HAL
open science

Gestion dynamique de buffer pour l'optimisation de la consommation énergétique dans un réseau filaire

Wael Zouaoui, Carolina Albea-Sanchez, Yann Labit

To cite this version:

Wael Zouaoui, Carolina Albea-Sanchez, Yann Labit. Gestion dynamique de buffer pour l'optimisation de la consommation énergétique dans un réseau filaire. EDSYS2014, May 2014, Toulouse, France. hal-01068674

HAL Id: hal-01068674

https://hal.science/hal-01068674

Submitted on 6 Nov 2014

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.

Congrès des Doctorants 2014
EDSYS (École Doctorale Systèmes)
22-23 Mai, Toulouse

Gestion dynamique de buffer pour l'optimisation de la consommation énergétique dans un réseau filaire

Wael ZOUAOUI (wzouaoui@laas.fr)
LAAS-CNRS
Université Paul Sabatier, Toulouse
Thèse encadrée par : Carolina ALBEA SANCHEZ (LAAS-CNRS/UPS) et Yann LABIT (LAAS-CNRS/UPS)

Résumé *Le développement rapide des réseaux de communication entraîne une augmentation des débits de communication ainsi que la consommation énergétique. De nombreuses solutions matérielles et protocolaires ont été développées pour surmonter ces problèmes (par exemples Smart Sleeping et Rate Adaptation). Nous présentons dans cet article une solution originale et alternative issue de la communauté Automatique pour réguler le flux de sortie du nœud contrôlé dans le but de réduire la consommation énergétique et améliorer la Qualité de Service (QdS). Ce contrôleur est développé à l'aide d'outils comme la commande optimale tout en garantissant la stabilité asymptotique (au sens de Lyapunov). Pour valider cette approche, nous l'appliquerons sur une topologie simple via "Matlab-Simulink" et le simulateur de réseaux "NS-2". Cette approche "green control" permettrait à terme, dans le cadre d'ADREAM*[1]*, de contrôler la consommation liée au réseau de communication en fonction de la charge de trafic et de l'énergie disponible.*

Introduction

Depuis quelques années, le nombre d'utilisateurs de systèmes de communication a augmenté significativement, augmentant ainsi la consommation énergétique. Selon [13], le nombre d'internautes a atteint 2.4 milliards en 2012 et la consommation énergétique des réseaux de communication présente 5.5% de la production mondiale de l'énergie électrique chaque année et un taux de 2% d'émissions en gaz carbonique (CO_2).

La perspective de 2015, avec probablement 2.8 milliards d'internautes, le trafic sera multiplié par 4 et la consommation énergétique sera doublée (environ +25% par an) [18] ce qui nécessite d'examiner les différentes moyens permettant de réduire la consommation énergétique induite par cette augmentation.

De nombreux travaux ont déjà été faits sur ce sujet (majoritairement dans le cadre des réseaux sans fil) et plusieurs solutions matérielles et protocolaires ont été développées afin de réduire la consommation énergétique dans les réseaux de communications, on peut citer :

- ALR (Adaptive Link Rate) : adapter les débits de transmission en fonction des taux d'utilisation des liens et des seuils énergétiques proposés au niveau des nœuds. [9].
- Smart sleeping (par exemple Interface proxying) : elle consiste à éteindre les routeurs inactifs ou peu utilisés [4, 12].
- Redimensionnement du réseau : cette solution est complexe et coûteuse, elle consiste à modifier l'architecture des réseaux de communication [5].
- Routage éco-conscient : calculer la meilleure route pour minimiser le nombre de routeurs utilisés en respectant les contraintes de Qualité de Service, en particulier en terme de consommation énergétique [2].

Sur le plan industriel, certaines grandes entreprises du secteur ont déjà entamé une "révolution verte" (développement des équipements réseaux "green"). Parmi ces entreprises, on cite les suivantes : Cisco (EnergyWise), Alcatel-Lucent (GreenTouch), IBM (Big-Green), NetGear (routeurs, switchs éco-conscients) Intel, Microsoft, Toshiba, Hewlett-Packard (Advanced Configuration and Power Interface).

Dans cet article, un mécanisme de contrôle de flux est proposé à partir de la théorie de la commande. Ce contrôle est applicable localement à chaque nœud élu dans une topologie réseau. Le choix du/des nœuds élus est un problème à part entière : il ne fait pas actuellement partie de ce travail (perspectives). La loi de la commande modifie la dynamique du flux du trafic traversant un nœud en utilisant la file d'attente dans laquelle on dépose temporairement les paquets. Cette loi proposée garantit la non saturation du flux de sortie pour éviter les pertes des paquets, qui assure, en même temps, une convergence rapide vers la référence. Ce niveau de référence dans le buffer est donné par les seuils énergétiques proposés par le modèle ALR, qui garantit

1. http ://www.laas.fr/ADREAM/

une réduction énergétique.

L'idée est en soit simple mais efficace car elle permet de rester sous les seuils énergétiques du modèle ALR mais au détriment d'autres paramètres de QdS tel que le délai. La modification de la dynamique du flux traversant un nœud se fait en utilisant la file d'attente dans laquelle on stocke temporairement les paquets et par conséquent la consommation énergétique sera réduite [15].

Le contrôleur de flux proposé est validé sous Matlab/Simulink et NS-2, et les mesures de la consommation énergétique sont données par ECOFEN [15] (module implémenté dans NS-2).

L'article est organisé comme suit : la section A présente le modèle ALR ainsi que le module ECOFEN, puis dans la section B un modèle mathématique et un contrôleur de flux sont proposés. La section C présente enfin les résultats de simulations sous Matlab-Simulink et NS-2.

A. Modèle ALR et module ECOFEN

La première étape consiste à modéliser la consommation énergétique des équipements réseau. Pour ce but, on considère un modèle de routeur conçu sous NS-2 (Network Simulator). NS-2 est l'un des simulateurs les plus utilisés actuellement dans la communauté des réseaux [7]. Ce simulateur nous permet de simuler de grands réseaux avec des trafics réalistes et d'obtenir des mesures de qualité de service (QdS).

Le module ECOFEN (Energy Consumption mOdel For End-to-end Networks) a été développé sous NS-2, il donne la consommation énergétique instantanée au niveau de chaque équipement en tenant compte du trafic et du type d'équipement utilisé (routeur de cœur, switch, carte réseau, etc.) [15]. Ce module se base sur le modèle ALR (Adaptive Link Rate) qui adapte les débits de transmission en fonction des taux d'utilisation des liens de communication, par conséquent des débits sur ceux ci.

Les équations mathématiques décrivant ce modèle de consommation énergétique sont les suivantes :

$$P = \begin{cases} P_0 & si\, w_n = 0 \\ a_1 w_n + P_1 & si\, w_n \in]0; W_1] \\ \vdots & \\ a_i w_n + (P_i - a_i W_{i-1}) & si\, w_n \in]W_{i-1}; W_i] \\ \vdots & \\ a_N w_n + (P_N - a_n W_{N-1}) & si\, w_n \in]W_{N-1}; W_N] \end{cases} \quad (1)$$

avec :

- $a_i \in \mathbb{R}^+$: les pentes de chaque palier linéaire.
- $w_n \in \mathbb{R}$: le flux d'entrée pour chaque élément de réseau.
- $W_i \in \mathbb{R}^+$: les seuils de débits utilisés.
- $P_i \in \mathbb{R}^+$: les puissances de départ pour chaque palier linéaire.

La Fig. 1 présente ce modèle de consommation énergétique.

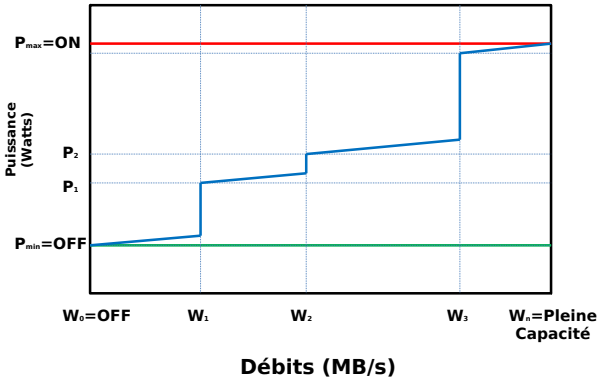

Figure 1 – Modèle ALR de la consommation énergétique dans un élément réseau de type routeur.

Sur ce modèle, on peut voir une dépendance entre le flux entrant et la quantité d'énergie consommée par l'élément de réseau.

A.1. *Modèle de consommation énergétique dans un routeur*

Dans cet article, nous nous appuyons sur le modèle précédent pour réduire la consommation énergétique dans un routeur. Pour cet objectif, nous nous modifions la dynamique du flux d'entrée, w_n, lors de son passage dans le nœud contrôlé, dans le modèle (1). On va retarder artificiellement et temporairement dans une file d'attente (buffer), à une valeur q_{ref}, un certain niveau de paquets. La taille de file d'attente q_{ref} est déterminée en fonction du flux d'entrée dans le routeur. Ce choix peut avoir des conséquences sur la QdS du réseau, en terme de "délai", c'est à dire qu'il apparaît un compromis entre la réduction de la consommation énergétique et le délai de transmission.

Par conséquent, on propose de réécrire le modèle (1) de la manière suivante :

$$P = \begin{cases} P_0 & si\, w_n = 0 \\ a_1 w_n + P_1 - bq_{ref} & si\, w_n \in]0; W_1] \\ \vdots & \\ a_i w_n + (P_i - a_i W_{i-1}) - bq_{ref} & si\, w_n \in]W_{i-1}; W_i] \\ \vdots & \\ a_N w_n + (P_n - a_N W_{N-1}) - bq_{ref} & si\, w_n \in]W_{N-1}; W_N] \end{cases} \quad (2)$$

avec :

- $q_{ref} \in \mathbb{R}^+$: la référence de la taille de file d'attente.
- $b \in \mathbb{R}^+$: un coefficient de conversion de la taille de file d'attente de référence q_{ref}.

Une bonne adaptation de la taille de la file d'attente de référence est indispensable pour mieux réduire la consommation énergétique sans dégrader la QdS.

Ce choix de q_{ref} dépend de deux paramètres essentiels :

- la fenêtre temporelle d'actualisation de la taille de file d'attente de référence

$$T_{q_{ref}} = \frac{T_w}{\beta}, \tag{3}$$

où T_w est la fenêtre temporelle liée au flux d'entrée à un nœud. β est le nombre de changements de la valeur de q_{ref} pendant la période T_w, cela permet d'actualiser plus ou moins fréquemment q_{ref} en fonction de la variabilité du trafic.

- La taille de la file d'attente

$$q_{ref} = \frac{\hat{w}_n}{\gamma}, \tag{4}$$

où $\hat{w}_n$ est la moyenne du trafic d'entrée sur une fenêtre temporelle fixe T_w. γ est un pas (coefficient de pondération) permettant d'adapter l'amplitude de la référence en fonction de w_n.

B. Contrôle de flux

B.1. Modélisation

Un des défis les plus importants est de trouver un modèle de nœud de communication approprié pour appliquer la théorie de la commande. Dans cette section, un modèle de réseau est inspiré de la dynamique de l'écoulement d'un fluide. Ce modèle simple et raisonnable peut gérer un vaste comportement des réseaux (voir [14, 16]). Le modèle mathématique choisi s'écrit comme suit :

$$q_{k+1} = q_k - T_s(u_k - \hat{w}_n) \tag{5}$$

avec :

- $q_k \in \mathbb{R}^+$: la taille moyenne de file d'attente pour un nœud et est la variable d'état.
- $T_s \in \mathbb{R}^+$: la période d'échantillonnage du modèle de nœud.
- $u_k \in \mathbb{R}$: le flux de sortie de chaque nœud. C'est la variable du commande.
- $\hat{w}_n$: le flux moyen d'entrée pour chaque nœud et c'est considère constant.

Notons que ce modèle est un modèle à temps discret.

B.2. Synthèse de la commande

Équation de l'erreur pour un nœud élu :

En prenant comme erreur $e_k \triangleq q_{ref} - q_k$ avec q_{ref} la référence de la taille de file d'attente. L'équation d'erreur de la file d'attente est la suivante :

$$e_{k+1} = e_k + T_s(u_k - \hat{w}_n). \tag{6}$$

La loi de commande proposée est :

$$u_k = \mathrm{sat}_0^C\{u_{k-1} + Kx_k\}, \tag{7}$$

avec $K = [K_1 \quad K_2]$ le vecteur de gain de la commande, $x_k = [e_k \quad e_{k-1}]^T$ et C est la capacité du lien à la sortie du nœud contrôlé.

Remarque. *La condition de saturation de la loi de commande est ajoutée afin de satisfaire la contrainte physique des liens dans les réseaux du communication, dont la bande passante disponible est comprise entre* 0 *et* C *(ou* W_n *sur la figure 1).*

Représentation polytopique de la commande saturée :

La loi de commande (7) présente une non-linéarité isolée. Par conséquent, la saturation est modélisée en tant que modèle polytopique obtenu en appliquant les deux lemmes suivants. On définit $\chi_k \triangleq \left[u_{k-1}\, x_k^T\right]^T$. Le lemme suivant rappelle comment encapsuler la fonction de saturation dans un polytope.

Lemme 1. *[10]. Soient* $K, G \in \mathbb{R}^{1\times 2}$*, pour tous,* $\chi_k \in \mathbb{R}^{3\times 1}$*, si* $\chi_k \in \{\chi_k \in \mathbb{R}^{1\times 3} : [1 \quad G]\chi_k \in [0 \quad C]\}$*, alors*

$$sat_0^C\{[1 \quad G]\chi_k\} \in \mathcal{C}o\{[1 \quad K]\chi_k, \quad [1 \quad G]\chi_k\}.$$

□

Le lemme suivant propose une représentation polytopique de la loi de commande de type PI (Proportionnelle Intégrale) :

Lemme 2. *Supposons qu'il existe* $G \in \mathbb{R}^{1\times 2}$*,* $c > 0$ *et* $\Psi \triangleq \begin{bmatrix} \Theta_1 & \Theta_2 \\ \Theta_2^T & P \end{bmatrix} > 0 \in \mathbb{R}^3$ *avec* $P \in \mathbb{R}^2$ *est une matrice définit positive de telle sorte que pour tout* $\chi_k \in \mathfrak{X}$*, tel que*

$$\mathfrak{X} = \left\{\chi_k : \chi_k^T \Psi \chi_k \leq c^{-1}\right\}, \tag{8}$$

alors, $0 < u_{k-1} + Gx_k < C$*, et la loi de commande* (7) *admet la représentation suivante*

$$\begin{aligned} u_k &= \alpha_k(u_{k-1} + Kx_k) + (1-\alpha_k)(u_{k-1} + Gx_k) \\ &= u_{k-1} + (\alpha_k Kx_k + (1-\alpha_k)Gx_k) = u_{k-1} + \bar{u}_k, \end{aligned}$$

où $\bar{u}_k \triangleq (\alpha_k K + (1-\alpha_k)G)x_k$ *avec* $\alpha_k \in [0,1]$*, pour tous* $k > 0$*.* □

Ensuite, Eq. (6) se réécrit comme suit :

$$e_{k+1} = e_k + T_s(u_{k-1} + \bar{u}_k) - T_s w_n \tag{9}$$

En appliquant les Lemmes 1 et 2 et selon [1], on obtient :

$$x_{k+1} = Ax_k + B\bar{u}_k, \tag{10}$$

où

$$A \triangleq \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B \triangleq \begin{bmatrix} T_s \\ 0 \end{bmatrix}.$$

L'équation (10) peut être réécrite sous la forme suivante du système en boucle fermée

$$x_{k+1} = Ax_k + B\left(\alpha_k K + (1-\alpha_k)G\right)x_k. \tag{11}$$

Condition pour la commande non saturée Afin de s'assurer que le signal de commande ne sature pas, nous devons respecter cette condition :

$$0 < u_{k-1} + Gx_k < C, \quad \forall \chi_k \in \mathfrak{X} \tag{12}$$

avec $\mathfrak{X}$ est donnée dans (8).

En soustrayant $\frac{C}{2}$ de l'inégalité (12) et en se référant à [8], on voit que, (12) est satisfaite si :

$$\begin{aligned} C > cx_k^T Px_k + cu_{k-1}\Theta_1 u_{k-1} + cx_k^T \Theta_2^T u_{k-1} \\ + cu_{k-1}\Theta_2 x_k - 1 + C > 2u_{k-1} + 2Gx_k - C. \end{aligned} \tag{13}$$

En appliquant le Lemme 2, l'inégalité (13) peut être réécrite de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \pm u_{k-1} \\ \pm x_k \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2C-1 & -1 & -G \\ -1 & c\Theta_1 & c\Theta_2 \\ -G^T & c\Theta_2^T & cP \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm u_{k-1} \\ \pm x_k \end{bmatrix} > 0 \tag{14}$$

Après application du complément de Schur, de la définition de $Y \triangleq GQ$ avec $Q \in \mathbb{R}^2$ une matrice hermitienne, l'application de $Q = P^{-1}$ et de pré- et post-multiplication par $diag\{I_2, I_2, Q\}$, il peut être démontré que cette dernière inégalité est satisfaite si

$$\Lambda \triangleq \begin{bmatrix} c & -1 & -Y \\ -1 & (2C-1)\Theta_1 & (2C-1)\Theta_2 Q \\ -Y^T & (2C-1)Q\Theta_2^T & (2C-1)Q \end{bmatrix} > 0 \tag{15}$$

B.3. Conception d'une commande robuste sous-optimale saturée

Dans un premier temps, nous visons à minimiser le signal de commande u_k ainsi que x_k, (i.e. q_k converge vers q_{ref}, le plus rapidement possible). Dans ce but, nous proposons de minimiser la fonction coût quadratique suivante :

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T \mathcal{Q} x_k + u_k \mathcal{R} u_k). \tag{16}$$

avec $\mathcal{Q} > 0$ et $\mathcal{R} > 0$, ce qui implique que J est strictement positive.

Ensuite, comme la période d'échantillonnage T_s est supposée constante, nous visons également à la conception de ce gain sous-optimal K pour la loi de commande (7) de telle sorte que le système (5) soit robuste face à l'incertitude des paramètres.

Lemme 3. *On suppose qu'il existe $\mathcal{Q} \in \mathbb{R}^2$, $\mathcal{R} \in \mathbb{R}$ et $P > 0$ associée à une fonction de Lyapunov V_k, tel que,*

$$V_{k+1} - V_k + x_k^T \mathcal{Q} x_k + u_k \mathcal{R} u_k < 0, \tag{17}$$

alors la fonction coût J est minimisée, et la stabilité du système est assurée.

Démonstration. En faisant la somme de l'inéquation (17) de $k = 0$ jusqu'à $k = \infty$, on obtient :

$$\begin{aligned} &\sum_{k=0}^{\infty} (V_{k+1} - V_k + x_k^T \mathcal{Q} x_k + u_k \mathcal{R} u_k) \\ &= V_\infty - V_0 + J < -V_0 + J < 0, \end{aligned}$$

ou autrement$J < V_0 \leq x_0^T P x_0$, alors la fonction coût quadratique J est minimisée, et la stabilité du système est assurée. □

Le paramètre incertain α_k donné ci-dessus est désormais pris en compte. On choisit les extrêmes de ce paramètre ($\alpha_k^{(j)} = 0, 1$ pour $j = \{1, 2\}$) comme sommets du polytope.

Ci dessous, une condition suffisante pour satisfaire le lemme 3 est calculée.

Théorème 1. *On considère le système (11) et la loi de commande $u_k = u_{k-1} + \alpha_k^{(j)} K x_k + (1 - \alpha_k^{(j)}) G x_k$ pour $\alpha_k^{(j)} \in [0, 1]$, où $K, G, S^{(j)} \in \mathbb{R}^{1\times 2}$. S'il existe $T, Y \in \mathbb{R}^{2\times 1}$ et $Q = P^{-1}, \mathcal{Q} \in \mathbb{R}^2$ avec $K = TQ^{-1}$, $G = YQ^{-1}$ et $\mathcal{R}, c, \mu > 0$ pour $j = 1, 2$ tel que*

$$\begin{aligned} min_K \ & c, \mu, \\ & P > 0 && (18) \\ & \Gamma_k^{(j)} < 0 \quad j = 1, 2, && (19) \\ & -\mu I_2 + Q^{-1} < 0 && (20) \\ & \Lambda > 0 && (21) \end{aligned}$$

étant $\Gamma_k^{(j)}$ définit dans (22) donnée en haut de la page suivante, sont satisfaites. Alors, pour toutes les conditions initiales de $\mathfrak{X}$, les états convergent asymptotiquement vers l'équilibre. Le système en boucle fermée (11) est non saturé, optimal et robuste face aux paramètres incertains.

Démonstration. L'objectif est de satisfaire $\Gamma_k^{(j)} < 0$ pour la stabilité asymptotique et la minimisation de J dans l'ensemble du polytope Υ_j.

Alors,

$$\begin{aligned} &V_{k+1}^{(j)} - V_k^{(j)} + x_k^T \mathcal{Q} x_k + u_k \mathcal{R} u_k = x_{k+1}^T P x_{k+1} \\ &- x_k^T P x_k + x_k^T \mathcal{Q} x_k + (u_{k-1} + K x_k)\mathcal{R}(u_{k-1} + K x_k) \\ &= x_k^T [\bar{A}^T P \bar{A} - P + \mathcal{Q} + (S^{(j)} + K)\mathcal{R}(S^{(j)} + K)] x_k \end{aligned}$$

où $\bar{A}^{(j)} \triangleq A + \alpha_k^{(j)} K^T + (1 - \alpha_k^{(j)}) G^T$ avec $j = 1, 2$ et $S^{(j)} \triangleq [T_s^{-1} - T_s^{-1}]$. En appliquant le complément de Schur et de pré- et post-multiplication par $\{Q_1, I_2, I_2, I_2\}$, il peut être établi que si $\Gamma_k^{(j)} < 0$ alors les conditions d'utilisation du lemme 3 sont satisfaites et la stabilité de la boucle fermée est garantie. D'autre part, en minimisant les $\mu > 0$, tel que, $P < \mu I_2$, permettent de réduire J. □

Le gain sous-optimal K, obtenu en appliquant le théorème 1 garantit à la fois la stabilité du modèle de communication, un contrôle du régime transitoire et de la QdS.

C. Simulations Matlab/NS2

Dans cette section, les gains de commande robuste pour un nœud ont été calculés et l'on cherche à

$$\Gamma_k^{(j)} \triangleq \begin{bmatrix} -Q & Q\bar{A}^{(j)^T} + (\alpha_k^{(j)} T^T + (1-\alpha_k^{(j)})Y^T)B^{(j)} & -Q & -\bar{A}^{(j)^T} + \alpha_k^{(j)} T^T + (1-\alpha_k^{(j)})Y^T \\ * & -Q & 0 & 0 \\ * & * & -\mathcal{Q}^{-1} & 0 \\ * & * & * & -(1+\mathcal{R})^{-1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

vérifier le gain énergétique sur un nœud élu. Pour valider cette approche, on prend une topologie simple formée par deux nœuds et une source, comme illustrée sur la figure 2.

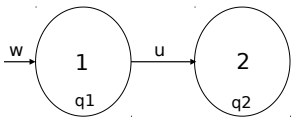

Figure 2 – Topologie simple

On choisit : $C = 25000 pqts/s$, $T_s = 0.05s$. En appliquant le Théorème 1, on obtient : $K_1 = -21$ et $K_2 = 20$, ainsi que $c = 0.078$, $\mu = 0.12$, $\Theta_{1_i} = 0.0003$, $\Theta_{2_i} = [-0.005 \quad 0.004]$ $G = \begin{bmatrix} -14.3 & 13.1 \end{bmatrix}$, $\mathcal{R} = 0.001$, $\mathcal{Q} = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix}$, $P = \begin{bmatrix} 0.08 & -0.05 \\ -0.05 & 0.06 \end{bmatrix}$.

Deux types de simulation, en utilisant $T_s = 0.05s$, ont été faites : d'abord, nous testons la loi de commande sous Matlab-Simulink ($C.1$), puis avec NS-2 ($C.2$). Notons que le module ECOFEN modifié n'est implémenté que sous NS-2.

Dans les Figures 3 et 5, l'évolution du trafic d'entrée généré par la source et le trafic de sortie calculée à partir de la loi de commande sont présentés. Ensuite, il est montré dans les Figures 4 et 6, la longueur de la file d'attente réelle avec celle de référence. En outre, le trafic du réseau n'est pas saturé, donc les pertes sont évitées.

La Figure 7 montre les puissances consommées sans et avec la loi de commande : on observe une amélioration significative de la consommation énergétique entre les instants $[0, 6.2]$ *secondes* qui représente 62% du temps total de simulation. Pendant cet intervalle de temps, on stocke les paquets dans la file d'attente (de taille q_{ref}), la dynamique du flux de sortie est au dessous de celle d'entrée (et sous un seuil énergétique) d'où la réduction de la consommation énergétique.

Pour l'intervalle $[6.2, 10]$ *secondes*, la taille de file d'attente libère les paquets déjà stockés d'où la dynamique du flux de sortie est au dessus de celle d'entrée ce qui entraîne une légère surconsommation énergétique.

Notons que le seuil minimal de la consommation énergétique pour le modèle ALR est $P_0 = 155\,Watts$, cette valeur est obtenue lorsqu'il n'y a pas du trafic qui passe par le nœud contrôlé ($w_n = 0\,Mb/s$). C'est une consommation minimale du nœud opérationnel sans trafic.

Dans la Figure 8, on voit clairement les deux phases du consommation énergétique. Au total la consommation d'énergie est améliorée de 12.2% (gain énergétique) sur le modèle ALR seul.

C.1. Simulation Matlab/Simulink

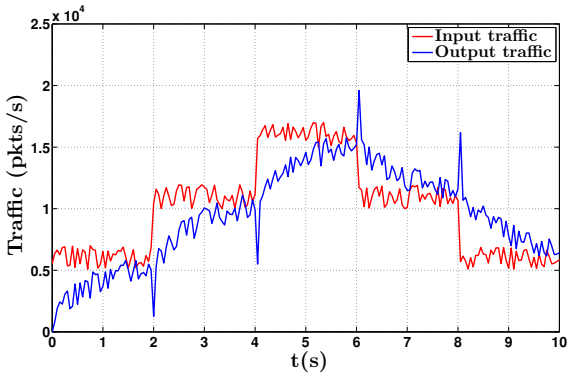

Figure 3 – Trafic d'entrée (rouge) et de sortie (bleu)

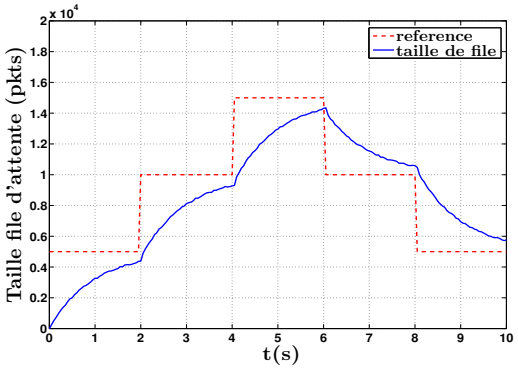

Figure 4 – Taille de file d'attente

C.2. Simulation NS2

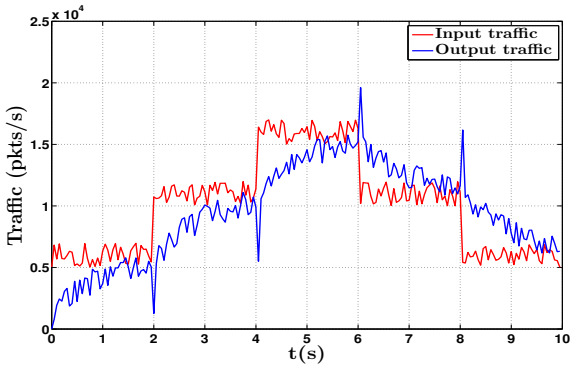

Figure 5 – Trafic d'entrée (rouge) et de sortie (bleu)

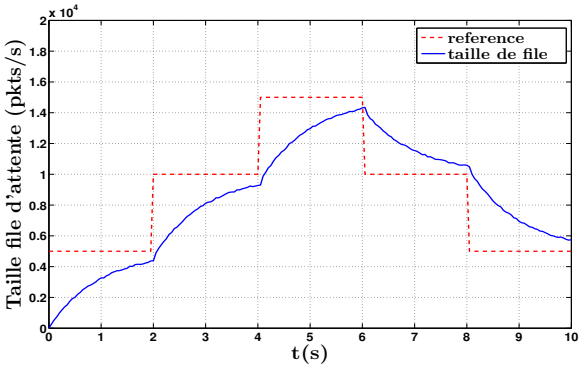

Figure 6 – Taille de file d'attente

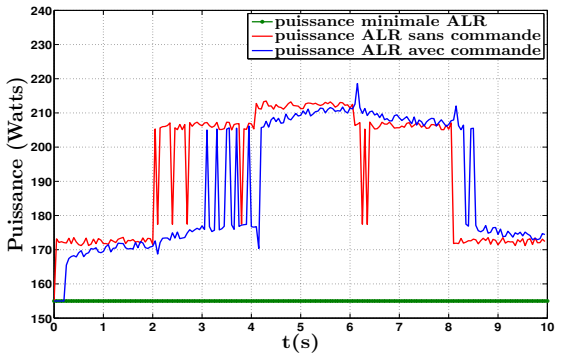

Figure 7 – Puissance consommée sans et avec commande de flux, sur le modèle ALR d'un nœud de communication

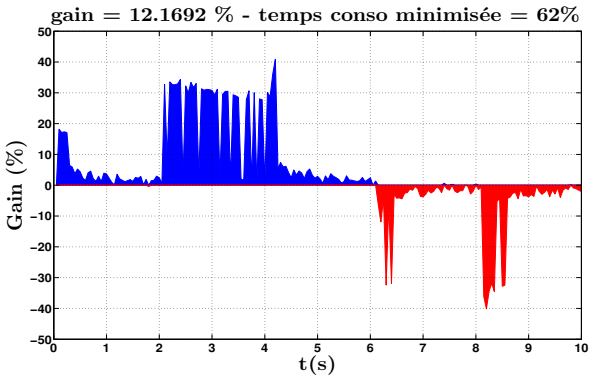

Figure 8 – Gain énergétique

D. Conclusion

Dans cet article, une solution alternative issue de la communauté Automatique permettant de réduire la consommation énergétique dans les réseaux filaires a été présentée. Le contrôleur a été développé à partir de la théorie de commande en tenant compte de la limitation de capacités des liens et la minimisation des coûts quadratiques afin d'assurer la stabilité d'un modèle de nœud de communication. Ce contrôleur permet de modifier la dynamique du flux traversant un nœud afin de rester sous des seuils énergétiques du modèle ALR tout en garantissant la QdS. Des simulations sous Matlab-Simulink et NS-2 valident cette loi de commande et confirment le gain énergétique. Un travail supplémentaire sur le délai et l'optimisation des paramètres (β, γ) est envisagé.

Références

[1] Carolina Albea, Francisco Gordillo, and Carlos Canudas De Wit. Robust saturated control for low-power circuits. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 21(2) :530–537, 2013.

[2] E. Amaldi, A. Capone, and L. Gianoli. Energy-aware IP traffic engineering with shortest path routing. *Computer Networks*, page 1503–1517, 2013.

[3] Y. Ariba, Y. Labit, and F. Gouaisbaut. Congestion control of a single routerwith an active queue management. *International Journal on Advances in Internet Technology*, 2(1) :58–67, 2009.

[4] A.P. Bianzino, C. Chaudet, D. Rossi, and J. Rougier. A survey of green networking research. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 14(1) :3–20,

First 2012.

[5] L. Ceuppens, A. Sardella, and D. Kharitonov. Power saving strategies and technologies in network equipment opportunities and challenges, risk and rewards. *Applications and the Internet, 2008. SAINT 2008. International Symposium on*, page 381–384, 2008.

[6] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsiang, and S. Wright. Power awareness in network design and routing. *in INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications*, page 457–465, 2008.

[7] K. Fall and K. Varadhan. The ns manual. notes and documentation on the software ns2-simulator, 2002. URL : www.isi.edu/nsnam/ns/.

[8] E. Fridman, A. Pila, and U. Shaked. Regional stabilization and H_∞ control of time-delay systems with saturating actuators. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 13(9) :885–907, 2003.

[9] C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, and S. Suen. Reducing the energy consumption of ethernet with adaptive link rate (alr). *Computers, IEEE Transactions on*, 57(4) :448–461, April 2008.

[10] T. Hu and Z. Lin. *Control systems with actuator saturation : analysis and design*. Birkhauser, 2001.

[11] J. Jimenez, R. Estepa, A. Estepa, Rubio F.R., and F. Gómez-Estern. Energy efficiency and quality of service optimization for constant bit rate real-time applications in 802.11 networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2012.

[12] M. Jimeno, K. Christensen, and B. Nordman. A network connection proxy to enable hosts to sleep and save energy. *in Performance, Computing and Communications Conference, 2008. IPCCC 2008*, page 101–110, 2008.

[13] JG Koomey. Worldwide electricity used in data centers. *Environ. Res. Lett. 3 034008*, 2008.

[14] S. Mascolo. Congestion control in high-speed communication networks using the smith principle. *Automatica*, 35(12) :1921–1935, 1999.

[15] A.C. Orgerie, L. Lefèvre, and I. Guérin-Lassous. Energy-efficient bandwidth reservation for bulk data transfers in dedicated wired networks. *The Journal of Supercomputing*, pages 1–28, 2011.

[16] Rayadurgam Srikant. *The mathematics of Internet congestion control*. Springer, 2004.

[17] W. Vereecken, W. Van Heddeghem, M. Deruyck, B. Puype, B. Lannoo, W. Joseph, D. Colle, L. Martens, and P. Demeester. Power consumption in telecommunication networks : overview and reduction strategies. *Communications Magazine, IEEE*, 49(6) :62–69, June 2011.

[18] Zhibo Zhang, Andrew S. Ackerman, Graham Feingold, Steven Platnick, Robert Pincus, and Huiwen Xue. Effects of cloud horizontal inhomogeneity and drizzle on remote sensing of cloud droplet effective radius : Case studies based on large-eddy simulations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 117(D19) :n/a–n/a, 2012.