

Systèmes commandés en réseau

Jean-Pierre Richard

Conférence EC Lille – Intelligence Ambiante
18 février 2011



<http://researchers.lille.inria.fr/~jrichard/>
jean-pierre.richard@ec-lille.fr



résumé

Les réseaux de communication sont aujourd'hui une technologie partout présente, y compris dans le domaine de la commande temps-réel.

Ils permettent par exemple d'augmenter la flexibilité des systèmes, d'utiliser des capteurs sans fils, de télé-opérer des applications distantes, de faire communiquer des systèmes autonomes, de déporter les contrôleurs pour économiser du temps de calcul et donc de l'énergie...

Cependant, un réseau peut aussi être considéré comme un nouveau système dynamique, qui interfère donc avec les boucles de contrôle et risque d'en perturber les performances.

Dans cette conférence, on montrera comment la théorie des systèmes à retards permet de modéliser et mieux aborder plusieurs problèmes rencontrés dans les systèmes commandés en réseau. Nous ferons ainsi un tour d'horizon de quelques résultats récents sur la question.

Opération Lindbergh, 07/09/2001

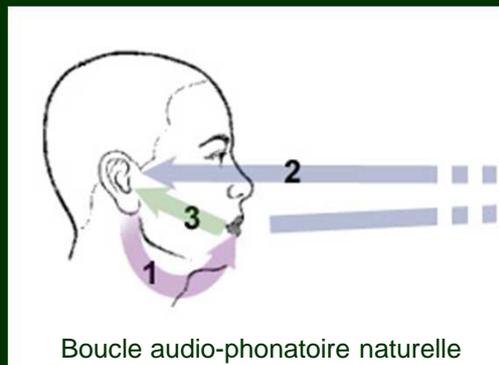
The diagram illustrates the tele-surgery setup for Operation Lindbergh. It shows a high-speed fiberoptic service (10 Mb/s) connecting New York and Strasbourg, with a constant Round Trip Time (RTT) of less than 200 ms over a distance of 15,000 km. The cost of the link is approximately 150k\$. The setup includes a robot command station in New York, a robot in Strasbourg, and various equipment like video monitors, computers, and videoconferencing systems. Logos for France Telecom and Computer Motion are also present.

« Le seul frein au développement de la télé chirurgie à grande distance demeure, aujourd'hui encore, son prix. Pour opérer à distance, il faut utiliser une ligne ATM en transcontinental, qu'il faut réserver pour six mois, et qui coûte environ 1 million de dollars. »
Prof. J. Marescaux, 06 janvier 2010

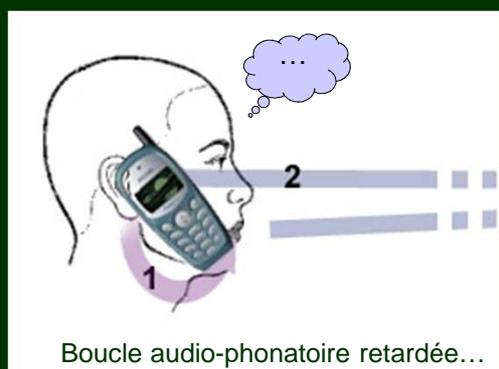
Autres exemples...

This section features a collage of images illustrating various robotic applications. At the top right is a world map with 'Internet' in the center, connected to several locations. Below it are images of a humanoid robot, a hand interacting with a robotic arm, a laboratory setting with a robotic arm, a small yellow robot, and a large industrial robotic arm in a factory setting.

et un exemple de la vie quotidienne...



et un exemple de la vie quotidienne...



Quelques *surveys*...

- Control methodologies in Networked Control Systems
Y. Tipsuwan, M.Y. Chow, *Control Eng. Practice* 11, 1099-111, **2003**
- Networked Control System: a brief survey
T.C. Yang, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, 153 (4), **2006**
- A survey of recent results in Networked Control Systems
J.P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, Y. Xu, *Proc. of the IEEE*, 95 (1), **2007**
- Trends in Networked Control Systems
S. Zampieri, *17th IFAC World Congress, Seoul*, **2008**
- Time-Delay Systems: an overview of some recent advances and open problems
J.P. Richard, *Automatica*, **2003** [théorie SàR](#)

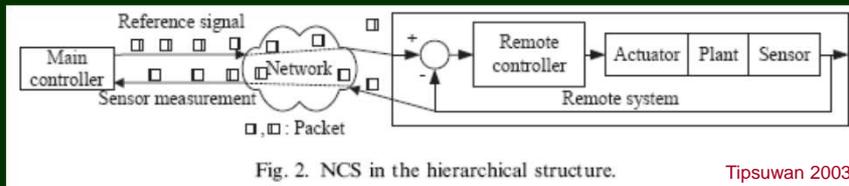
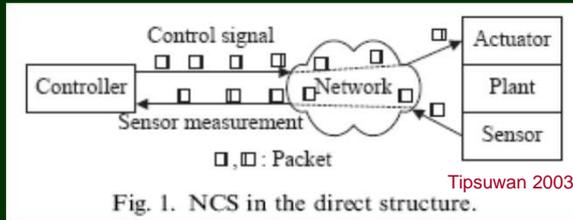
← **TB sauf...**
travaux non
anglophones?

sans oublier...



C. Canudas de Wit, T. Divoux, P. Fraise, D. Georges, J.P. Georges,
G. Juanole, A. Lelevé, F. Lepage, F. Michaut, G. Mouney, W. Perruquetti,
J.P. Richard, E. Rondeau, O. Sename, A. Seuret, E. Wittrant.

NCS mono-boucle



Quid du multi-boucle ?

NCS multi-boucle selon [Yang 2006] :

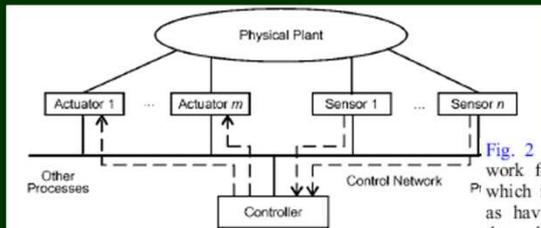


Fig. 1 Typical NCS setup and information flows Yang 2006

Fig. 2 is a block diagram, representing a general framework for the study of networks and control. An NCS, which is the main topic of this paper, can be considered as having **two subsystems** interacting with each other through networked communication channels. Here, it is

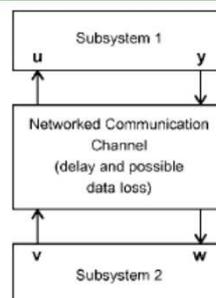
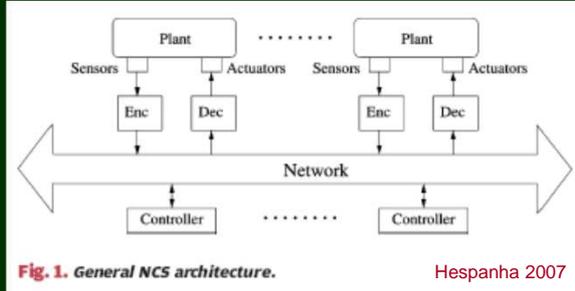
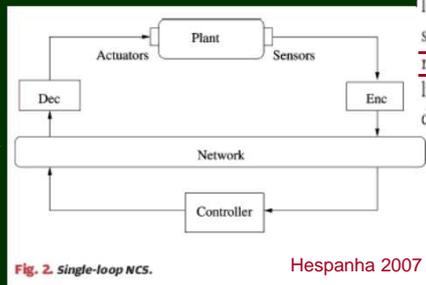


Fig. 2 General framework for networks and control Yang 2006

NCS multi-boucle selon [Hespanha 2007] :



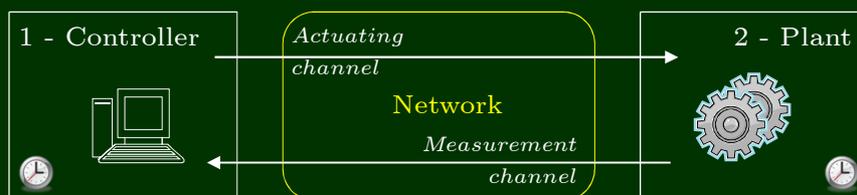
It is also often common to consider a single feedback loop as in Fig. 2. Although considerably simpler than the system shown in Fig. 1, this architecture still captures many important characteristics of NCSs such as bandwidth limitations, variable communication delays, and packet dropouts.



NCS mono-boucle.

... on se limitera à ce cas ici aussi.

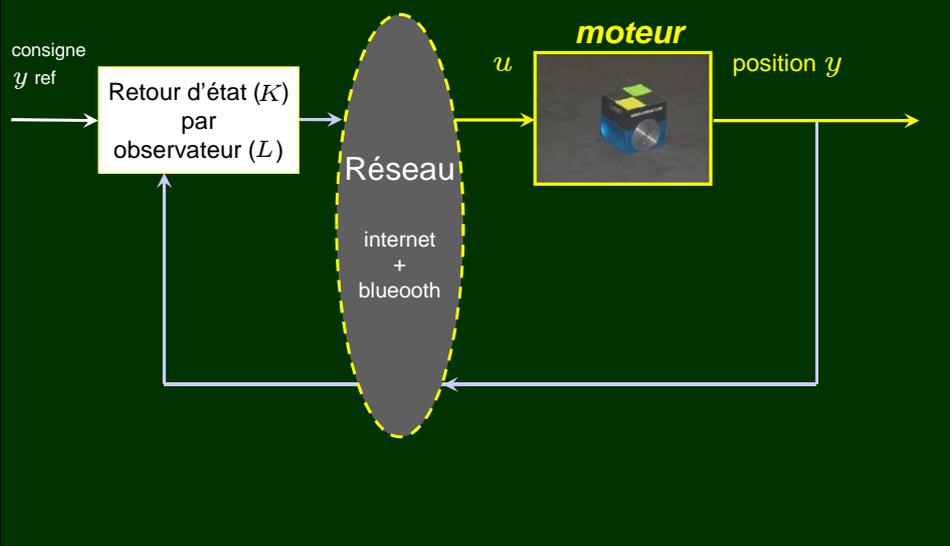
Un bon point de départ pour comprendre les problématiques liées à la présence du réseau dans la boucle



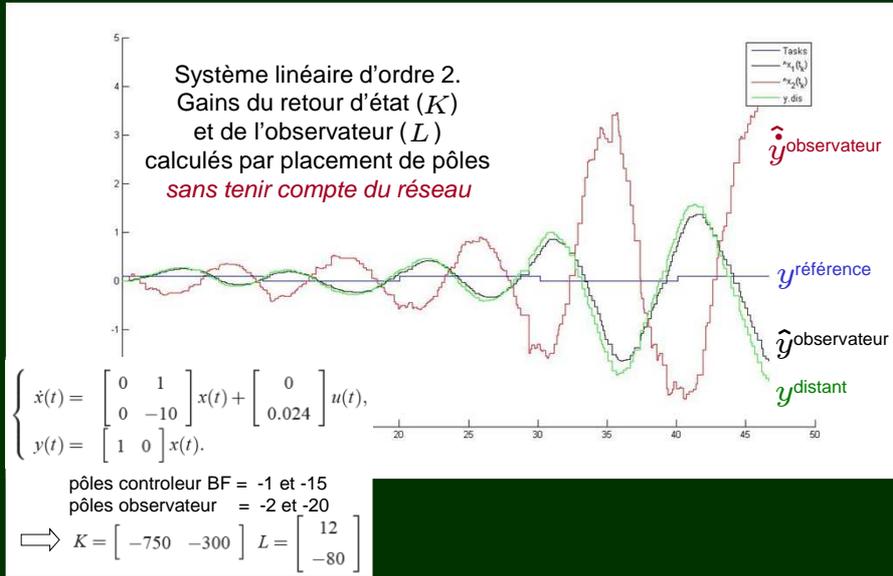
Plan

1. Introduction : un exemple rudimentaire
2. Problématique générale
3. Echantillonnage et retard
4. Commande
 - ✓ *to buff, or not to buff?*
 - ✓ sélection de résultats (thèses francophones)
5. Conclusion

1) Un exemple rudimentaire

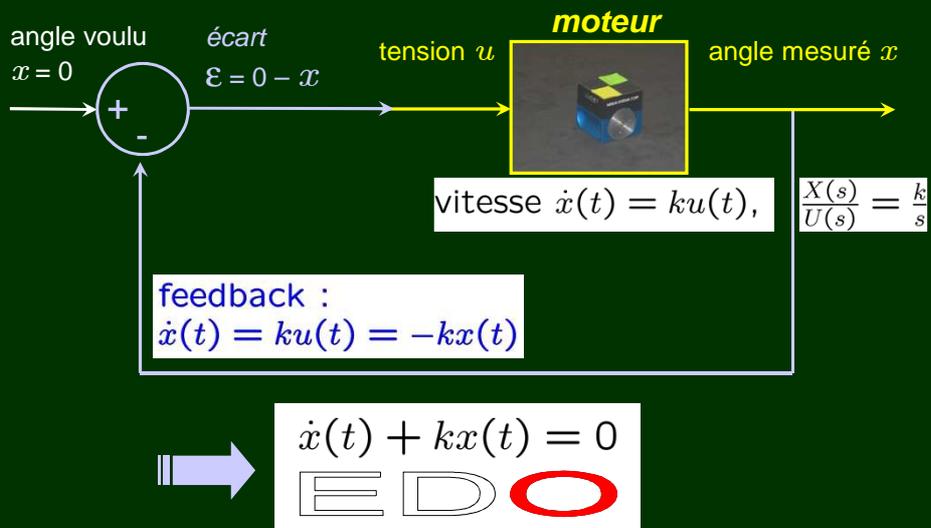


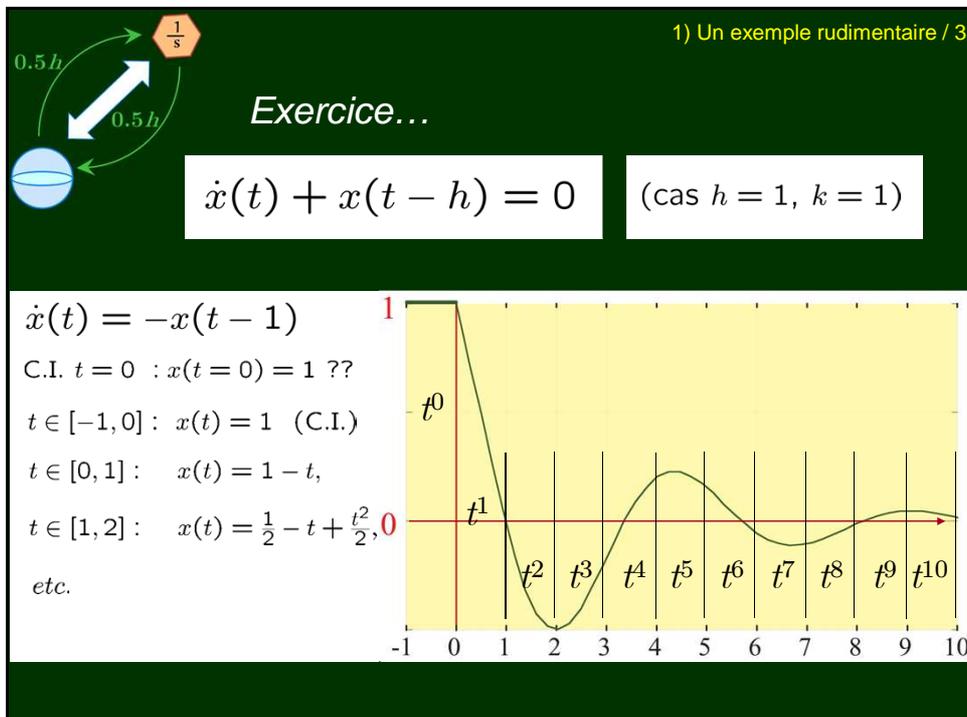
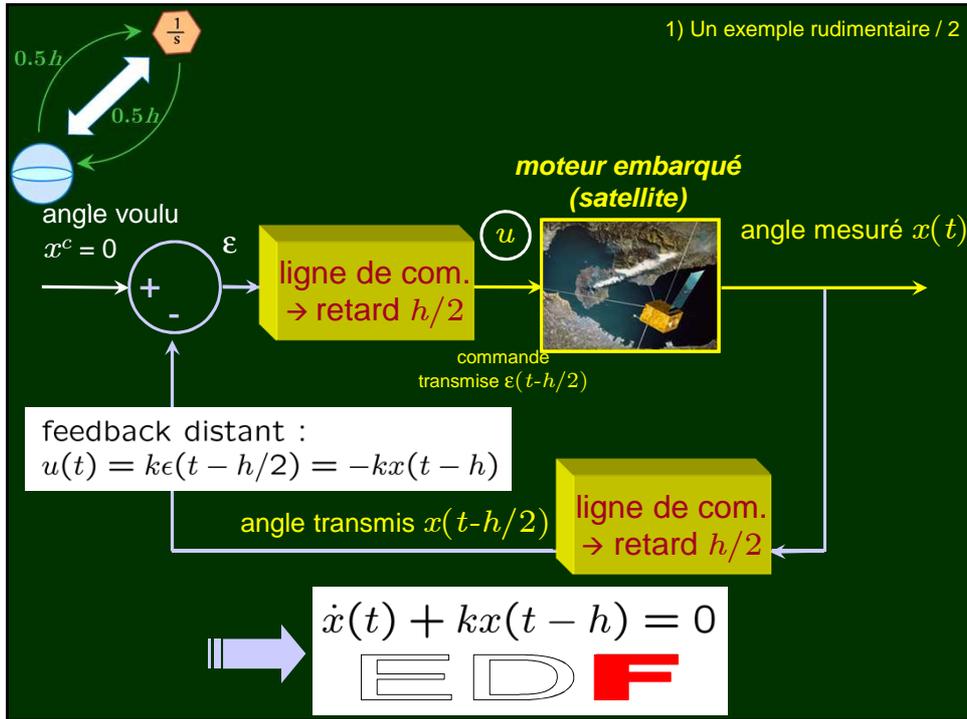
1) Un exemple rudimentaire



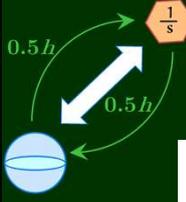
1) Un exemple rudimentaire

Interprétation sur un modèle simplifié





1) Un exemple rudimentaire / 4



$$\dot{x}(t) + x(t - h) = 0$$

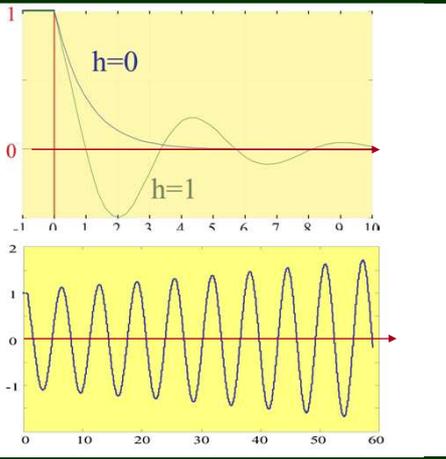
selon h ?

$$\dot{x}(t) + x(t) = 0$$

$$\dot{x}(t) + x(t - 1) = 0$$

$$\dot{x}(t) + x(t - \frac{\pi}{2}) = 0 ?$$

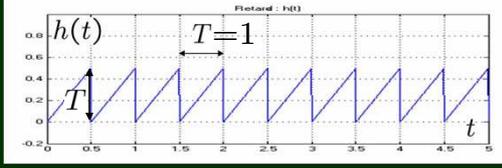
$$\dot{x}(t) + x(t - 1.6) = 0$$



1) Un exemple rudimentaire / 5

... et attention aux retards variables !

$$\dot{x}(t) = -ax(t) - bx(t - h(t)) \quad (1)$$

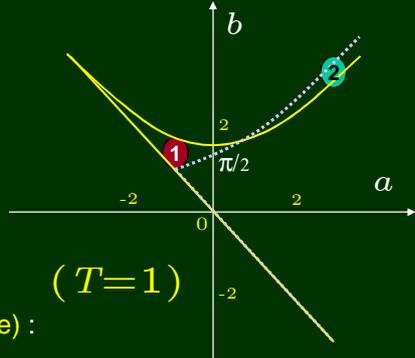
$$h(t) = t - kT \text{ pour } kT < t \leq (k+1)T$$


est asymptotiquement stable ssi (zone jaune) :

$$\left| \left(1 + \frac{b}{a}\right)e^{-aT} - \frac{b}{a} \right| < 1 \quad \text{si } a \neq 0$$

$$|1 - bT| < 1 \quad \text{si } a = 0$$

et, pour $h = \text{cste} \in [0,1]$ ssi (zone grise)

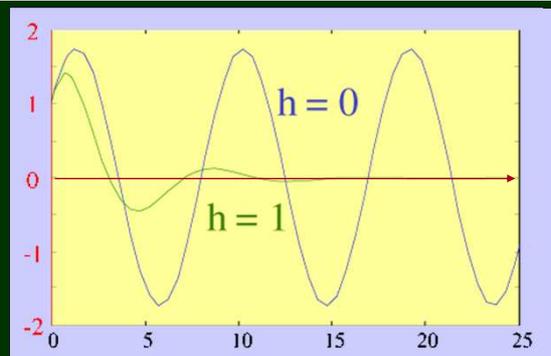


($T=1$)

1 stable $h(t) < 1$ - instable $h = \text{cste} < 1$
 2 instable $h(t) < 1$ - stable $h = \text{cste} < 1$

(parenthèse...)

$$\ddot{y}(t) + y(t) - \frac{1}{2}y(t-h) = 0$$



⇒ le retard peut aussi avoir un effet stabilisant

ici, effet de dérivée : $y(t-h) \approx y(t) - h\dot{y}(t)$

Quelques mots sur la méthode de Lyapunov en SàR

EDO :

$$\dot{x}(t) = -ax(t) \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V(x(t)) = x^2(t) > 0 \\ \dot{V}(x(t)) = -2ax^2(t) < 0 \dots \text{etc.} \end{cases}$$

EDF :

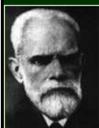
$$\dot{x}(t) = -ax(t) - bx(t-h)$$

$$V(x(t)) = x^2(t) \quad (\text{quadratique « usuelle »})$$

$$\dot{V}(x(t)) = -2 [ax^2(t) + \overset{\text{termes croisés}}{bx(t)x(t-h)}] \leq \dots ?$$

→ besoin de méthodes spécifiques :

- 1) fonctions de Lyapunov-Razumikhin (pas ici)
- 2) fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii



Lyapunov for TDS

Illustration de l'approche LKF (Lyapunov-Krasovskii functionals)

$$\dot{x}(t) = -ax(t) - bx(t-h)$$

$$V(x_t) = x^2(t) + |b| \int_{-h}^0 x^2(t+s) ds \quad (\text{quad} + \text{intégrale})$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_t) &= -2x(t)[ax(t) + bx(t-h)] \\ &\quad + |b|[x^2(t) - x^2(t-h)] \\ &\leq -2(a - |b|)x^2(t) \quad \dots \quad \dot{V}(x_t) < 0 \text{ if } |b| < a \end{aligned}$$

Remarques sur le conservatisme :

- ici, condition « pessimiste » puisque stabilité indépendante du retard $h \dots$
- conservatisme lié à la majoration des termes croisés, ici : $-[x(t) + x(t-h)]^2 \leq 0$
 $\Rightarrow -2bx(t)x(t-h) \leq bx^2(t) + bx(t-h)^2$

Lyapunov for TDS

Plus généralement...

The system model

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t - \tau(t)), \quad (2)$$

with the initial condition :

$$x(t_0 + \theta) = \phi(\theta), \quad \dot{x}(t_0 + \theta) = \dot{\phi}(\theta), \quad \theta \in [-h_2, 0], \quad (3)$$

where $\tau(t) \in [h_1, h_2], h_1 \geq 0$.

Lyapunov functionals

$$\begin{aligned} V(t, x_t, \dot{x}_t) &= x^T(t)Px(t) + \int_{t-h_1}^t x^T(s)Sx(s)ds \\ &+ h_1 \int_{-h_1}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)dsd\theta \\ &+ \int_{t-h_2}^t x^T(s)S_a x(s)ds + (h_2 - h_1) \int_{-h_2}^{-h_1} \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s)R_a \dot{x}(s)dsd\theta \end{aligned} \quad (4)$$

where $P > 0$ and $R, R_a, S, S_a \geq 0$.

Wenjuan Jiang Networked control systems 30 June 2009 15 / 41

Lyapunov for TDS

Plus généralement...

The system model

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t - \tau(t)), \quad (2)$$

with the initial condition :

$x(t_0 + \dots)$

where $\tau(t) \in [h_1, h_2]$

Lyapunov funct

$$V(t, x_t, \dot{x}_t) =$$

$$+ h_1 \int_{-h_1}^0 \int_{t+s}^t$$

$$+ \int_{t-h_2}^t x^T(s)$$

where $P > 0$ and

Asymptotic stability : Lyapunov second theorem

$$V(x) \geq 0$$

$$\Downarrow$$

$$\dot{V}(x) < 0$$

$$\Downarrow$$

Jensen's inequality

$$\int_{b(t)}^{a(t)} \dot{x}^T(s) R_i \dot{x}(s) ds \geq \frac{1}{(\max(a(t)) - \min(b(t)))} \int_{b(t)}^{a(t)} \dot{x}^T(s) ds R_i \int_{b(t)}^{a(t)} \dot{x}(s) ds$$

$$\Downarrow$$

Descriptor method (Fridman E. & Shaked U. 2001)

$$\rightarrow 0 = 2[x^T(t)P_2^T + \dot{x}^T(t)P_3^T][Ax(t) + A_1x(t - h_1) - A_1v_1 - \dot{x}(t)], \dots$$

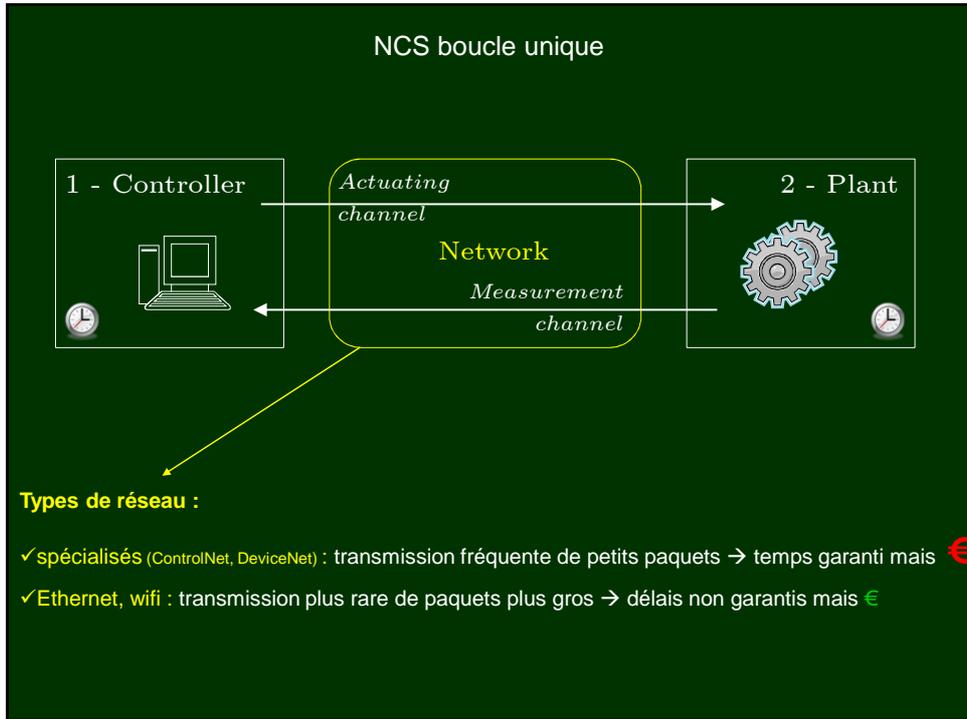
$$\Downarrow$$

$$\dot{V}(t, x_t, \dot{x}_t) \leq \eta^T(t)\Phi\eta(t) < 0,$$

$$(\eta(t) = \text{col}\{x(t), \dot{x}(t), x(t - h_1), x(t - h_2), v_1, v_2\})$$

Wenjuan Jiang Networked control systems 30 June 2009 16 / 41

2) Problématique générale



Effets du réseau sur le contrôle en boucle fermée

<i>Problème</i>	<i>Traduction contrôle</i>	<i>Systèmes concernés</i>	<i>Non concernés</i>
bande passante limitée	quantification, quantité d'info par seconde limitée (Shannon, <i>maximum bit rate</i>)	systèmes à ressources énergie limitée (UAVs, réseaux de μ -capteurs ou de μ -actionneurs...)	envoi par paquets type Inter/Ethernet, Bluetooth... 1 bit ou 300 → idem ATM=384, Ethernet>368, Bluetooth>499
échantillonnage, codage, ordo, transmission, asynchronisme	retards variables, estimés si modèle ou <i>time-stamps</i>	systèmes à transmission par paquets	réseau spécialisé (ControlNet, DeviceNet) et non partagé
perte de paquets	échantillonnage asynchrone, retard variable	sans fil, protoc. type UDP	protocoles type TCP (mais peu utile : perte de temps pour infos périmées)
désynchronisation des horloges	retards (au moins)	internet	réseau spécialisé contrôle (CAN bus...)

General Introduction

Implementation of the remote control system
 Output feedback stabilization
 Stabilization of a remote system : a QoS dependent controller
 Fully event-driven control with packet dropouts consideration
 Conclusions and Perspectives

The dynamic character of the Internet
 Some of the solutions to deal with time delay
Network induced delays (NID)

Three types of NID

Communication delay : $\tau_1^c(t)$

Delay from packet loss : nT

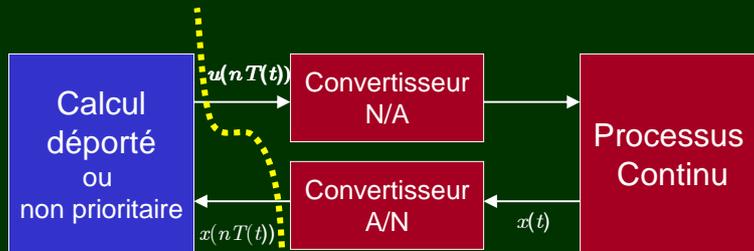
Sampling delay : $\tau_2^s(t)$

Total time-delay of NCS :
 $\delta_{con}(t)$ and $\delta_{obs}(t)$

Wenjuan Jiang
Networked control systems
30 June 2009 7 / 41

3) Échantillonnage et retard

3) échantillonnage et retard



perte de paquet,
ordonnancement de tâches...

Intégration, transformée en z , tout va bien, etc.

$$u(t) = u_d(t_k) = g(x(t_k)), \quad t_k \neq kT$$

2) échantillonnage et retard / 2

— Signal Continu
- - - Signal Echantillonné

Fridman, Seuret, JPR - *Automatica* 2004

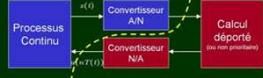
Signal échantillonné bloqué
(ici, à période constante)

↕

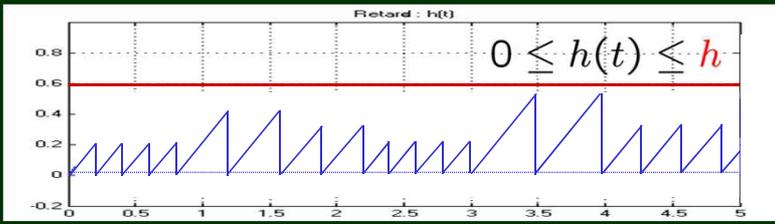
Signal retardé par $h(t)$ variable

$$u(t) = u_d(t_k) = u_d(t - [t - t_k]) = u(t - h(t))$$

2) échantillonnage et retard / 2



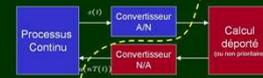
Re-formulation du problème



$0 \leq h(t) \leq h$

- influence de la période *maxi* d'échantillonnage h
- application du critère de E. Fridman $\dot{h}(t) \leq 1$

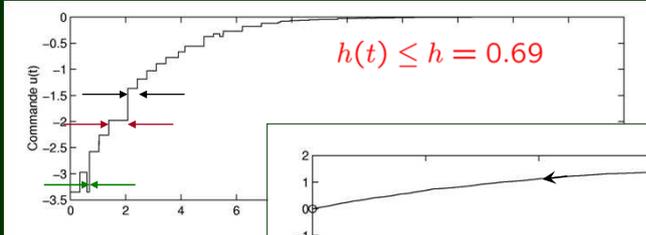
2) échantillonnage et retard / 3



Exemple :
instable \rightarrow glob. as. stable

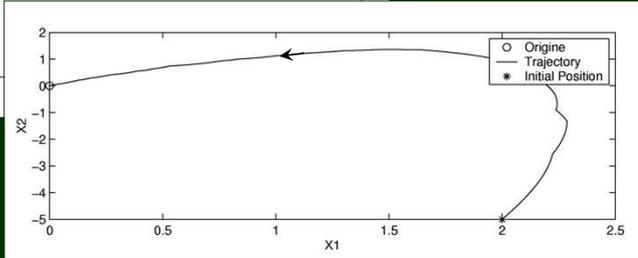
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} Kx(t_k) \\ \square K = \begin{bmatrix} -1.05 & 0.25 \end{bmatrix} \end{cases}$$

avec sat possible



$h(t) \leq h = 0.69$

valeur limite en simu ($T=cte$) : 0.7



3.2. Autre approche de l'échantillonnage variable

Thèse L. Hetel 2007 + IEEE TAC 2006 (Daafouz, Iung) incertitudes exponentielles
 retard continu ρ_i intra-sampling (tronc. Taylor des termes expon) \rightarrow mod. polytopique
 + retard discret θ_i (nbre paquets perdus) \rightarrow modèle à événement
 = modèle augmenté \rightarrow système à commutation (switched system)
 \rightarrow synthèse LMI de retour d'état robuste en T

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k)$$

$$A(k) = e^{M(t_{k+1}-t_k)}, B(k) = \int_0^{t_{k+1}-t_k} e^{M(t_{k+1}-t_k-s)} ds N.$$

$$\eta_{i+1} = A(\rho_i)\eta_i + B(\rho_i)u_i.$$

$$A(\rho_i) = e^{M\rho_i}, B(\rho_i) = \int_0^{\rho_i} e^{Ms} ds N.$$

$$u_c(t_i) = K x_c(t_j) = K x_c(t_i - \theta_i),$$

$$\theta_i \in \mathcal{T} = \{\theta \in \mathbb{Z}^+ : \underline{\theta} \leq \theta \leq \bar{\theta}\}$$

$$z_i = [\eta_i^T \eta_{i-1}^T \dots \eta_{i-\bar{\theta}}^T]^T \rightarrow \bar{A}(\rho_i) = \begin{bmatrix} A(\rho_i) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}(\rho_i) = \begin{bmatrix} B(\rho_i) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

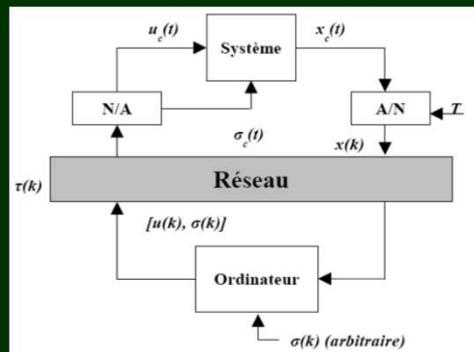
$$u_i = \bar{K}(\theta_i)z_i,$$

$$\bar{K}(\theta_i) = [0 \dots 0 K 0 \dots 0]$$

$$z_{i+1} = (\bar{A}(\rho_i) + \bar{B}(\rho_i)\bar{K}(\theta_i))z_i$$

autre cas traité par Hetel :

échantillonnage + retard réseau
 inférieur à la période :
 $\tau_{min} \leq \tau(k) \leq \tau_{max} \leq \overline{T}_{ech}$



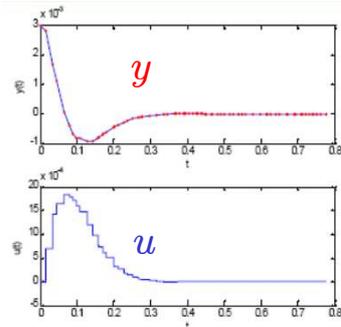
Exemple simulé :

$$G_p(s) = \frac{1000}{s(0.25s + 1)}$$

$$T = 0.015s$$

$$\text{jitter } \delta T \in [0, 0.005s]$$

$$\tau_{min} = 0.001s \text{ et } \tau_{max} = 0.018s.$$



4) Commande

to buff, or not buff?

1^{ère} solution = faire « comme si » constant

- ✓ [Niemeyer & Slotine 98][Huang & Lewis 03][Azorin et al. 03][Fattouh & Sename 03] etc.

2^{ème} solution = rendre le retard constant

- donc le maximiser : $0 \leq h_i(t) \leq h_{max} \Rightarrow h_i(t) = h_{max}$
- grâce à une mémoire tampon (*buffer*) → *time-driven*
- puis application des techniques classiques :
 - ✓ prédictives (Smith) [Lelevé & Fraisse 01]
 - ✓ écart à modèle de réf. retardé [Estrada, Marquez, Moog 07]
 - ✓ etc.

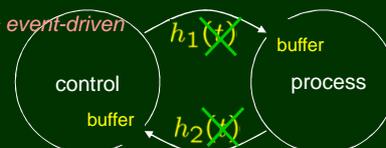
3^e solution
(intermédi.)
à un seul
buffer

[Seuret 06]
[Jiang et al 08]

4^{ème} solution = garder le retard variable...

- ✓ [Witrant et al. 07][Seuret & Rich 08][Jiang et al.09] → *event-driven*

Retard de réseau : variable, asymétrique →



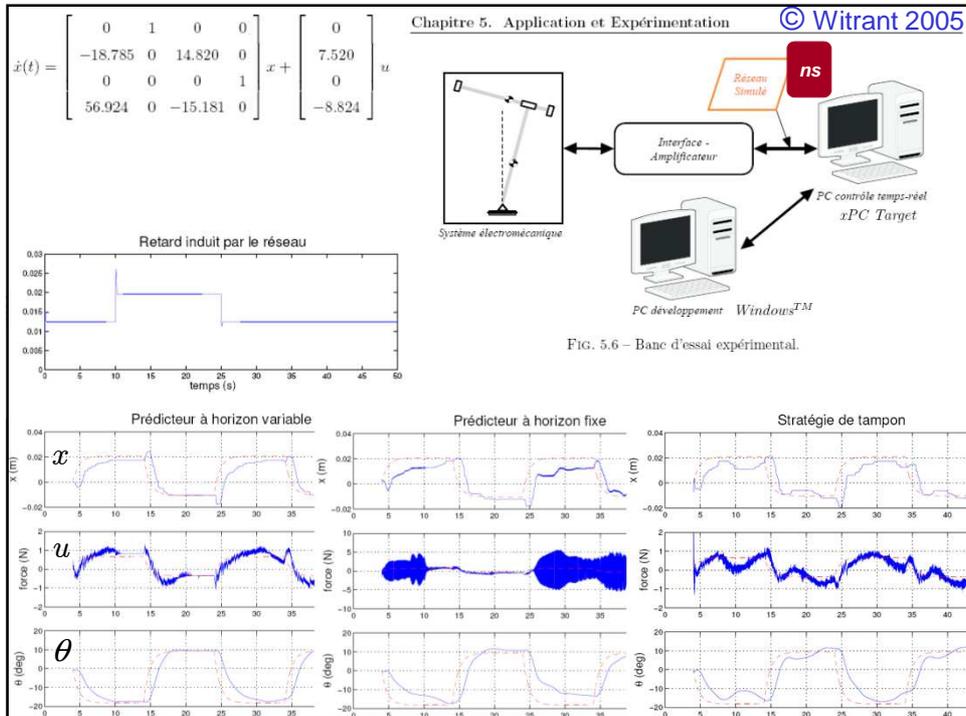
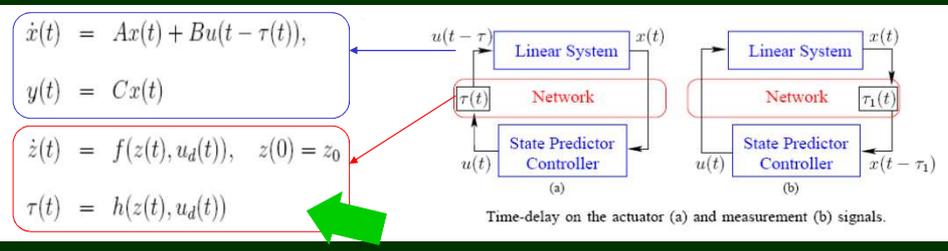
4.1. Commande avec modèle prédictif du réseau

Thèse E. Witrant 2005 + IEEE TAC 2007 (Witrant, Canudas, Georges, Alamir)

- réseau modélisé, sans perte de paquets
- prédicteur d'état pour retards *variables* (connus, prédits)
- contrôleur type placement de spectre fini (FSA)
- horizon de prédiction variable
- preuves de robustesse (par approche *small gain*)
- application pendule inverse en T

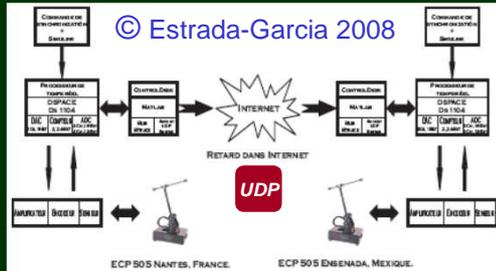
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) \\ u(t) &= -Ke^{A\hat{\delta}(t)} \left[x(t) + e^{At} \int_t^{t+\hat{\delta}(t)} e^{-A\theta} Bu(\theta - \hat{\tau}(\theta)) d\theta \right] \end{aligned}$$

where $\hat{\delta}(t) = \hat{\tau}(t + \hat{\delta}(t))$ is the prediction horizon



4.2. Commande avec tampons aller+retour

Thèse H.J. Estrada-Garcia 2008 (+Moog, Marquez-Martinez)



But : synchronisation d'un pendule esclave (Nantes) sur un pendule maître (Ensenada).

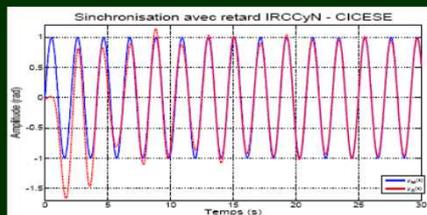
y^{ref} supposée connue par les deux.

Stratégie :

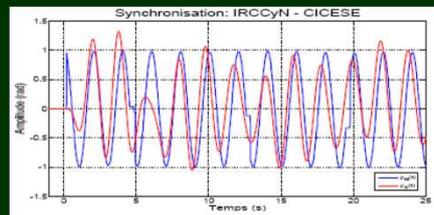
- 1) buffers à 300ms = τ
- 2) commande tq écart m/e régi par :

$$e^{(3)}(t) + a_2 \ddot{e}(t - \tau) + b_2 \dot{e}(t - \tau) + c_2 e(t - \tau) = 0.$$

→ commande causale



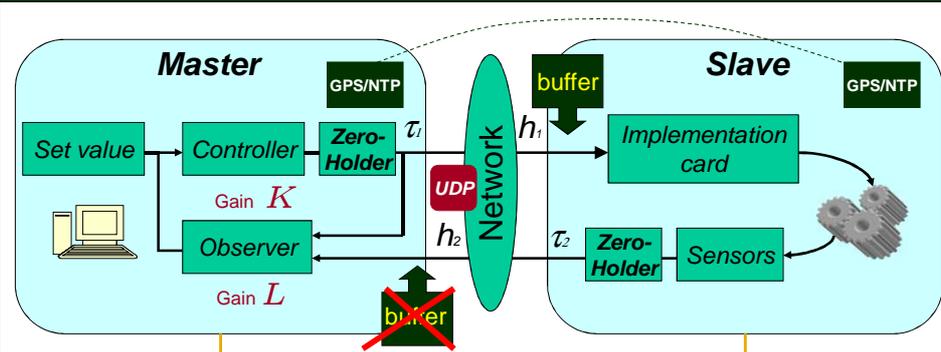
Pendule simulé, réseau réel



Pendule réel, réseau réel

4.3. Commande avec tampon aller seul

Thèse A. Seuret 2006 (+Dambrine, Richard)



$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t - \delta_1(t)) \\ -L(y(t - \delta_2(t)) - \hat{y}(t - \delta_2(t))), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \end{cases}$$

→ connu grâce au buffer

- fixe la consigne
- reçoit la sortie de Slave
- observe l'état de Slave
- calcule & envoie commande

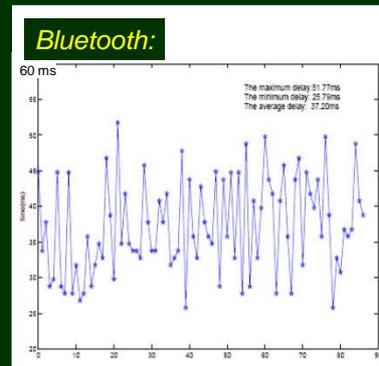
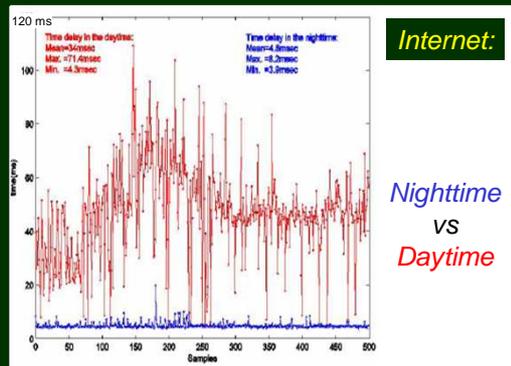
- Puissance de calcul limitée

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \delta_1(t)), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases}$$

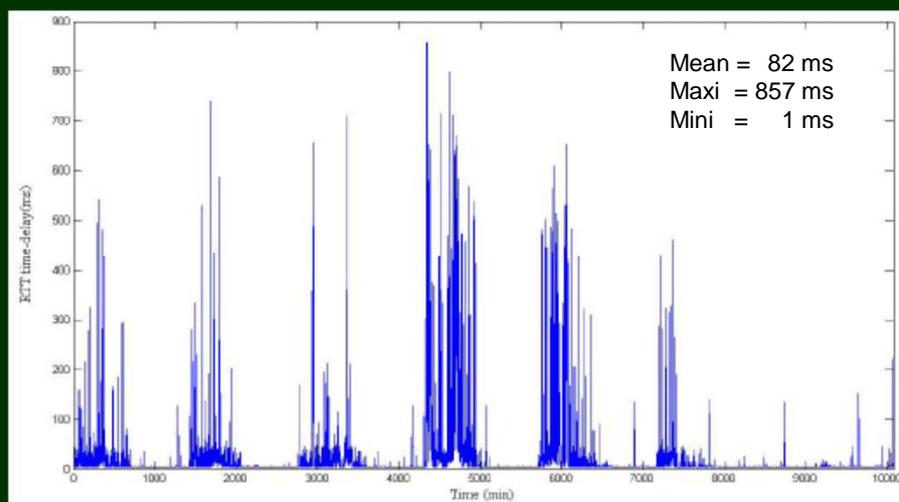
- reçoit & applique commande
- envoie la sortie mesurée

Thèse W. Jiang 09 + Springer 08 (+Kruszewski, Toguyeni, Richard)

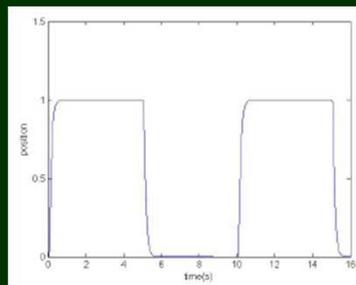
Passage à l'expérimental + adaptation à la QoS disponible



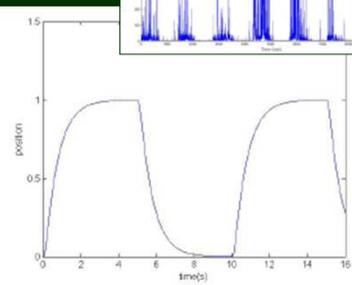
Une semaine de RTT...



Une semaine de RTT...



$$h_m = 0.05s, \alpha = 8.74$$



$$h_m = 0.5s, \alpha = 0.96$$

Lien retard maxi / performance démontrable

Model of the switching system

Two switching modes are considered : the big time-delay and the small time-delay.

$$1) \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + \chi_{[h_1, h_2]}(\delta_{con}(t))BK_1x(t - \delta_{con}(t)) + (1 - \chi_{[h_1, h_2]}(\delta_{con}(t)))BK_2x(t - \delta_{con}(t)), \quad (8)$$

$$2) \quad \dot{e}(t) = Ae(t) - \chi_{[h_1, h_2]}(\delta_{obs}(t))L_1Ce(t - \delta_{obs}(t)) - (1 - \chi_{[h_1, h_2]}(\delta_{obs}(t)))L_2Ce(t - \delta_{obs}(t)). \quad (9)$$

$\chi : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$ is defined by :

$$\chi_{[h_1, h_2]}(s) = \begin{cases} 1, & \text{if } s \in [h_1, h_2] \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

Note : we assume $\chi(\delta_{con}(t)) = \chi(\delta_c$

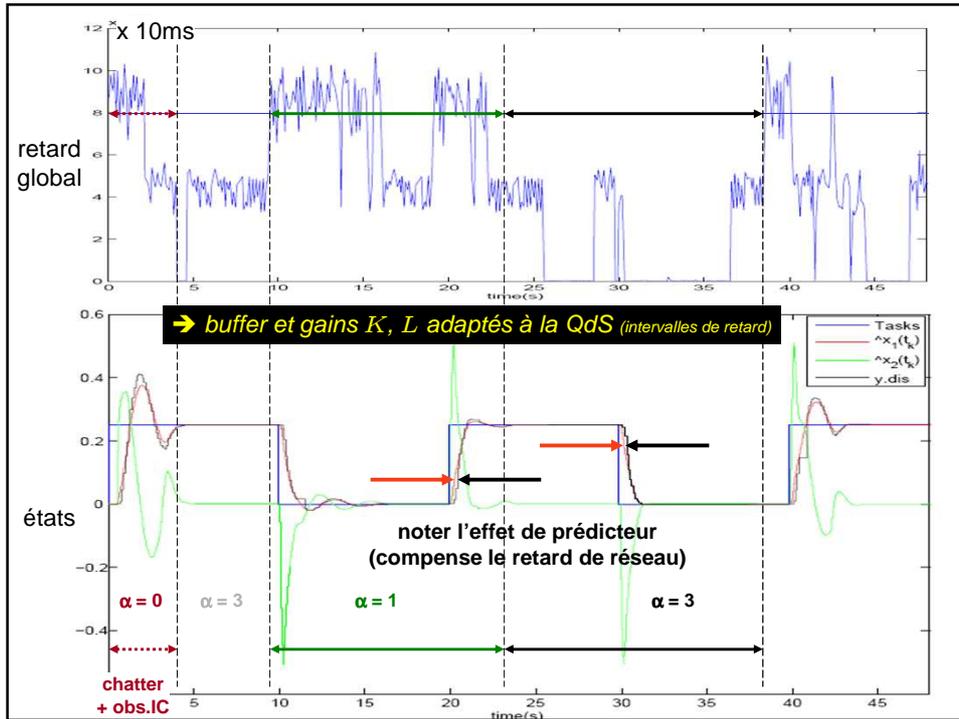
General switched system

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \chi_{[h_1, h_2]}(\tau)A_1x(t - \tau(t)) + (1 - \chi_{[h_1, h_2]}(\tau))A_2x(t - \tau(t)), \quad (11)$$

The LKF :

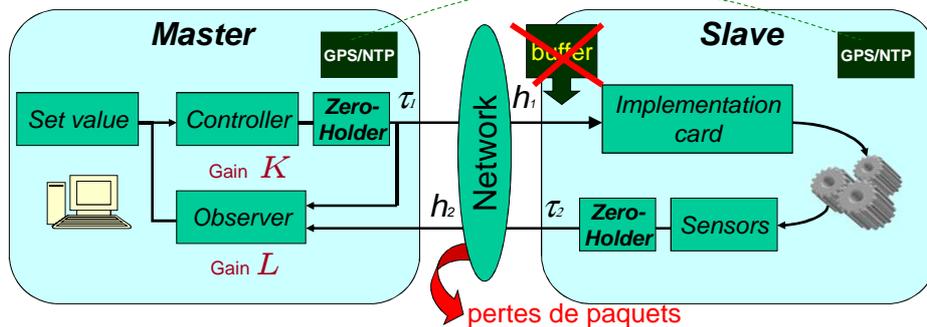
$$V(t, x_t, \dot{x}_t) = x^T(t)Px(t) + \sum_{i=0}^2 \int_{t-h_{i+1}}^t x^T(s)S_i x(s) ds + \sum_{i=0}^2 (h_{i+1} - h_i) \int_{t-h_{i+1}}^t \int_{t+\theta}^t x^T(s)R_i \dot{x}(s) ds d\theta, \quad (12)$$

where $h_0 = 0$, $P > 0$ and $R_i, S_i \geq 0$.



4.3. Commande sans tampon (event-driven)

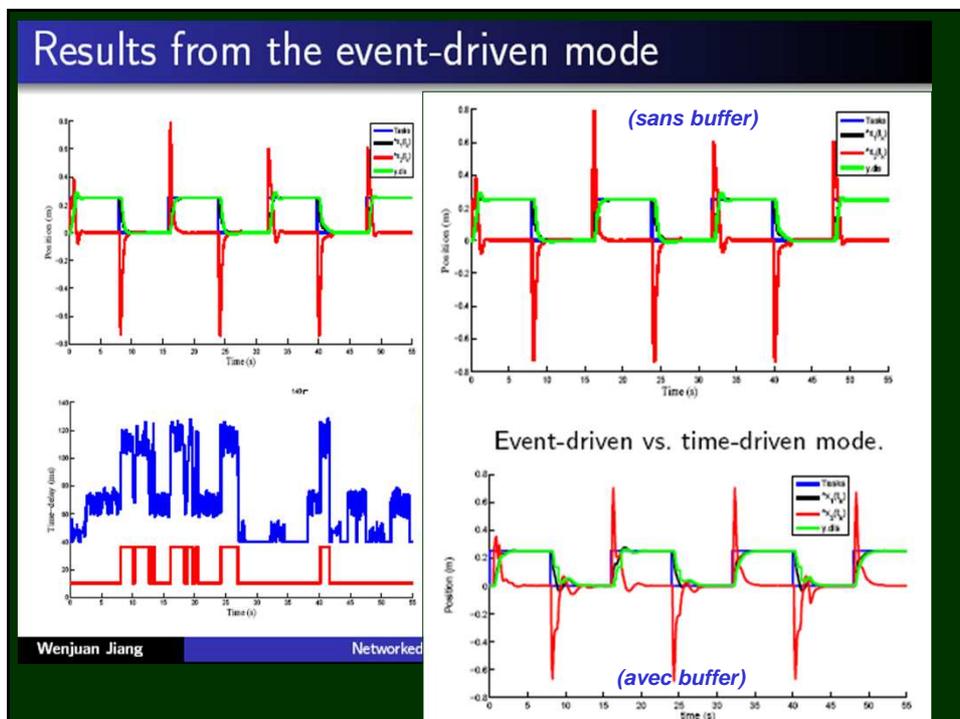
A. Seuret - JPR 2008 (théorie) + W. Jiang et al. (expérim. + switches)



$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t - \delta_1(t)) \\ \quad -L(y(t - \delta_2(t)) - g(t - \delta_2(t))), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \delta_1(t)), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases}$$

$$\hat{\delta} \neq \delta$$

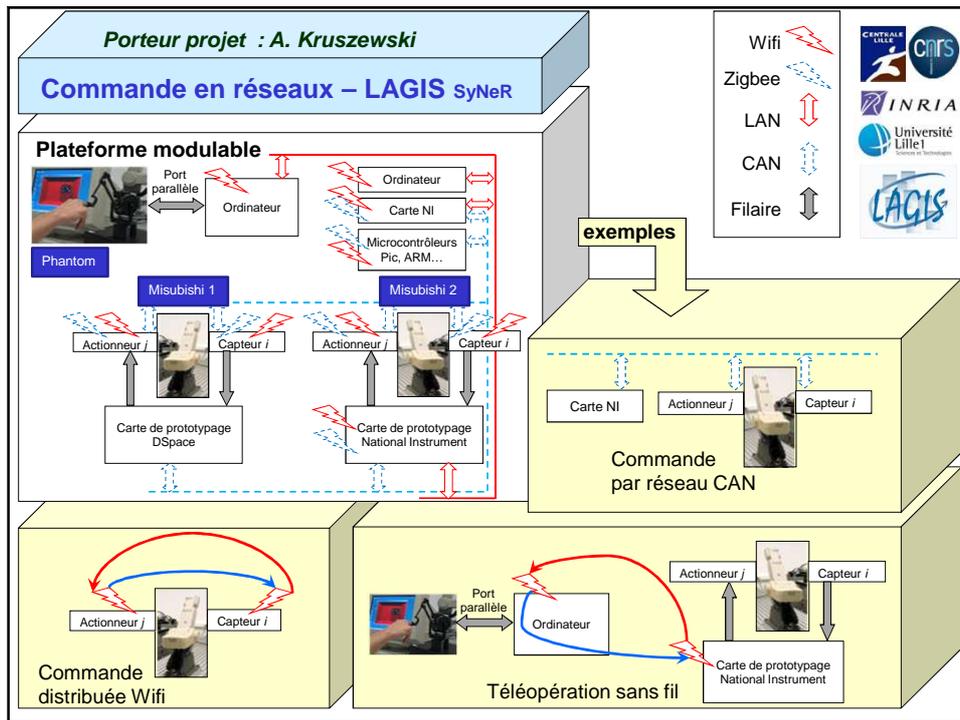


Résumé

- Problématique générale
- Echantillonnage [Fridman-Seuret-R 04] [Hetel 07] échantillonnage = retard variable
- Commande avec modèle du réseau [Witrant 05] prédicteur à retard variable
- Commande sans modèle de réseau :
 - ✓ avec 2 tampons [Estrada 08] modèle d'écart retardé
 - ✓ avec 1 tampon [Seuret 06] retour d'état + observ./prédic.
 - ✓ + adapt. à QoS [Jiang-K-R-T 08] " "
 - ✓ avec 0 tampon [Seuret-R 08, Jiang-K-R-T 09] " "

Nos perspectives sur ce thème

- Développer notre observateur distant pour le cas du retour d'effort (thèse de Bo Zang démarrée en septembre 2009, CSC)
- Considérer l'ordonnancement sous l'aspect système à commutations (thèse Christophe Fiter démarrée en septembre 2009, CNRS)
- Considérer les aspects non linaires (thèse Hassan Omran, démarrée en... février 2011, FP7 Europe HyCoN2)
- Développer un plate-forme modulable de commande en réseau (responsable : Alexandre Kruszewski)



Merci de votre attention