou d'un lien terminal.

Tableau 1.

Nous supposerons également qu'on dispose de suffisamment de moyens de stockage de telle sorte que lorsqu'un NAK arrive à un routeur actif, ce dernier aura le paquet demandé dans son cache. Cett hypothèse peut être relaxée en suivant l'analyse de [MP00]

Cette configuration peut être améliorée en liant la source à un routeur actif que nous désignerons par A_S (Fig.2). Notre analyse sera faite pour les deux configurations. Les cas particuliers où $F = 0$ et $F = N$ seront également examinés. Les protocoles utilisés sur la configuration améliorée seront notés $S1^+$, $S2^+$ et $S3^+$.

4. Evaluation analytique

Suivant l'approche adoptée originalement par Pingali et al. [PTK94], notre analyse se focalise sur les besoins de traitement des protocoles génériques S1, S2 et S3 ; plutôt que sur leurs besoins en termes de bande passante. Le débit maximal atteint par un protocole générique dépend du temps de traitement par paquet de données au niveau des différents nœuds de l'arbre de multicast.

Le temps total de traitement par paquet au niveau de la source inclut le temps nécessaire pour faire la transmission et des éventuelles retransmissions, ainsi que le temps requis pour traiter les NAKs correspondants à la perte de ce paquet, et ce jusqu'à ce qu'il soit correctement reçu par tous les récepteurs.

Pour un récepteur, ce temps est déterminé par le nombre total des traitements nécessaires jusqu'à ce qu'un paquet aléatoirement choisi soit correctement reçu. Ce temps inclut la réception du paquet avec des éventuels repairs, l'émission ou la réception des NAKs relatifs à ce paquet et aussi des éventuels traitements d'expirations de DG.

Au niveau d'un routeur actif, ce temps inclut les réceptions et les émissions du paquet de données et les NAKs correspondants. Kasera et al. [KKT98,

$X^{S_j}, X^{S_j^+}$	temps total de traitement par paquet au niveau de la source pour les protocoles S_j, et leurs variantes $S_j^+,\ j = 1..3$.
$Y^{S_j}, Y^{S_j^+}$	temps total de traitement par paquet au niveau d'un récepteur lié pour les protocoles S_j, et leurs variantes $S_j^+\ j = 1..3$.
$Y_*^{S_j}, Y_*^{S_j^+}$	temps total de traitement par paquet au niveau d'un récepteur libre pour les protocoles S_j, et leurs variantes $S_j^+,\ j = 1..3$.
$A_i^{S_j}, A_i^{S_j^+}$	temps total de traitement par paquet au niveau d'un routeur actif A_i $(i = 1..F)$ associé à un groupe local de récepteurs, pour les protocoles S_j, et leurs variantes $S_j^+,\ j = 1..3$.
$A_s^{S_j^+}$	temps total de traitement par paquet au niveau du routeur actif A_S, pour les protocoles $S_j^+,\ j = 1..3$.
Λ_x^ω	débit atteint par le nœud x dans le protocole ω.
Λ^ω	débit maximal atteint par le protocole ω.
X_p, X_n	resp. le temps de traitement pour envoyer un paquet de données et recevoir un NAK.
Y_p, Y_n	resp. le temps nécessaire pour la réception d'un paquet de données et transmettre un NAK.
Y_t	temps nécessaire pour traiter une expiration de DG.
X_p^a, X_n^a	resp. le temps de traitement pour envoyer un paquet de données et recevoir un NAK par un routeur actif.
Y_p^a, Y_n^a	resp. le temps de traitement pour recevoir un paquet de données et transmettre un NAK par un routeur actif.
$M_S,\ M_{A_S}$	le nombre de transmissions nécessaire, à partir de la source (resp. le routeur A_S) jusqu'à la réception correcte d'un paquet par tous les routeurs actifs associés aux récepteurs et tous les récepteurs libres.
$M_b,\ M_B$	le nombre de transmissions nécessaire, à partir d'un routeur actif, jusqu'à la réception correcte d'un paquet par un ou tous ses récepteurs liés.
M_a	nombre de transmissions nécessaire, à partir de la source jusqu'à la réception correcte d'un paquet par un routeur actif.
M_r	nombre de transmissions nécessaire, à partir de la source jusqu'à la réception correcte d'un paquet par un récepteur (lié ou libre).

Tableau 2. Notation

Variable aléatoire X	Distribution de probabilité $P[X \leq m]$
$M_b = M_a$	$1 - p_l^m$
M_r	$1 - p^m$
M_B	$(1 - p_l^m)^B$
M_S	$(1 - p_l^m)^F \ (1 - p^m)^{(N-F)B}$
$M_R = M_S(F = 0)$	$(1 - p^m)^R$
$M_A = M_S(F = N)$	$(1 - p_l^m)^N$
M_{A_S}	$(1 - p_l)^{(N-F)B}$
$M'_R = M_{A_S}(F = 0)$	$(1 - p_l^m)^R$
$M'_A = M_{A_S}(F = N)$	1

Tableau 3. Distribution de probabilité des variables aléatoires

KKT97] prennent en considération les expirations de DG même au niveau des serveurs de réparation. Nos protocoles génériques n'utilisent pas la suppression locale des NAKs entre nœuds intermédiaires de même niveau. L'objectif est de ne pas trop charger les routeurs actifs.

Pour faire notre analyse, nous adoptons une notation similaire à celle introduite dans [PTK94]. Nous utiliserons un certain nombre de paramètres et variables qui sont résumés dans le tableau 2. Nous notons par $(x)^+$, le nombre réel $max(0, x)$. Le tableau 3 résume la distribution de probabilité de chacune des variables aléatoires utilisées. Pour le calcul de la moyenne d'une variable aléatoire M, nous utilisons la formule suivante:

$$E[M] = 1 + \sum_{m=1}^{\infty} 1 - P[M \leq m]$$

En particulier pour M_a, M_b et M_r, on a :

$$E[M_a] = E[M_b] = 1/(1 - p_l)$$

et

$$E[M_r] = 1/(1 - p)$$

On a aussi :

$$E[(M_a-2)^+] = E[(M_b-2)^+] = p_l^2/(1-p_l)$$

et

$$E[(M_r-2)^+] = p^2/(1-p)$$

Les démonstrations sont disponibles dans un rapport technique [MP00].

4.1. Analyse du protocole générique S1

Nous commençons par analyser S1 dans le modèle de base, ensuite dans le modèle amélioré.

Modèle de base

Le protocole S1 dans la configuration de base où aucun routeur n'est actif ($F=0$) est identique au protocole générique N_1 de [PTK94].

Commençons par analyser les besoins de traitement au niveau de la source du multicast. Pour un paquet donné, la source le transmet M_S fois jusqu'à ce qu'il soit correctement reçu par tous les routeurs actifs ainsi que tous les récepteurs libres. Elle reçoit pour ce même paquet F (M_a-1) NAKs des routeurs actifs et $(N-F)B$ (M_r-1) NAKs des récepteurs libres. Le temps de traitement par paquet au niveau de la source peut être exprimé par:

$$\begin{aligned} E[X^{S_1}] = & \; E[M_S]\; E[X_p] + \\ & (F(E[M_a]-1) + (N-F)B\; (E[M_r]-1))\; E[X_n] \end{aligned} \qquad [1]$$

Si nous remplaçons $E[M_a]$ et $E[M_r]$ par leurs expressions respectives, nous obtenons l'expression:

$$E[X^{S_1}] = E[M_S]\; E[X_p] + \left(F\; \frac{p_l}{1-p_l} + (N-F)B\; \frac{p}{1-p}\right) E[X_n] \qquad [2]$$

Si aucun routeur n'est actif, en posant $F=0$ dans (2), on aboutit à une expression similaire à l'equation (11) de [PTK94]:

$$E[X^{S_1}] = E[M_R]\; E[X_p] + R\; \frac{p}{1-p}\; E[X_n] \qquad [3]$$

Lorsque tous les routeurs sont actifs, on trouve:

$$E[X^{S_1}] = E[M_A]\; E[X_p] + N\; \frac{p_l}{1-p_l}\; E[X_n] \qquad [4]$$

Le temps de traitement au niveau d'un récepteur dépend de son type, s'il est lié ou libre. Un récepteur lié reçoit les paquets de données M_B fois avec la probabilité $(1-p_l)$. Il renvoie (M_r-1) NAKs vers la source, et par conséquent traite $(M_r-2)^+$ expirations de délai de garde. D'où l'expression:

$$E[Y^{S_1}] = (1-p_l)\ E[M_B]\ E[Y_p]\ +\ \frac{p}{1-p}\ E[Y_n] + \frac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \qquad [5]$$

Un récepteur libre quant à lui, reçoit le paquet de données M_S fois avec la probabilité $(1-p)$. Il émet (M_r-1) NAKs et traite donc $(M_r-2)^+$ expirations de délai de garde, soit:

$$E[Y_*^{S_1}] = (1-p)\ E[M_S]\ E[Y_p]\ +\ \frac{p}{1-p}\ E[Y_n] + \frac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \qquad [6]$$

Si nous remplaçons F par la valeur 0, c'est le cas où tous les récepteurs sont libres, nous obtenons une expression similaire à celle de [PTK94] pour un récepteur du protocole N_1:

$$E[Y_*^{S_1}] = (1-p)\ E[M_R]\ E[Y_p]\ +\ \frac{p}{1-p}\ E[Y_n] + \frac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \qquad [7]$$

Passons maintenant à l'analyse du temps de traitement par paquet au niveau d'un routeur actif associé aux récepteurs. Un routeur actif A_i reçoit comme un récepteur libre, le paquet de données M_S fois avec la probabilité $(1-p_l)$. Il transmet le paquet à ses B récepteurs liés jusqu'à ce que ceux-ci le reçoivent correctement, soit M_B fois. Il reçoit en moyenne $B\ (E[M_r]-1)$ NAKs de ses B récepteurs et émet ensuite(M_b-1) NAKs vers la source. Il s'agit des NAKs générés par les récepteurs liés à cause d'une perte au niveau du lien source.

$$\begin{aligned} E[A_i^{S_1}] = \quad & (1-p_l)\ E[M_S]\ E[Y_p^a]\ + E[M_B]\ E[X_p^a] \\ & + B\ \tfrac{p}{1-p}\ \ E[X_n^a] + \ \tfrac{p_l}{1-p_l}\ E[Y_n^a] \end{aligned} \qquad [8]$$

Si tous les routeurs sont actifs, on aura l'expression:

$$\begin{aligned} E[A_i^{S_1}] = \quad & (1-p_l)\ E[M_A]\ E[Y_p^a]\ + E[M_B]\ E[X_p^a] \\ & + B\ \tfrac{p}{1-p}\ E[X_n^a] + \ \tfrac{p_l}{1-p_l}\ E[Y_n^a] \end{aligned} \qquad [9]$$

Modèle amélioré

Dans ce modèle la source envoie le paquet de données son routeur actif A_S jusqu'à ce qu'il le reçoive correctement, soit M_a fois. A_S renvoie $(M_a - 1)$ NAKs à la source pour ce même paquet.

$$E[X^{S_1^+}] = \frac{1}{1-p_l}\ E[X_p] + \frac{p_l}{1-p_l}\ E[X_n] \qquad [10]$$

Le modèle amélioré n'apporte pas de changements pour un récepteur lié qui continue à se comporter exactement comme dans la configuration de base puisqu'il est bien encapsulé par son routeur actif. Par contre un récepteur libre va recevoir cette fois-ci le paquet de données M_{A_S} fois avec la probabilité $(1-p_l)$. Il émet $(M_r - 1)$ NAKs et traite ainsi $(M_r - 2)^+$ expirations de délai de garde.

$$E[Y_*^{S_1^+}] = (1-p_l)\ E[M_{A_S}]\ E[Y_p]\ +\ \frac{p}{1-p}\ E[Y_n] + \frac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \qquad [11]$$

Si tous les récepteurs sont libres, $F = 0$, on trouve:

$$E[Y_*^{S_1^+}] = (1-p_l)\ E[M_R']\ E[Y_p]\ +\ \frac{p}{1-p}\ E[Y_n] + \frac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \qquad [12]$$

Le routeur actif associé à la source reçoit une seule fois le paquet de données de l'émetteur. Il le transmet M_{A_S} fois aux autres routeurs actifs et aux récepteurs libres. Pour les NAKs, A_S reçoit en moyenne $((F + (N-F)B)\ E[M_b])$ NAKs de ses fils. A_S aggrège les NAKs avant de les transmettre à la source et ne transmet par conséquent que M_b NAKs.

$$\begin{aligned} E[A_S^{S_1^+}] = \quad & E[Y_p^a]\ + E[M_{A_S}]\ E[X_p^a] + \\ & (F + (N-F)B)\ \tfrac{1}{1-p_l}\ E[X_n^a] + \tfrac{1}{1-p_l}\ E[Y_n^a] \end{aligned} \qquad [13]$$

Si tous les routeurs sont actifs $(F = N)$, on a:

$$E[A_S^{S_1^+}] = E[Y_p^a]\ +\ E[X_p^a] + \frac{N}{1-p_l}\ E[X_n^a] + \frac{1}{1-p_l}\ E[Y_n^a] \qquad [14]$$

Si par contre on n'a que A_S comme routeur actif, on obtient:

$$E[A_S^{S_1^+}] = E[Y_p^a] \ + E[M'_R] \ E[X_p^a] + \ \frac{R}{1-p_l} \ E[X_n^a] + \ \frac{1}{1-p_l} \ E[Y_n^a] \quad [15]$$

Un routeur actif A_i reçoit le paquet de données M_{A_S} fois de A_S. Il le transmet M_B fois aux récepteurs de son groupe local. Il reçoit en moyenne B $(E[M_r - 1])$ NAKs pour le même paquet alors qu'il en transmet que $(E[M_b] - 1)$ vers la source. Ce sont les NAKs correspondants aux pertes qui se produisent au niveau du lien source.

$$\begin{aligned} E[A_i^{S_1^+}] = \quad & E[M_{A_S}] \ E[Y_p^a] \ + E[M_B] \ E[X_p^a] + \\ & B \ \tfrac{p}{1-p} \ E[X_n^a] + \ \tfrac{p_l}{1-p_l} \ E[Y_n^a] \end{aligned} \quad [16]$$

Lorsque tous les routeurs sont actifs, on a $E[M_{A_S}] = E[M'_A] = 1$, d'où:

$$\begin{aligned} E[A_i^{S_1^+}] = \quad & E[Y_p^a] \ + E[M_B] \ E[X_p^a] + \\ & B \tfrac{p}{1-p} \ E[X_n^a] + \ \tfrac{p_l}{1-p_l} \ E[Y_n^a] \end{aligned} \quad [17]$$

4.2. Analyse du protocole générique S2

Pour l'évaluation du protocole S2, nous supposerons que la durée des attentes aléatoires est bien choisie de telle sorte qu'un seul NAK sera généré par groupe local et par perte.

Modèle de base

Dans ce modèle, la source et les récepteurs libres se comportent dans le protocole S2 exactement comme dans S1. Donc pour la source et un récepteur libre, on a les mêmes expressions (1) et (6) respectivement. Pour un récepteur lié, nous avons l'expression:

$$\begin{aligned} E[Y^{S_2}] = \quad & (1-p_l) \ E[M_B] \ E[Y_p] \ + \\ & \tfrac{E[M_B]-1}{B} \ (E[Y_n] + \ E[X_n]) \ + \ \tfrac{p^2}{1-p} \ E[Y_t] \end{aligned} \quad [18]$$

Le premier terme correspond au nombre de fois qu'un récepteur lié reçoit le paquet de données. Le deuxième et le troisième termes correspondent aux NAKs émis ou reçus respectivement par un récepteur lié dans le processus de la suppression locale des NAKs. Le dernier terme correspond au traitement des $(M_r - 2)^+$ expirations de délai de garde.

Un routeur actif reçoit le paquet de données de la source M_S fois avec la probabilité $(1 - p_l)$. Il le transmet à ses récepteurs de groupe M_B fois. Grâce à la suppression locale des NAKs, il ne reçoit qu'un seul NAK par perte, soit $(M_B - 1)$ fois. Il émet aussi les NAKs qu'il reçoit à la source et aux autres récepteurs s'il ne possède pas le paquet demandé, soit p_l $(M_B - 1)$ NAKs où p_l, est la probabilité que le paquet se perde au niveau du lien source:

$$\begin{aligned} E[A_i^{S_2}] = \quad & (1 - p_l)\ E[M_S]\ E[Y_p^a]\ + E[M_B]\ E[X_p^a] + \\ & (E[M_B] - 1)\ E[X_n^a] +\ p_l\ (E[M_B] - 1)\ E[Y_n^a] \end{aligned} \qquad [19]$$

Si tous les routeurs sont actifs, on aura l'expression:

$$\begin{aligned} E[A_i^{S_2}] = \quad & (1 - p_l)\ E[M_A]\ E[Y_p^a]\ + E[M_B]\ E[X_p^a] + \\ & (E[M_B] - 1)\ E[X_n^a] +\ p_l\ (E[M_B] - 1)\ E[Y_n^a] \end{aligned} \qquad [20]$$

Modèle amélioré

Dans ce modèle la source et les récepteurs liés se comportent exactement comme dans le modèle de base. Pour un récepteur libre par contre, on a l'expression:

$$\begin{aligned} E[Y_*^{S_2}] = \quad & (1 - p_l)\ E[M_{A_S}]\ E[Y_p]\ +\ \left(\tfrac{E[M_{A_S}]-1}{F+(N-F)B}\right)\ E[X_n] + \\ & \left(\tfrac{E[M_{A_S}]-1}{F+(N-F)B}\right)\ E[Y_n] +\ \tfrac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \end{aligned} \qquad [21]$$

le premier terme correspond au nombre de fois qu'un récepteur libre reçoit le paquet de données. Le deuxième et le troisième termes correspondent aux NAKs émis et reçus respectivement par un récepteur libre dans le processus de la suppression locale des NAKs. Le dernier terme est le nombre moyen d'expirations de délais de garde traitées.

Si $F = 0$, cas où aucun routeur n'est actif à part A_S, on a:

$$\begin{aligned} E[Y_*^{S_2^+}] = \quad & (1 - p_l)\ E[M'_R]\ E[Y_p]\ +\ \left(\tfrac{E[M'_R]-1}{R}\right)\ E[Y_n] + \\ & \left(\tfrac{E[M'_R]-1}{R}\right)\ E[Y_n] +\ \tfrac{p^2}{1-p}\ E[Y_t] \end{aligned} \qquad [22]$$

Examinons maintenant les traitements effectués au niveau des routeurs actifs. Commençons par le routeur actif associé à la source. A_S reçoit une seule fois le paquet de données et il le transmet M_{A_S} fois à ses descendants (les autres routeurs actifs et les récepteurs libres). Pour les NAKs, il reçoit un NAK par perte, soit $(M_{A_S} - 1)$ NAKs. Il émet les NAKs qu'il reçoit à la source et à ses descendants avec probabilité p_l, la probabilité que le paquet s'est perdu au niveau du lien source. D'où l'expression:

$$E[A_S^{S_2^+}] = E[Y_p^a] + E[M_{A_S}]\ E[X_p^a] + (E[M_{A_S}] - 1)\ E[X_n^a] + p_l\ (E[M_{A_S}] - 1)\ E[Y_n^a] \qquad [23]$$

Lorsque $(F = N)$, la tâche de A_S se réduit à la réception du paquet et sa transmision une seule fois aux autres routeurs actifs, soit:

$$E[A_S^{S_2^+}] = E[Y_p^a] + E[X_p^a]. \qquad [24]$$

Si par contre on n'a que A_S comme routeur actif, ce dernier sera trop chargé. L'expression suivante le montre:

$$E[A_S^{S_2^+}] = E[Y_p^a] + E[M'_R]\ E[X_p^a] + (E[M'_R] - 1)\ E[X_n^a] + p_l\ (E[M'_R] - 1)\ E[Y_n^a] \qquad [25]$$

Un routeur actif associé aux récepteurs reçoit M_{A_S} fois le paquet de données. Il le transmet M_B fois aux récepteurs de son groupe local. Ces derniers lui transmettent $(M_B - 1)$ NAKs. Un routeur actif transmet ces NAKs à la source et à ses descendants avec probabilité p_l (probabilité que le paquet demandé s'est perdu au niveau du lien source). Toujours dans le processus de la suppression locale des NAKs, Un routeur actif reçoit aussi en moyenne $(E[M_{A_S}] - 1)\ /\ (F + (N - F)B)$ NAKs de A_S. Il vient:

$$E[A_i^{S_2^+}] = E[M_{A_S}]\ E[Y_p^a] + E[M_B]\ E[X_p^a] + \left(\frac{1}{F+(N-F)B}\ (E[M_{A_S}] - 1) + (E[M_B] - 1) \right) E[X_n^a] + p_l(E[M_B] - 1)\ E[Y_n^a] \qquad [26]$$

Lorsque tous les routeurs sont actifs, on a:

$$E[A_i^{S_2^+}] = E[Y_p^a] + E[M_B]\ E[X_p^a] + (E[M_B] - 1)\ E[X_n^a] + p_l(E[M_B] - 1)\ E[Y_n^a] \qquad [27]$$

4.3. Analyse du protocole générique S3

S3 est une amélioration de S1 où un routeur actif ne transmet un repair qu'aux récepteurs ayant subi la perte du paquet correspondant (multicast partiel).

Modèle de base

Dans cette configuration ce sont les récepteurs liés qui bénéficient du multicast partiel. En effet, un récepteur lié ne reçoit un paquet de données qu'une seule fois. D'où l'expression suivante:

$$E[Y^{S_3}] = E[Y_p] \; + \; \frac{p}{1-p} \; E[Y_n] + \; \frac{p^2}{1-p} \; E[Y_t] \qquad [28]$$

Pour les autres nœuds, on a les mêmes expressions que dans le protocole S1.

Modèle amélioré

Le routeur actif associé à la source a l'avantage de décharger les récepteurs libres et les autres routeurs actifs des réception multiples d'un même paquet de données. La source est son routeur actif associé se comporte comme dans S1+. L'analyse pour un récepteur lié est identique à celle du modèle de base. Pour un récepteur libre et un routeur actif associé aux récepteurs, nous avons respectivement:

$$E[Y_*^{S_3^+}] = \frac{1}{1-p_l} \; E[Y_p] \; + \; \frac{p}{1-p} \; E[Y_n] + \; \frac{p^2}{1-p} \; E[Y_t] \qquad [29]$$

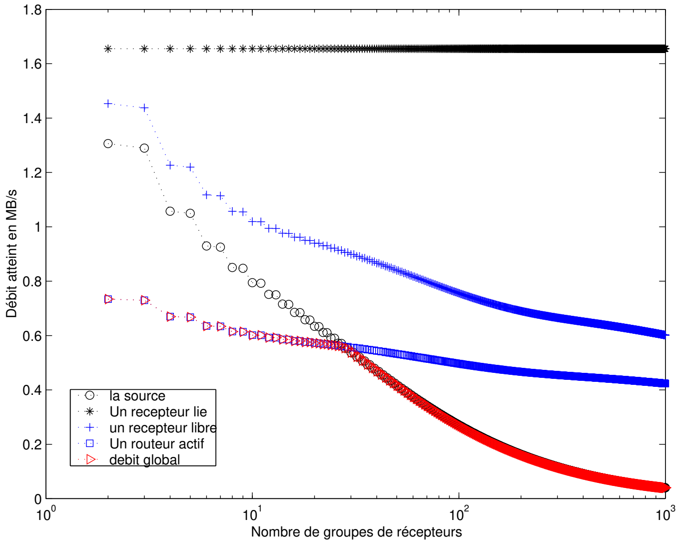
$$E[A_i^{S_3^+}] = E[Y_p^a] + B \; \frac{p}{1-p} \; E[X_n^a] + E[M_B] \; E[X_p^a] + \; \frac{p_l}{1-p_l} \; E[X_n^a]. \quad [30]$$

5. Résultats numériques

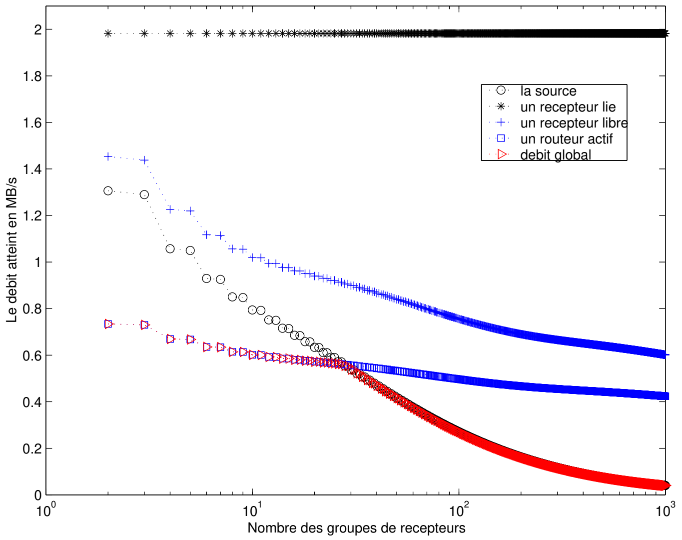
Dans ce paragraphe, nous utilisons le modèle proposé pour analyser numériquement les différents protocoles. L'étude est faite selon le débit atteint par chaque nœud et ensuite selon le débit global atteint par chaque protocole.

Le débit Λ_x^ω atteint par le nœud x dans le protocole $\omega \in \{S1, S2, S3, S1^+, S2^+, S3^+\}$ est calculé par la formule:

$$\Lambda_x^\omega = 1/E[x^\omega], \;\; x \in \{X, Y, Y_*, A_1, \cdots, A_F, A_S\}$$



(a)



(b)

Figure 3: Débit atteint par chaque type de nœuds séparément. $p = 0.05$, $B = 10$ et 50 % des routeurs actifs : (a) S1 et (b) S3.

Le débit global Λ^ω atteint par le protocole ω est alors donné par :

$$\Lambda^\omega = Min(\Lambda_x^\omega)$$

Pour l'évaluation numérique, nous prenons $E[X_p] = E[Y_p] = 500\ \mu secs$, $E[X_n] = E[Y_n] = 85\ \mu secs$ et $E[Y_t] = 32\ \mu secs$. Ces valeurs sont celles mesurées expérimentalement dans [KKT97]. Au niveau des routeurs actifs, le temps de traitement d'un paquet de données est de l'ordre de 400 $\mu secs$ dans la configuration de [LGT98]. Cette valeur est voisine de celle prise pour la source et les récepteurs. On peut donc adopter les valeurs suivantes :

$$E[X_p^a] = E[Y_p^a] = E[X_p] = E[Y_p] = 500\ \mu secs$$

et

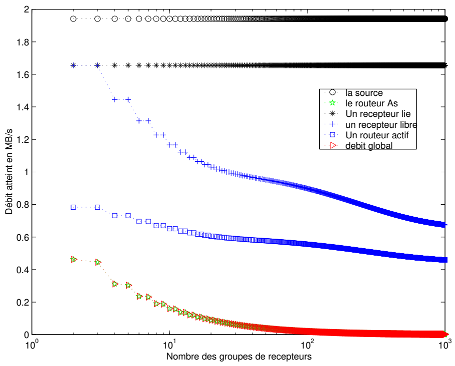
$$E[X_n^a] = E[Y_n^a] = E[X_n] = E[Y_n] = 85\ \mu secs.$$

La figure 3 montre les débits atteints par chaque type de nœud dans les protocoles S1 et S3 en fonction du nombre de groupes locaux de récepteurs. Il y a 50 % des routeurs actifs et le taux de perte égal à 5 %. Dans la configuration de base, nous pouvons observer que le débit minimal est introduit au début par les routeurs actifs, puis c'est ensuite la source qui devient le goulot d'étranglement. L'intérêt du multicast partiel peut être vu au niveau du débit atteint par les récepteurs liés dans S3 qui est nettement supérieur à celui de S1.

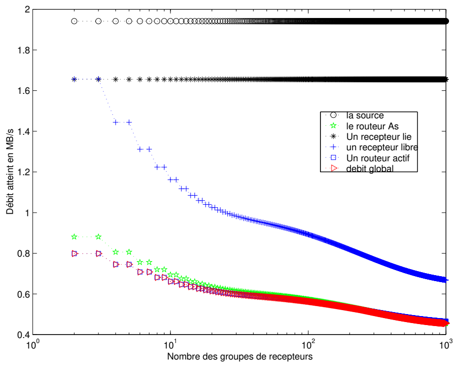
La figure 4 montre les débits atteints par chaque type de nœuds pour les protocoles $S1^+$, $S2^+$ et $S3^+$ (configuration améliorée). Par rapport à la configuration de base, tous les nœuds présentent un débit plus grand. La source est complètement déchargée grâce à son routeur actif, elle présente un débit constant quelque soit le nombre des récepteurs. Grâce au multicast partiel dans S3, les récepteurs libres et les routeurs actifs ont un débit constant quelque soit le nombre des récepteurs.

Dans la configuration de base, la suppression locale ou la suppression globale des NAKs ont pratiquement les mêmes performances en termes de débit global. La figure 5 montre l'intérêt des routeurs actifs qui permettent d'obtenir plus de débit global même avec un taux de perte élevé surtout lorsque le nombre des récepteurs est important.

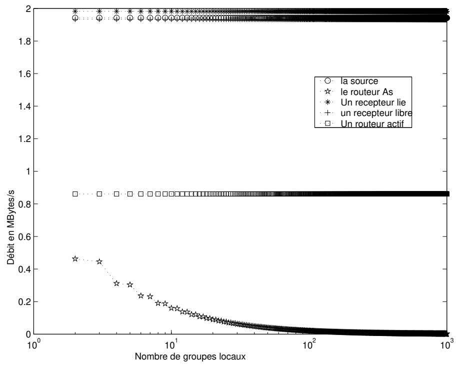
Dans la configuration améliorée (Fig.6), nous obtenons avec $S2^+$ un débit global supérieur à celui de S2. L'utilisation d'un routeur actif associé à la source dans S1 et S3 n'est pas rentable car contrairement à S2, c'est ce routeur actif qui introduit le débit minimal. Lorsque tous les routeurs sont actifs, $S2^+$ présente un débit constant quelque soit le nombre des récepteurs. Ceci est dû à



(a)



(b)



(c)

Figure 4: Débit atteint par chaque type de nœuds séparément. $p = 0.05$, $B = 10$ et 50 % des routeurs actifs : (a) $S1^+$, (b) $S2^+$ et (c) $S3^+$.

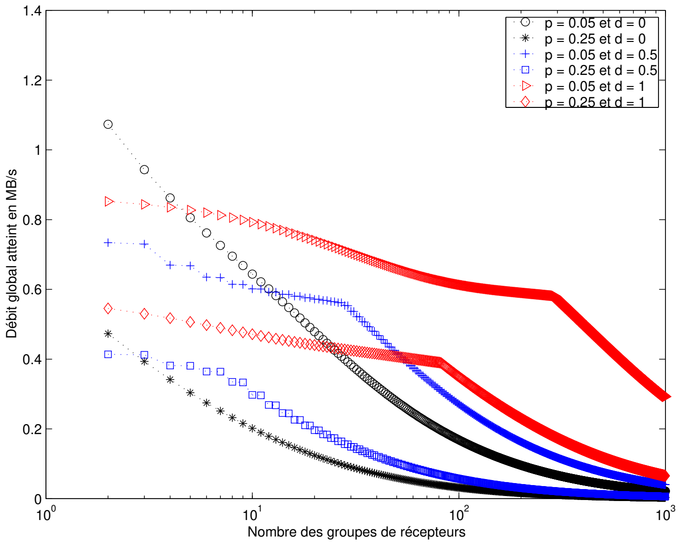
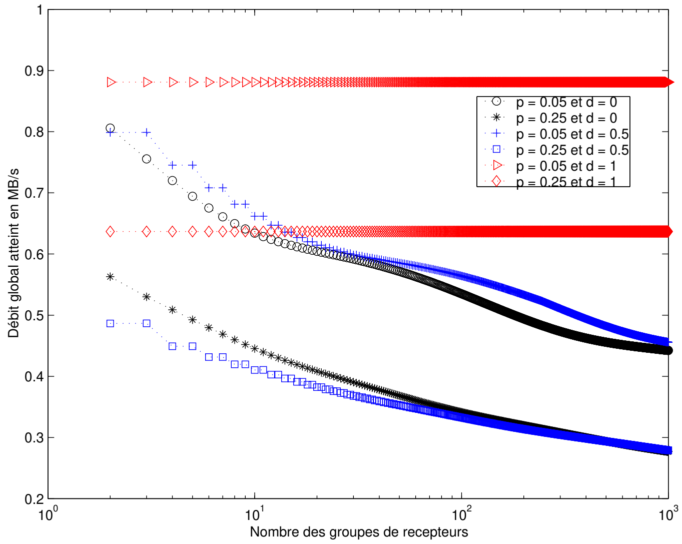


Figure 5: Débit global atteint par les trois protocoles dans leur configuration de base ($B = 10$).

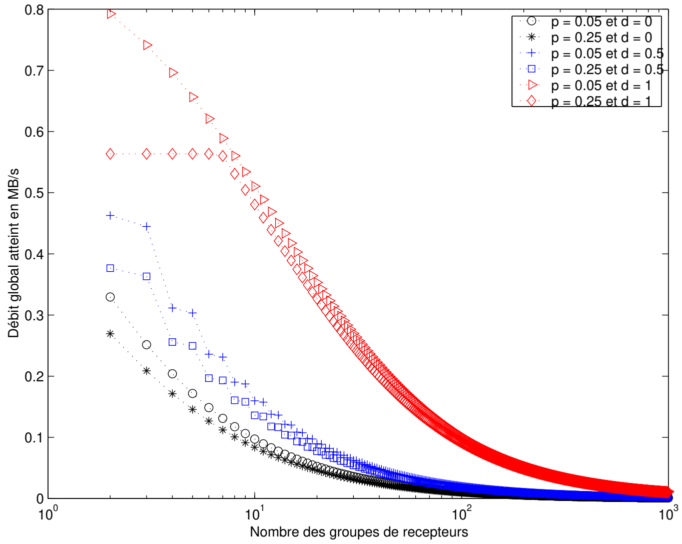
la suppression locale des NAKs qui permet de générer un seul NAK par groupe quelque soit le nombre de ses éléments.

L'analyse du débit atteint par chacun des protocoles a montré que le débit global est limité par les routeurs actifs. La question que l'on se pose est “ De combien faut-il augmenter la puissance de traitement des routeurs actifs pour que le réseau ne limite plus les performances des protocoles actifs ?”. Pour répondre à cette question, on peut tracer les courbes représentant le rapport entre le débit atteint par un récepteur libre noté L et celui atteint par un routeur actif associé aux récepteurs noté A. L'étude de la puissance des routeurs actifs est faite par rapport aux récepteurs libres car ce sont les nœuds terminaux qui introduisent le débit minimal.

La figure 7(a) montre le rapport L/A pour les trois protocoles (S3 présente le même comportement que S1). On peut voir que si on double la puissance de traitement des routeurs actifs, on leur permet d'avoir un débit supérieur à celui des récepteurs libres. D'autre part, on peut observer que S2 nécessite moins de capacité de traitement au niveau des routeurs actifs par rapport à S1. La figure 7(b) montre aussi le rapport L/A pour les trois protocoles dans leur configuration améliorée. $S2^+$ est toujours le protocole qui nécessite moins de puissance de traitement au niveau des routeurs actifs. En effet, un routeur actif de S2 traite un seul NAK par perte et par groupe local. $S3^+$ nécessite un



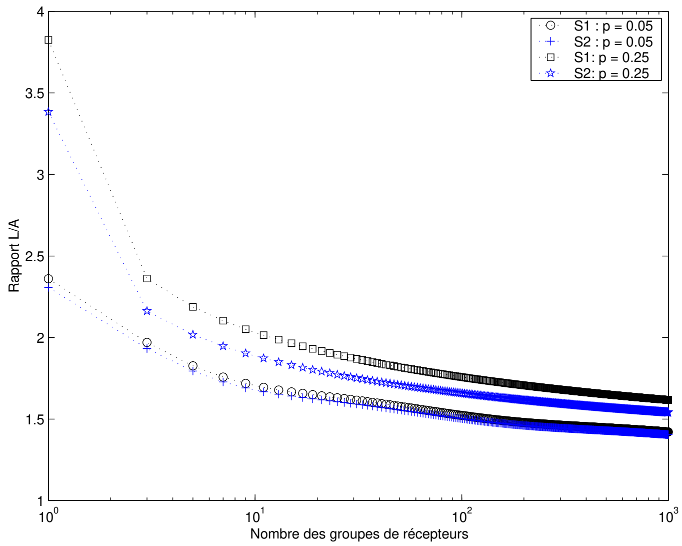
(a)



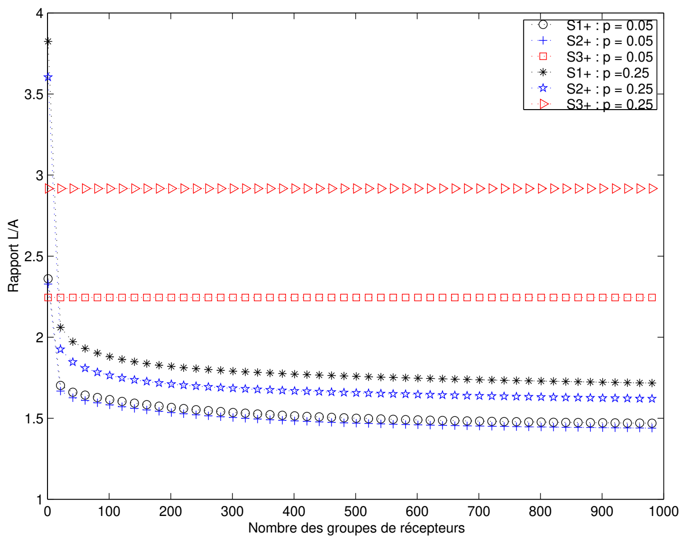
(b)

Figure 6: Débit global atteint par (a) $S2^+$ (b) $S3^+$ et $S1^+$ ($B = 10$).

.



(a)



(b)

Figure 7: Puissance de traitement des routeurs actifs par rapport aux récepteurs libres dans le modèle: (a) de base et (b) amélioré ($B = 10$).

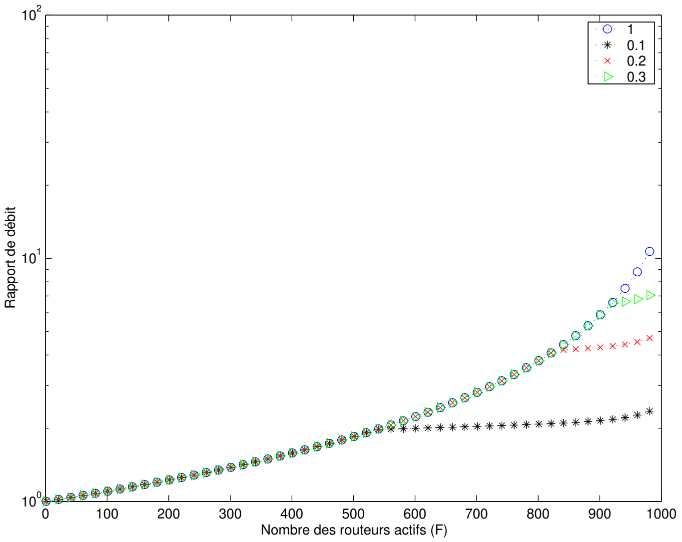


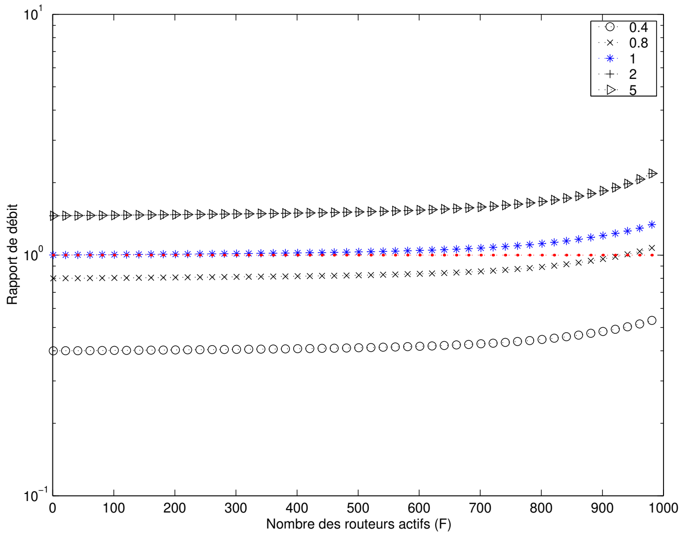
Figure 8: L'influence du pourcentage des routeurs actifs dans les configurations de base (mêmes courbes pour les 3 protocoles). $p = 0.05$, $B = 10$ et $N = 1000$.

peu plus de puissance de traitement car ses récepteurs libres ont un débit plus élevé grâce au multicast partiel.

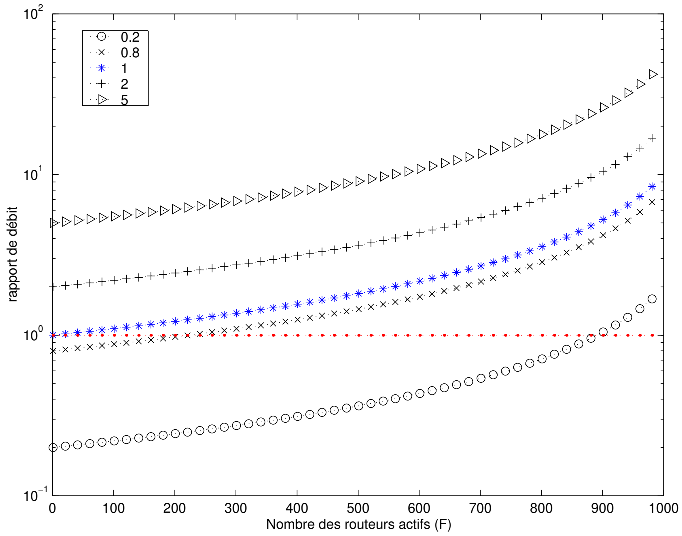
Les courbes de la figure 8 nous permettent d'analyser l'influence du nombre des routeurs actifs sur les performances des protocoles de recouvrement des pertes. Ces courbes donnent en fonction du nombre des routeurs actifs le taux d'amélioration du débit global atteint par chaque protocole par rapport au cas sans routeurs actifs. La légende donne pour chaque courbe le facteur par lequel on a multiplié la puissance de traitement des routeurs actifs par rapport aux autres types de nœuds (la source et les récepteurs).

Pour la configuration de base, on peut voir que le débit global atteint peut être multiplié par 10 en gardant la même puissance de traitement si tous les récepteurs sont reliés à des routeurs actifs. On constate également que même si on divise par 10 la puissance de traitement des routeurs actifs, on arrive tout de même à doubler le débit par rapport à une configuration sans routeurs actifs lorsque l'on dispose d'un peu plus de 50 % des routeurs qui sont actifs.

Pour la configuration améliorée (Fig.9), Si on augmente le nombre des routeurs actifs, $S1^+$ et $S3^+$ présentent un débit global très élevé par rapport au cas où aucun routeur n'est actif, même si on diminue considérablement la capacité de traitement de ces routeurs actifs. Dans $S2^+$ par contre, on peut voir qu'il est



(a)



(b)

Figure 9: L'influence du pourcentage des routeurs actifs dans les configurations améliorées (a) $S2^{+}$ (b) $S1^{+}$ et $S3^{+}$. $p = 0.05$, $B = 10$ et $N = 1000$.

inutile d'augmenter au-delà du double la puissance de traitement des routeurs. En effet, dans ce cas les routeurs actifs ne sont plus le goulot d'étranglement. De plus, ces courbes montrent qu'il n'est pas rentable d'augmenter le nombre des routeurs actifs dans cette configuration car cela ne va pas augmenter d'autant le débit global.

6. Conclusion

Pour faire l'évaluation des protocoles de recouvrement des pertes avec la contribution des routeurs actifs, notre méthodologie consiste en la dérivation de trois protocoles génériques dont chacun adopte une stratégie différente pour faire la suppression des NAKs. L'évaluation de ces protocoles est faite selon un modèle analytique basé sur le calcul du temps de traitement par paquet pour chaque type de nœud, et ce pour chaque protocole. Nous utilisons un modèle de réseau qui ne suppose pas que tous les routeurs sont actifs. Ceci nous a permis d'un coté d'examiner l'intéret des routeurs actifs dans le processus de recouvrement des pertes et de l'autre d'évaluer en même temps les protocoles non actifs.

L'évaluation des performances est faite selon le débit global atteint par chaque protocole. Une analyse des débits atteints par chaque type de nœud est réalisée pour connaître l'élément qui introduit le débit minimal dans chaque configuration. Les résultats numériques ont montré que ce sont les routeurs actifs qui constituent le goulot d'étranglement. Nous avons répondu à la question qui concerne la puissance de traitement nécessaire au niveau des routeurs actifs pour que les performances ne soient plus limitées par le réseau. L'influence de la densité des routeurs actifs dans le réseau a été également observée.

Pour ne pas rendre complexe les expressions analytiques donnant le temps moyen de traitement par paquet, nous avons supposé que l'on dispose de suffisamment de moyens de stockage au niveau des routeurs actifs. Donc nous n'avons pas pris en considération le cas où le recouvrement local échoue. Le but initial étant de comparer les deux stratégies de suppression des NAKs, cette hypothèse ne pénalise aucun protocole. Néanmoins il est envisageable dans le futur de prendre en considération le fait que les moyens de stockage au niveau des routeurs actifs sont des ressources limitées. Dans le modèle de base, les deux approches présentent pratiquement les mêmes performances en termes de débit global. Afin de bien les comparer, nous envisageons de faire une évaluation qui se base sur le délai de recouvrement de bout en bout.

Références

[DC90] S. E. Deering and D. R. Cheriton, "Multicast Routing in Datagrams Internetworks and Extended LANs," ACM Transactions on Computer Systems, Vol 8, No. 2, pp 85-110, May 1990.

[FJL95] S. Floyd, V. Jacobson, C.G. Liu, "A Reliable Multicast Framework for Light Weight Session and Application Level Framing," in Proc ACM SIGCOMM'95, pp 342-356, August 1995.

[KBK+00] S. K. Kasera, S. Bhatacharyya, M. Keaton, D. Kiwior, J. Kurose, D. Towsley and S. Zabele, "Scalable Fair Reliable Multicast Using Active Services", IEEE Network Magazine's Special Issue on Multicast 2000.

[KKT98] S. K. Kasera, J. Kurose and D. Towsley, "A Comparaison of Server-Based and Receiver-Based Local Recovery Approaches for Scalable Reliable Multicast," In Proceedings of IEEE INFOCOM, San Francisco, CA, USA, March 1998.

[KKT97] S. K. Kasera, J. Kurose and D. Towsley, "A Comparaison of Server-Based and Receiver-Based Local Recovery Approaches for Scalable Reliable Multicast," CMPSCI Technical Report TR 97-69, December 1997.

[LGT98] Li-Wei H. Lehman, S. J. Garland, and D. L. Tennenhouse, "Active Reliable Multicast," Proceedings of IEEE INFOCOM'98, San Francisco, CA, March 1998.

[MP00] M. Maimour and C. Pham. A Throughput Analysis of Reliable Multicast protocols in an Active Networking Environment. Technical report, http://resam.univ-lyon1.fr/˜mmaimour/Paper/TR/TR00.ps.gz.

[PS97] S. Paul, K. K. Sabnani, "Reliable Multicast Transport Protocol (RMTP)," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Special Issue on Network Support for Multipoint Communication, Vol. 15, No. 3, pp 407-421, April 1997.

[PTK94] S. Pingali, D. Towsley, and J.F. Kurose, "A Comparaison of Sender-initiated and Receiver-initiated Reliable Multicast protocols," in Proceedings of ACM SIGMETRICS'94, Vol 14, pp 221-230, 1994.

[SDW92] W. T. Strayer, B. Dempsey and A. Weaver, "XTP: The Xpress Transfer Protocol," Addison Wesley Publishing Company, 1992.

[TSS+97] D. L. Tennehouse, J. M. Smith, W. D. Sincoskie, D. J. Wetherall, and G. J. Winden, "A Survey of Active Network Research," in IEEE Communications Magazine, pp 80-86, January 1997.

[YKT96] M. Yajnik, J. Kurose, and D. Towsley, "Packet Loss Correlation in the MBone Multicast Network," in Proceedings of Global Internet Conference, November 1996.

[YGS95] R. Yavatkar, J. Griffioen, and M. Sudan, "A Reliable Dissemination Protocol for Interactive Collaborative Applications," Proceedings' of the ACM Multimedia'95, November 1995.