

Du canal de communication à la problématique des systèmes commandés par réseaux.

Emmanuel WITRANT, Didier GEORGES et Carlos CANUDAS DE WIT

Laboratoire d'Automatique de Grenoble, UMR CNRS 5528
ENSIEG-INPG, B.P. 46, 38 402, Saint Martin d'Hères, FRANCE

[witrant, georges, ccanudas]@lag.ensieg.inpg.fr
<http://www.lag.ensieg.inpg.fr/canudas/necs>

Résumé— Les systèmes commandés par réseaux constituent un nouveau sujet d'étude en automatique, notamment du fait de la présence d'un canal de communication entre le système et la loi de commande. La présence de ce canal, souvent négligée, induit une modification du signal qui doit être prise en compte pour pouvoir contrôler des systèmes à dynamique rapide ou nécessitant un haut niveau de performances. Cet article a pour but de donner un bref aperçu des problématiques liées aux systèmes commandés par réseau, après quelques rappels sur les canaux de communication et les modèles de protocoles.

Mots-clés— Canal de communication, modèles de réseaux, systèmes commandés par réseaux.

INTRODUCTION

La commande des systèmes par réseau ("NeCS : Networked Control Systems") constitue une thématique de recherche actuellement en plein essor [1]. Cet essor est directement lié au développement spectaculaire des réseaux de communications dans tous les secteurs industriels : on peut citer particulièrement le domaine de la production manufacturière et des procédés ou systèmes complexes (contrôle-commande distribué de réseaux de transport ou d'énergie par exemple) ou encore les applications embarquées (automobile, aéronautique). On peut également citer le développement de systèmes télé-opérés (drones notamment). Toutes ces applications reposent fortement sur la notion de canal de communication. Nous allons examiner dans cet article la manière de faire le lien entre la problématique de la commande et celle des communications, tout en faisant le point sur la littérature disponible. Une première partie de cet article est consacrée aux modèles du canal physique de communication. Nous considérerons dans une seconde partie le problème de la modélisation des protocoles correspondant à trois types de réseaux standard (CAN, LAN et WAN). Enfin une troisième partie de cet article est consacrée à une présentation des principales problématiques NeCS, qui met en avant la nécessité d'une approche pluridisciplinaire dans ce domaine.

I. MODÈLES DE CANAL DE COMMUNICATION

Le canal de communication est envisagé de différentes façons selon le domaine d'application dans lequel il est utilisé. Dans le cadre de la théorie de l'information, celui-ci est considéré comme une source de corruption de l'information. Ainsi la communication de données binaires s'effectue, en prenant comme exemple un modèle de type *Shannon*-

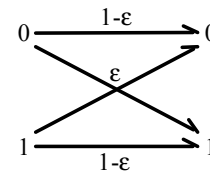


Fig. 1. Modèle de type *Shannon-Weaver*.

Weaver [2], avec une corruption de donnée de probabilité ϵ . Ceci signifie qu'un 0 émis a une probabilité de $1 - \epsilon$ de conduire à la réception d'un 0 et une probabilité de ϵ de conduire à la réception d'un 1, comme illustré dans la figure 1. Une autre approche, plus fréquemment utilisée dans le cadre de l'automatique, consiste à considérer le canal comme une source de retard dans la communication. La transmission est supposée fidèle et le problème de modélisation revient à établir le modèle de retard le plus proche de celui subi par les données.

Les modèles de canal de communication peuvent aussi être différenciés selon la nature de la transmission, qui peut être digitale (paquets d'information) ou continue. Notons qu'un modèle de transmission continue n'exclut pas le fait que les données soient émises par paquets mais suppose plutôt que le conditionnement des données (algorithmes d'émission, de gestion du flux et de réception) est inclus dans le modèle du canal de communication. Dans ce cas et pour l'exemple d'un système physique commandé par réseau, le capteur envoie un flux continu de données vers l'encodeur (qui émet l'information sur le réseau) et l'actionneur reçoit un flux continu du décodeur. Nous considérons ici le canal de communication comme une source de retard pour un flux continu de données.

Quatre modèles élémentaires de canal de communication, où le retard apparaît comme élément prédominant, sont présentés ici. Le premier est celui de la ligne de transmission sans pertes, basé sur les propriétés physiques de la ligne, qui conduit à modéliser le canal comme une impédance et un retard constants. Le second est une ligne de transmission non homogène, induisant un retard et une impédance variables. La troisième approche considère le canal comme un retard pur, variable et discret. Le dernier modèle (aussi basé sur un retard pur) décrit quand à lui le réseau de communication comme un ensemble d'états, chacun étant caractérisé par une distribution spécifique de retards.

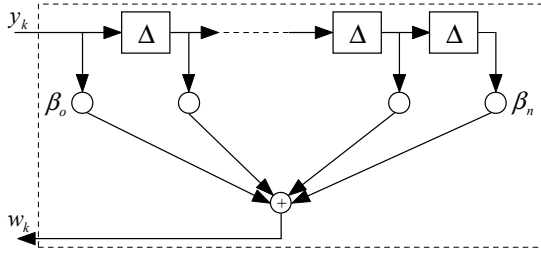


Fig. 2. Modèle de retard variable.

A. Ligne de transmission idéale

Une ligne de transmission idéale est une ligne sans pertes, uniforme dans l'espace et avec des paramètres indépendants de la fréquence (une description précise de différents types de lignes de transmission est proposée dans [3]). Ses caractéristiques sont décrites par les équations du télégraphe

$$C \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} = - \frac{\partial i(t, x)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v(t, x)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(t, x)}{\partial t}$$

où v indique la tension, i le courant, $x \in [0, d]$ la position, d la longueur totale de la ligne. L et C sont, respectivement, l'inductance et la capacitance caractéristique par unité de longueur de la ligne de transmission. Ces équations ont une solution unique si les conditions initiales de tension et de courant, ainsi que deux conditions limites (par exemple les variables électriques aux extrémités de la ligne) sont spécifiées. Ce modèle représente un canal de transmission à délai constant $\tau = d\sqrt{L/C}$, subi par les variables électriques v et i lors de leur passage sur la ligne.

B. Ligne de transmission non homogène

D'autres modèles de ligne plus complets ont été développés, mais leur complexité rend leur utilisation peu fréquente lors de la synthèse de lois de commande. Le principal inconvénient du modèle idéal précédent, pour représenter un réseau de communication, est qu'il ne prend pas en compte les perturbations externes sur le flux de données, induites par la présence d'utilisateurs multiples sur le réseau, ni le codage de l'information (multiplexage analogique, codage numérique, compression). Nous avons développé, lors d'un travail en collaboration avec l'Université de Twente [4], un modèle de ligne de transmission non homogène mettant en évidence les effets de résonance induits par des variations paramétriques. Ce travail illustre comment une ligne de transmission peut être source de retard variable dans le temps.

C. Système à retard variable

D'autres approches considèrent le canal de transmission comme un retard variable dans le temps (celui-ci étant la principale source d'instabilité du système). Le retard peut alors être caractérisé par un modèle déterministe, une distribution probabiliste ou encore une chaîne de Markov. Ce dernier exemple est étudié dans [5] et induit le modèle de retard présenté dans la figure 2. La chaîne de Markov est utilisée pour fixer l'un des β_i à un, les autres valant zéro, ce qui permet de permuter entre les différentes valeurs du

retard. Le signal échantillonné y_k est ainsi retardé d'un nombre d'échantillons $i\Delta$ du fait du β_i non nul. Le système distant reçoit le signal w_k .

D. Ensemble de modèles

Le réseau de communication peut être aussi considéré comme un système ayant différents modes de fonctionnements, en fonction de la quantité d'information qu'il doit gérer. Dans ce cas, différents modèles peuvent être appliqués selon l'état global du réseau. Ainsi dans [6] le réseau est modélisé en utilisant une chaîne de Markov à multiples états, pour lesquels l'état r_k correspond à la charge du réseau (distribution probabiliste du retard de transmission). La probabilité de distribution pour r_k peut ensuite être établie en utilisant une matrice de transition, la probabilité de l'état et le vecteur de distribution de l'état du modèle de Markov. Cette approche peut être étendue plus largement en introduisant d'autres variables physiques (comme l'impédance) dans l'état.

II. MODÈLES DE PROTOCOLES

Les modèles de protocoles sont difficiles à établir, l'interaction entre les différents utilisateurs ne pouvant être prédite. Néanmoins, des résultats concernant des modèles moyens permettent de comprendre les principaux processus mis en jeux et de mettre en valeur les propriétés principales des réseaux. Deux exemples de réseaux locaux (souvent dénommés LAN, pour Local Area Networks) et un de réseau longue distance sont présentés, illustrant les principaux réseaux de communication utilisés dans l'industrie.

A. Réseau de terrain : le CAN

Le bus de terrain CAN (Controller Area Network), fréquemment utilisé dans l'industrie (notamment automobile avec le VAN, qui est un exemple spécifique de CAN utilisé pour les contrôleurs électroniques des véhicules motorisés), est caractérisé par l'utilisation de niveaux de priorité pour l'émission des messages (2^{29} niveaux). Son débit est au maximum de 1Mbit/s, pour une longueur de 40m. Un noeud peut émettre à tout instant si le bus est silencieux mais c'est le message à plus haut niveau de priorité qui a l'accès au bus (au travers du contrôleur central du bus) si deux noeuds tentent d'émettre au même instant. Le délai de transmission induit par ce système a été étudié dans [6], où il est décomposé comme la somme de trois retards : le temps d'attente de fin de l'émission en cours, le temps d'attente que les messages à priorité supérieure soient émis, et le temps de transmission du message considéré. Des résultats expérimentaux ont montré que des fonctions de densité probabiliste sont suffisantes pour établir des modèles simples, mais qu'un modèle de Markov peut être utilisé pour des représentations plus complexes.

B. Réseau informatique : Ethernet

Ethernet constitue un exemple courant de réseau LAN en bus, sans contrôleur centralisé. L'accès au bus peut être effectué par protocole à détection de porteuse (CSMA - Carrier Sense Multiple Access) avec détection de collision (CD - Collision Detection). Des progrès technologiques récents ont permis le développement de l'Ethernet commuté, décrit ici (l'Ethernet partagé étant quasiment abandonné).

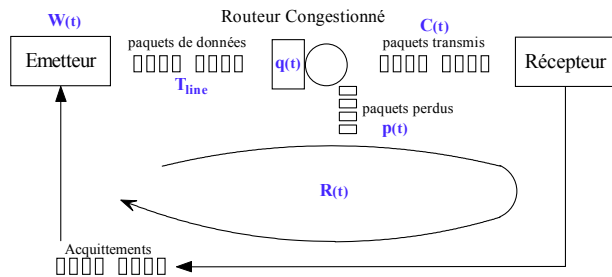


Fig. 3. Exemple de flux dans un réseau comportant un routeur.

La topologie en étoile du réseau est dans ce cas centrée sur un commutateur, qui filtre et oriente les données en fonction des adresses de l'émetteur et du récepteur. Une fois que la correspondance entre une machine et un port spécifique est identifiée, le commutateur oriente les messages vers le port spécifique uniquement, permettant ainsi la libre circulation sur les autres ports.

Le problème de collision lié à l'internet partagé est ainsi transformé en un problème de congestion, qui peut être modélisé par la théorie du calcul réseau afin d'obtenir des bornes sur les délais induits.

C. Réseau longue distance : Protocole de transfert

Les réseaux grande distance ou WAN (Wide Area Network) sont caractérisés par la présence d'un ou plusieurs routeurs et de commutateurs, qui gèrent et distribuent l'information. La principale influence du routeur est d'induire une file d'attente où sont stockés les messages avant d'être retransmis. Notons que ce problème apparaît également dans les LAN, où les commutateurs sont de plus en plus utilisés. Lorsque les flux d'entrée dans le routeur sont trop importants, celui-ci devient congestionné et des paquets d'information sont perdus. L'émetteur peut être informé des paquets reçus par l'envoi d'acquittements (acknowledgements) par le destinataire. Un flux de données passant par un routeur est présenté dans la figure 3. Un modèle moyen déterministe du retard est disponible pour différents types de réseaux, notamment pour ceux à file d'attente [7].

Le protocole de contrôle de transfert TCP (Transfer Control Protocol) est un exemple classique de protocole utilisé dans les réseaux longue distance et LAN, mis en place aux deux extrémités du canal de communication afin de permettre aux utilisateurs d'émettre et de recevoir des données aux travers d'internet. C'est un protocole dit *sécurisé*, dans le sens où tout paquet perdu est réémis. Son objectif principal est de maximiser le taux de transmission de l'utilisateur en ajustant la taille de la fenêtre d'émission de l'utilisateur en fonction de la congestion du réseau, exprimée par le nombre de paquets perdus. Bien que le TCP ne soit pas un protocole de premier choix pour la synthèse d'une commande par réseau (faible qualité de service, notée QoS par la suite), il fournit un exemple intéressant de protocole sécurisé pour lequel des modèles moyens continus ont été développés [8], [9].

Par exemple, un modèle de type flux de fluide du TCP a été développé dans [8] en utilisant des équations différentielles de Poisson. Ce modèle considère N flux TCP (indexés par $i = 1, \dots, N$) qui transitent par un routeur de capacité C . Chaque flux est caractérisé par le temps

d'aller-retour R_i et par la taille de la fenêtre d'émission d'espérance $W_i(t)$. Au niveau du routeur, la dynamique de la file d'attente est exprimée par la longueur de file d'attente d'espérance $q(t)$ et par la longueur moyenne de file d'attente d'espérance $x(t)$. Une politique de gestion active de la file telle que l'AQM (Active Queue Management) est introduite avec la fonction de perte de paquets $p(x)$. Cette fonction correspond à la probabilité de marquage des paquets qui seront considérés comme perdus. Les équations dynamiques décrivant le TCP s'écrivent alors

$$\frac{dW_i(t)}{dt} = \frac{1}{R_i(q)} - \frac{W_i(t)W_i(t - R_i(q))}{2R_i(q(t - R_i(q)))} p(x(t - R_i(q)))$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{\ln(1 - \alpha)}{\delta} x(t) - \frac{\ln(1 - \alpha)}{\delta} q(t)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} \approx -C + \sum_{i=1}^N \frac{W_i(t)}{R_i(q)}, \quad R_i(q) = \frac{q}{C} + T_{pi}$$

où T_{pi} est le retard constant induit par la ligne de transmission, α est une constante de pondération comprise entre 0 et 1, et δ est la période d'échantillonnage. Nous avons utilisé ici l'hypothèse courante que le temps mis par l'information de perte de paquet (émise par le routeur) pour atteindre la source émettrice est assimilable à $R_i(t)$. Le contrôle d'un tel modèle peut s'effectuer au niveau du routeur en choisissant une politique AQM appropriée (par la définition de $p(x)$).

Une extension du modèle précédent prenant en compte les fonctions de routage du WAN de manière plus globale pourrait être considérée au travers de la dynamique de la file d'attente $q(t)$.

D'autres modèles de réseaux, plus généraux, ont été développés afin d'assurer une meilleure QoS. Tout d'abord, une étude détaillée de l'influence des différentes couches réseau sur la QoS et des performances attendues résultantes est proposée dans [10]. Une modélisation de type compartiments est proposée dans [11] pour la description d'un réseau à commutateur. Ce modèle, dit de saux percés à jetons, est utilisé dans la construction de lois de commande de proche en proche garantissant la stabilité globale du réseau. Un modèle étendu, comprenant les systèmes commandés par réseau et le réseau lui-même, est développé dans [12]. Dans ce cas, l'analyse de stabilité est effectuée en utilisant la théorie des systèmes commutés.

Les différents modèles présentés dans cette section peuvent être interprétés dans le cadre de la théorie de l'information (perte de qualité de transmission de données) ou dans celui des systèmes à retard. Comme indiqué lors de la présentation des protocoles, où nous avons insisté sur la nature du retard induit, nous positionnons le problème de stabilisation par l'intermédiaire d'un réseau de communication dans le cadre de la transmission avec retard.

III. PROBLÉMATIQUES NECS

La présence d'un réseau dans la boucle de commande induit de nombreuses problématiques spécifiques telles que :

- la quantification du signal lors de l'émission/réception des paquets d'information,
- la compression/décompression des informations transisant par le réseau,

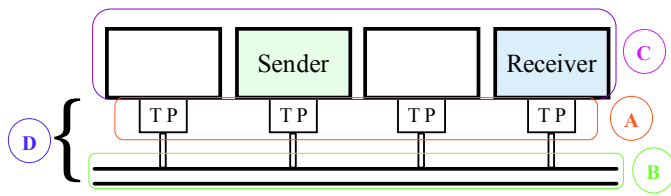


Fig. 4. Problématiques liées au réseau.

- la perte de paquets due à la congestion du réseau,
- la gestion du trafic par le routeur afin de garantir la stabilité ou la performance du système considéré lors de la congestion,
- la stabilisation des systèmes en présence de retard,
- la prise en compte de la bande passante disponible (dépendante de l'état d'occupation du réseau) lors de la synthèse du contrôleur.

Nous pouvons classer ces problèmes selon la partie du réseau concerné comme illustré dans la figure 6, où les indices alphabétiques correspondent aux sous-sections suivantes. Chacun de ces points faisant l'objet d'une formulation et d'une voie de recherche spécifique, nous nous contenterons d'en donner un bref aperçu sans prétention d'exhaustivité. Notons qu'une autre classification, plus globale, distingue le contrôle des réseaux de la commande par réseau.

A. Quantification et codage

Les problèmes de quantification et de codage sont liés à la théorie de l'information; ils apparaissent lors de la conversion d'un signal de mesure physique en unités d'information transmises au réseau (élaboration de l'alphabet, quantification, compression...). Le problème du codage des données pour l'émission sur un réseau de communication est considéré dans [13], et fait plus généralement partie de la problématique de la commande avec information limitée. Dans ce cadre, des résultats ont été obtenus sur le lien entre la longueur de mots composant l'alphabet et la période d'échantillonnage admissible [14], sur les effets chaotiques induits par l'approximation en utilisant des longueurs de mots finies [15], ou encore sur les effets de la quantification de l'état sur la stabilisation d'un système instable en boucle ouverte [16].

Les problèmes liés à la quantification ont été abordés dans le cadre de l'automatique avec notamment la stabilisation par commande quantifiée [17] utilisée afin de conduire le système vers un ensemble invariant autour de l'équilibre [18], la synthèse de quantificateurs pour systèmes à données échantillonnées [19], et une approche probabiliste pour la stabilisation de systèmes quantifiés [20]. Nous pouvons aussi considérer le problème de l'échantillonnage à période variable (cette variation étant induite par le réseau) combiné à un retard variable : une formulation continue de ce problème ainsi qu'une solution de stabilisation type LMI est proposée dans [21]. Pour finir, des méthodes de synthèse de l'encodeur et du décodeur permettant de répondre à des objectifs de commande classique sont proposées dans [22], où les systèmes de commande linéaire stochastique sont considérés et où l'influence du canal de communication sur

le problème de synthèse LQG est établie, et dans [23] où le codage différentiel par Delta-Modulation est utilisé.

B. Congestion et perte de paquets

La perte de paquets et la congestion du réseau apparaissent dans les réseaux à file d'attente (routeur ou commutateur) lorsque le flux de données est trop important. La gestion de la file d'attente s'effectue par le protocole mis en place au niveau du routeur, qui détermine de quelle manière les paquets sont rejetés (pour l'AQM par exemple, le nombre de paquets rejetés est proportionnel à la longueur de la file lorsqu'une certaine longueur de référence est atteinte). Le contrôle de congestion fait l'objet de nombreux travaux dans le domaine de l'informatique [24], [25] et la stabilité du réseau résultant d'un choix particulier de fonction de rejet de paquets peut être étudiée (voir [26] pour l'exemple TCP/AQM). Le cas du contrôle de la file en prenant en compte l'état de congestion est étudié en détail dans [27].

Lorsqu'un paquet est perdu, il peut être réémis (par exemple, dans le cas du TCP) ou non (UDP...). Dans le second cas, l'analyse de stabilité du système commandé par réseau inclut la considération de perte d'information et ne peut être effectuée par les approches continues. Ainsi dans [28] un principe de seuil d'incertitude est utilisé pour déterminer le taux de perte de paquets pour lequel le système bouclé non perturbé reste stable au sens des moindres carrés (l'espérance de la norme de l'état au carré est nulle en l'infini). D'autres résultats [29] proposent la synthèse d'un compensateur optimal de pertes, utilisant les informations passées, qui est obtenu par obtention d'un contrôleur contraint généralisé. Pour finir, ce problème peut aussi être abordé en utilisant la théorie des jeux [30], où l'unicité de l'équilibre de Nash est utilisée pour obtenir la garantie de stabilité, sous certaines conditions de variation faible pour les flux agrégés par rapport aux retards induits.

C. Allocation de ressources et limite de bande passante

La présence sur le réseau de multiples utilisateurs suppose un partage et une redistribution des ressources, ainsi qu'une limite de la bande passante disponible pour chacun des émetteurs. La bande passante minimum garantie détermine la qualité de service (QoS) assurée par le réseau. Celle-ci dépend de la gestion du réseau ainsi que de celle des émissions, effectuées par le contrôleur centralisé (par exemple au niveau du routeur). Le problème d'allocation de ressources est classiquement abordé en mathématiques discrètes afin d'illustrer les solutions par programmation linéaire; nous ne verrons ici que quelques exemples d'approches orientées automatique appliquées à des réseaux sans fil (donc à ressources plus limitées).

L'analyse d'allocation de capacité dans un réseau Bluetooth (communication radio à courte distance pour systèmes mobiles) est formulée comme un problème d'optimisation convexe dans [31], où une loi hybride de distribution de capacité est proposée. La QoS pour les réseaux locaux sans fil (WLAN, pour Wireless Local Area Network) répondant à la norme IEEE 802.11x (version sans fil de réseau Ethernet) avec une méthode d'accès par fonction de coordination hybride est assurée dans [32]. L'algorithme proposé prend en compte le retard induit par la file d'attente dési-

rée et utilise une loi de commande par retour d'état proportionnel, les perturbations étant compensées par action anticipative. Le concept de *réseau sous-jacent* est utilisé dans [33] afin de considérer plus généralement les réseaux sans fil avec architecture IP (Bluetooth, IEEE 802.11, Hyperplan II, UMTS, GPRS). Un module de commande de circulation incluant des buffers avec un contrôleur gérant les datagrammes IP entrant et sortant est inséré au niveau de l'interface aérienne afin d'assurer un équilibre idéal garantissant les performances requises.

Une approche plus générale considère la commande sous contraintes de communication, où la commande s'effectue de manière distribuée sur le réseau et où un critère de *complexité de l'information* est défini [34]. Un autre résultat d'intérêt majeur est proposé dans [35], [36], où la notion appelée *anytime capacity* est définie pour introduire une nouvelle qualité paramétrique du canal de communication, permettant de prendre en compte la présence de bruit. La richesse de l'information peut ainsi intervenir directement dans la synthèse de loi de commande.

Pour une QdS garantie, la contrainte de bande passante peut être prise en compte lors de la synthèse du contrôleur dédié au système commandé à travers le réseau. Dans ce cadre, une solution au problème d'estimation de l'état est proposée dans [37], où le concept de séquence réursive finie pour le codeur-estimateur est introduit et la convergence de l'algorithme d'estimation est proposée. Le problème de stabilisation avec information limitée est abordé dans [38] avec l'introduction d'un critère moins contraignant que celui de la stabilité classique : la *contenabilité*, proche de la stabilité pratique. Un système de communication commandé est *contenable* si pour toute sphère N centrée sur l'origine il existe un environnement ouvert centré sur l'origine M et un codage et une loi de commande tels que toute trajectoire partant de M reste dans N pour tout temps. Cette notion diffère de la stabilité classique du fait que M est un sous-ensemble de N . Le résultat proposé permet de relier contenabilité, taux de transfert de données et variation de l'état.

D. Présence de retards

Un élément fondamental induit par la présence du réseau dans la boucle de commande est la présence de retards entre les capteurs et la commande, et entre la commande et les actionneurs. Ceci conduit à une représentation du système telle que présentée dans la figure 7, où deux retards $\tau(t)$ et $\tau_1(t)$ apparaissent sur les canaux de communication. Ainsi la classe de systèmes étudiée peut être décrite par les équations suivantes

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau(t)), & x(0) &= x_0 \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

où $x \in R^n$ est l'état interne du système, $u \in R^l$ est l'entrée de commande, $y \in R^m$ est la sortie mesurée, et A , B , C sont des matrices aux dimensions appropriées. Le retard induit par le réseau apparaît ici au niveau de l'entrée de commande du système avec le terme temps-variant $\tau(t)$.

La commande des systèmes à retard constitue un sujet très vaste [39], [40], [41] et nous n'en donnerons qu'un bref

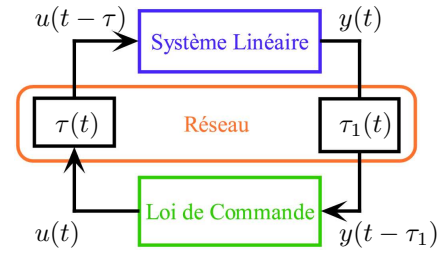


Fig. 5. Représentation du réseau comme un retard.

aperçu. La plupart des analyses de stabilité classiques (en utilisant les fonctions de Lyapunov-Krasovskii et Lyapunov-Rasumikhin par exemple) considèrent un retard constant ou de borne connue. Le retard constant peut être compensé à l'aide d'un prédictor de Smith [42] ou plus généralement un prédictor d'état à horizon fixe [43], [44]. Le cas des retards temps variant ou dépendant de l'état peut être abordé avec les solutions présentées dans [45] lorsque le système est stable en boucle ouverte. De manière plus générale, une méthode constructive de stabilisation robuste basée sur une transformation descriptive du modèle (dénommée *descriptor model method*) est appliquée au cas des retards temps variants dans [46]. Une étude détaillée de l'utilisation du prédictor d'état à horizon variable, permettant l'utilisation explicite d'un modèle dynamique du réseau dans la loi de commande, a été effectuée dans [47]. Cette approche permet d'obtenir des performances supérieures aux autres méthodes du fait de l'utilisation maximale des données disponibles et une étude de robustesse vis-à-vis d'une incertitude sur le modèle du retard en établit les limites [48]. Pour clore ce bref aperçu sur les systèmes à retard, des approches stochastiques ont aussi été développées, considérant le retard induit par le réseau comme une distribution probabiliste ou une chaîne de Markov [6], ou comme une combinaison d'éléments déterministes (fournis par un modèle moyen) et stochastiques [49].

IV. CONCLUSION

Nous avons fait un tour d'horizon de la problématique des systèmes commandés par réseau. Nous avons insisté sur les problèmes fondamentaux qui caractérisent ce domaine relativement nouveau des "Networked Control Systems". Nous avons montré la nécessité d'une approche pluridisciplinaire intégrant la théorie de la commande de systèmes dynamiques en présence de retard ou de pertes d'information, la théorie de l'information lorsque celle-ci est codée ou compressée et enfin la nécessité de prendre en compte des modèles de composants ou de protocoles de communication.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean-Pierre Richard et Rodolphe Sélulchre pour leur lecture attentive de la version initiale de ce document, ainsi que Guy Juanole, pour ses remarques concernant les modèles de protocoles. Nous sommes également reconnaissants envers le projet NECS-CNRS pour le financement partiel de ce travail de recherche.

RÉFÉRENCES

- [1] W. Halang, R. Sanz, R. Babuska, et H. Roth. Information and communication technology embraces control. *Selected Plenaries, Milestones and Surveys of IFAC Word Congress 2005*, Prague, Czech Republic, July 2005.
- [2] C.E. Shannon et W. Weaver. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, 1949.
- [3] G. Miano et A. Mafucci. *Transmission Lines and Lumped Circuits*. Academic Press Series in Electromagnetism, 2001.
- [4] E. Witrant, A. van der Schaft, et S. Stramigioli. A passive model for a non-homogeneous transmission line. *Sub. to IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intel. Rob. and Sys.*, 2006.
- [5] R. Krtoľica, Ü. Özgüner, H. Chan, H. Göktaş, J. Winkelman, et M. Liubakka. Stability of linear feedback systems with random communication delays. *Int. Jour. of Control*, 59 :4 :925– 953, 1994.
- [6] J. Nilsson. *Real-Time Control Systems with Delays*. Ph.d. thesis at the dep. of auto. control, Lund Inst. of Tech., Sweden, 1998.
- [7] D. Gross et C. M. Harris. *Fundamentals of Queueing Theory (3rd ed.)*. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [8] V. Misra, W.-B. Gong, et D. Towsley. Fluid-based analysis of a network of aqm routers supporting tcp flows with an application to red. *Proc. of ACM SIGCOMM'00*, Stockholm, Sweden, September 2000.
- [9] Steven H. Low, Larry L. Peterson, et Limin Wang. Understanding TCP vegas : a duality model. *SIGMETRICS/Performance*, pages 226–235, 2001.
- [10] G. Juanole et G. Mouney. Qos in real time distributed systems and process control applications. *1st Work. on Networked Control System and Fault Tolerant Control*, Ajaccio, France, 2005.
- [11] H. Mounier et G. Bastin. A compartmental approach to congestion control in communication networks. *Proc. of the 8th Int. Conf. on Adv. in Comm. and Cont.*, Rithymna Beach, Crète (Greece), 2001.
- [12] S. Mastellone et C. Abdallah. Networked control systems and communication networks : integrated model and stability analysis. *Proc. of the 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, July 4–8, 2005.
- [13] M. Alamir et C. Commaut. A new equal-partition measurement encoding scheme for networked control systems. *Proc. of the 2004 NOLCOS Symp. on Nonl. Cont. Sys.*, Stuttgart, Germany, 2004.
- [14] D. Williamson. Finite wordlength design of digital kalman filters for state estimation. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, 30 :930–939, 1990.
- [15] T. Ushio et C. S. Hsu. Chaotic rounding error in digital control systems. *IEEE Trans. Circ. and Sys.*, 34 :133–139, 1987.
- [16] D. F. Delchamps. Stabilizing a linear system with quantized state feedback. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, 35 :916–924, 1990.
- [17] R. Brockett et D. Liberzon. Quantized feedback stabilization of linear systems. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, 45 :1279–1289, 2000.
- [18] B. Picasso et A. Bicchi. Stabilization of lti systems with quantized state-quantized input static feedback. A. Pnueli et O. Maler, editors, *Hybrid Systems : Computation and Control*, volume LNCSE 2623 of *Lect. Notes in Comp. Science*, pages 405–416. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2003.
- [19] H. Ishii et T. Basar. Remote control of lti systems over networks with state quantization. *Systems & Control Letters*, 54 :15–31, 2005.
- [20] H. Ishii, T. Basar, et R. Tempo. Randomized algorithms for quadratic stability of quantized sampled-data systems. *Automatica*, 40 :839–846, 2004.
- [21] E. Fridman, A. Seuret, et J.-P. Richard. Robust sampled-data stabilization of linear systems : an input delay approach. *Automatica*, 40, no.8 :1441–1446, 2004.
- [22] S. Tatikonda, A. Sahai, et S. Mitter. Stochastic linear control over a communication channel. *IEEE Trans. on Auto. Control, Special Issue on Net. Cont. Sys.*, 49 (9) :1549–1561, September 2004.
- [23] C. Canudas de Wit, F. Rubio, J. Fornes, et F. Gomez-Estern Aguilar. Differential coding in networked controlled linear systems. *Am. Cont. Conf.*, Minneapolis, Minnesota (USA), June 2006.
- [24] S. Mascolo. Congestion control in high-speed communication networks using the smith principle. *Automatica*, 35(12) :1921–1935, December 1999.
- [25] S. H. Low, F. Paganini, et J. C. Doyle. Internet congestion control. *IEEE Control Syst. Mag.*, 22(1) :28–43, February 2002.
- [26] C. V. Hollot et Y. Chait. Nonlinear stability analysis for a class of tcp/aqm networks. *Proc. of the 40th IEEE Int. Conf. on Dec. and Cont.*, Orlando, Florida, USA, December 2001.
- [27] N. Van Foreest. *Queues with Congestion-dependent Feedback*. Ph.d. thesis at the faculty of mathematical sciences, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2004.
- [28] B. Azimi-Sadjadi. Stability of networked control systems in the presence of packet losses. *Proc. of the 42nd IEEE Conf. on Dec. and Cont.*, Maui, Hawaii USA, December 2003.
- [29] Q. Ling et M. D. Lemmon. Optimal dropout compensation in networked control systems. *Proc. of the 42nd IEEE Conf. on Dec. and Cont.*, Maui, Hawaii USA, December 2003.
- [30] T. Alpcan et T. Başar. Global stability analysis of an end-to-end congestion control scheme for general topology networks with delay. *Proc. of the 42nd IEEE Conf. on Dec. and Cont.*, Maui, Hawaii USA, December 2003.
- [31] L. T. Son, H. Schiöler, et O. B. Madsen. Hybrid distributed iterative capacity allocation over bluetooth network. *8th IEEE Int. Conf. on Comm. Sys. (ICCS2002)*, Singapore, November 2002.
- [32] L. A. Grieco, G. Boggia, S. Mascolo, et P. Camarda. A control theoretic approach for supporting quality of service in ieee 802.11e wlans with hcf. *Proc. of the 42nd IEEE Conf. on Dec. and Cont.*, Maui, Hawaii USA, December 2003.
- [33] F. Delli Priscoli et A. Isidori. A control-engineering approach to integrated congestion control and scheduling in wireless local area networks. *Control Engineering Practice*, 13 (5) :541–558, 2005.
- [34] S. Tatikonda et S. Mitter. Control under communication constraints. *IEEE Trans. on Auto. Control*, 49 (7) :1056–1068, July 2004.
- [35] A. Sahai et S. Mitter. The necessity and sufficiency of anytime capacity for stabilization of a linear system over a noisy communication link, part I : Scalar systems. *Sub. to IEEE Trans. on Inf. Theory*, LIDS 2649, May 2005.
- [36] A. Sahai et S. Mitter. The necessity and sufficiency of anytime capacity for stabilization of a linear system over a noisy communication link, part II : Vector systems. *Sub. to IEEE Trans. on Inf. Theory*, LIDS 2651, June 2005.
- [37] W. S. Wong et R. W. Brockett. Systems with finite communication bandwidth constraints I : State estimation problems. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, 42(9) :1294–1298, September 1997.
- [38] W. S. Wong et R. W. Brockett. Systems with finite communication bandwidth constraints II : Stabilization with limited information feedback. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, 44(5) :1049–1053, May 1999.
- [39] K. Gu, V. L. Kharitonov, et J. Chen. *Stability and robust stability of time-delay systems*. Birkhäuser, Boston, 2003.
- [40] J.-P. Richard. Time delay systems : An overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, 39(10) :1667–1694, October 2003.
- [41] S.-I. Niculescu et K. Gu (Eds.). *Advances in Time-Delay Systems*, volume LNCSE 38 of *Lect. Notes in Comp. Science and Eng.* Springer-Verlag, New York, 2004.
- [42] O. J. M. Smith. Closer control of loops with dead time. *Chem. Eng. Prog.*, 53 :217–219, 1959.
- [43] A. Manitius et A. Olbrot. Finite spectrum assignment problem for systems with delays. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, 24 :541–552, August 1979.
- [44] Z. Artstein. Linear systems with delayed control : a reduction. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, ac-27, no.4 :869–879, August 1982.
- [45] E. I. Verriest. Stability of systems with state-dependant and random delays. *IMA Jour. of Math. Cont. and Inf.*, 19 :103–114, 2002.
- [46] A. Seuret, M. Dambrine, et J.-P. Richard. Robust exponential stabilisation fo systems with time-varying delays. *Proc. of the 5th IFAC Work. on Time Delay Sys.*, Leuven, Belgium, 2004.
- [47] E. Witrant, C. Canudas-de-Wit, D. Georges, et M. Alamir. Remote stabilization via time-varying communication network delays : Application to TCP networks. *Proc. of the IEEE Conf. on Control Applications*, Taipei, Taiwan, September 2004.
- [48] E. Witrant. *Stabilisation des Systèmes Commandés par Réseaux*. PhD thesis, INPG/Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Grenoble, France, September 2005.
- [49] E. Witrant, D. Georges, et C. Canudas de Wit. Optimal control design for the stabilization of network controlled systems. *Proc. of the IEEE Am. Cont. Conf.*, Minneapolis, Minnesota (USA), June 2006.