

# Networked Control Systems :

*to buff, or not to buff?*

Jean-Pierre Richard

<http://researchers.lille.inria.fr/~jrichard>

jean-pierre.richard@ec-lille.fr

Séminaire L2S, Supélec, 3 novembre 2011



## *NCS: to buff, or not to buff?*

Networks such as Internet or Wireless 802.11 present great advantages for flexible and low-cost networking. However, they are not as reliable as CANs, and integrating them in control applications, while preserving some performance, constitutes an interesting challenge.

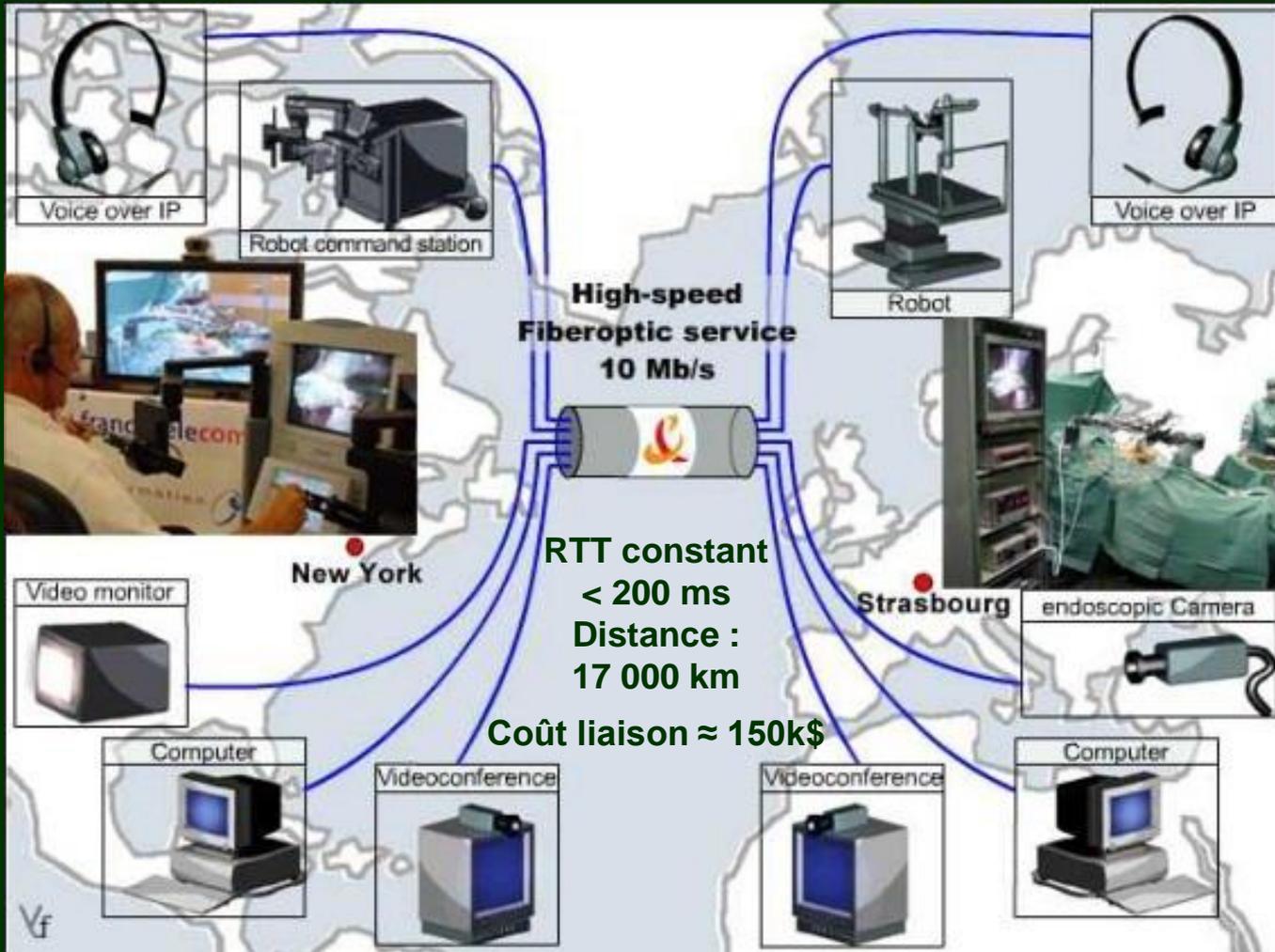
Using delay models allows for catching many of the effects introduced by the presence of unreliable networks in the control loops. Several theoretical techniques allow for analyzing the resulting systems. Some of them need the delay to be constant, which can be obtained by using waiting strategies involving buffers. Some other tolerate fast time-varying delays.

Without entering into many technical details, we'll try to draw a panel of the techniques we developed at LAGIS. It will be some story about network effects, time-driven / event-driven solutions, remote observers and bilateral teleoperation...

# Overview

- Motivations et exemples
- Modélisation
- Echantillonnage et retard
- Un exemple rudimentaire
- Commande : *to buff, or not to buff?* Sélection de résultats
- Conclusions

# Opération Lindbergh, 07/09/2001

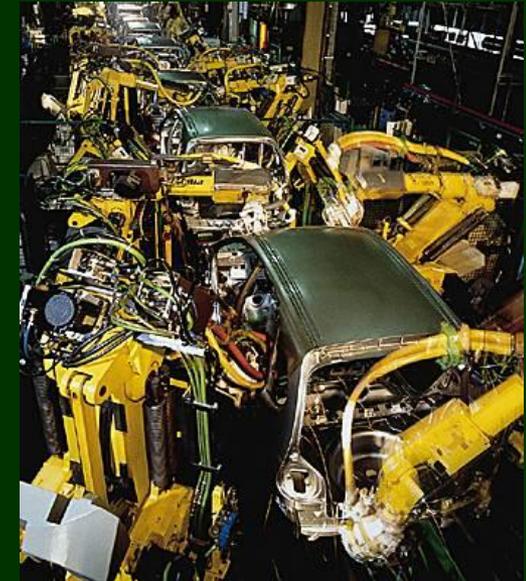


« Le seul frein au développement de la télé chirurgie à grande distance demeure, aujourd'hui encore, son prix. Pour opérer à distance, il faut utiliser une ligne ATM en transcontinental, qu'il faut réserver pour six mois, et qui coûte environ 1 million de dollars. »

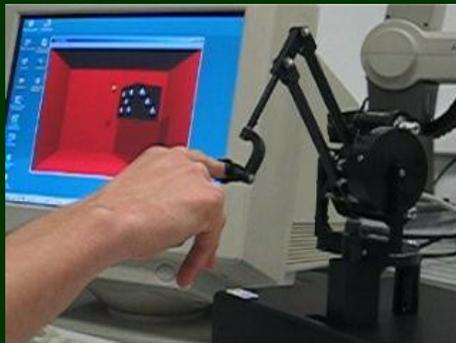
Prof. J. Marescaux, Le Monde, 6 janvier 2010

# d'autres exemples...

Monitoring distant



Réduction des câblages

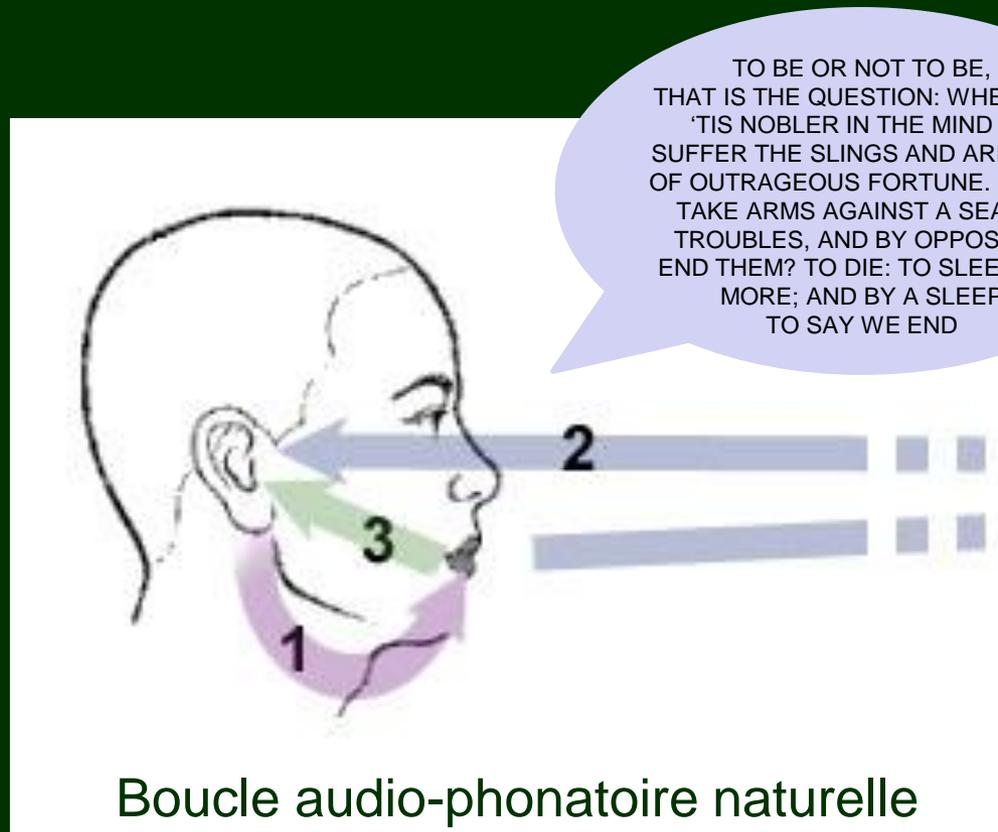


Téléopération bilatérale

Robotique collaborative



et un exemple de la vie quotidienne...



Boucle audio-phonatoire naturelle

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**
- Control over Wireless Networks  
K.H. Johansson, *25th Benelux Meeting on S&C, The Netherland*, **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**
- A switched system approach to exponential stabilization through com. Network  
A. Kruszewski, W.J. Jiang, E.Fridman, J.P. Richard, A. Toguyeni, *IEEE CST*, **2011 (...)**
- Time-Delay Systems: an overview of some recent advances and open problems  
J.P. Richard, *Automatica*, **2003**



**SYSTEMES  
AUTOMATISÉS**

**Information - Commande - Communication**

## **Systemes commandés en réseau**

*sous la direction de*  
Jean-Pierre Richard  
Thierry Divoux

**2007**

*hermes*

*Lavoisier*

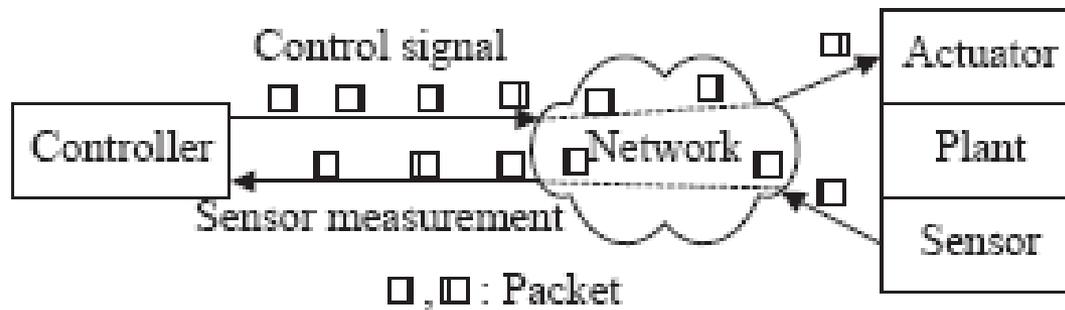
sans oublier...

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.

# Overview

- Motivations et exemples
- **Modélisation**
- Echantillonnage et retard
- Un exemple rudimentaire
- Commande : *to buff, or not to buff?* Sélection de résultats
- Conclusions

# NCS mono-boucle



Tipsuwan 2003

Fig. 1. NCS in the direct structure.

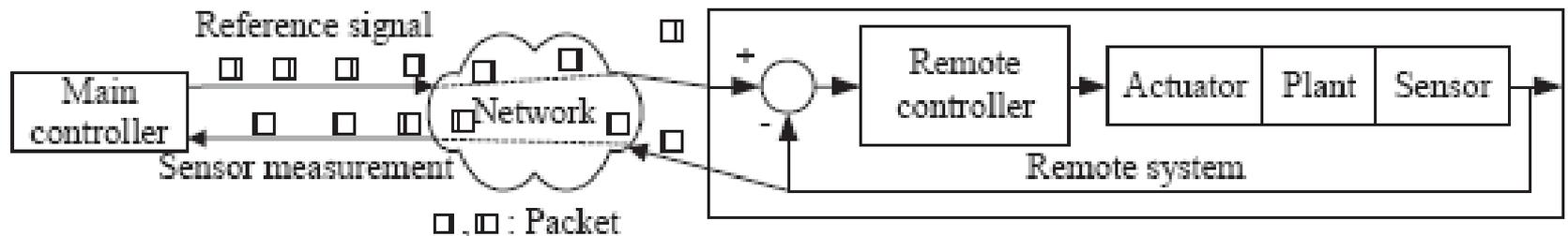
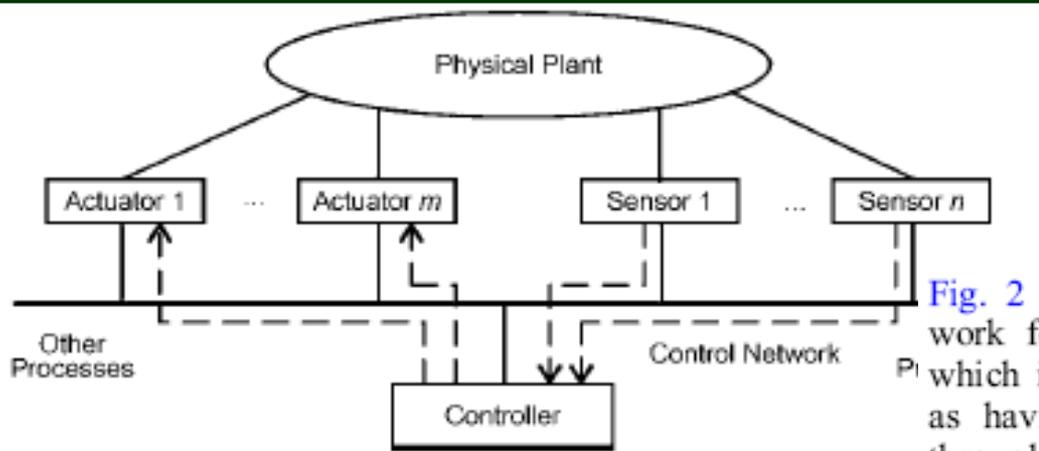


Fig. 2. NCS in the hierarchical structure.

Tipsuwan 2003

*Quid du multi-boucle ?*

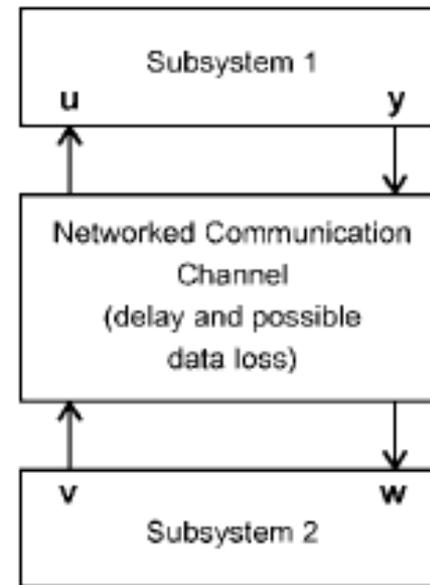
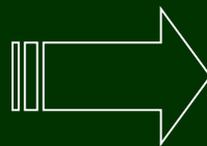
# NCS multi-boucle selon [Yang 2006] :



**Fig. 1** Typical NCS setup and information flows

Yang 2006

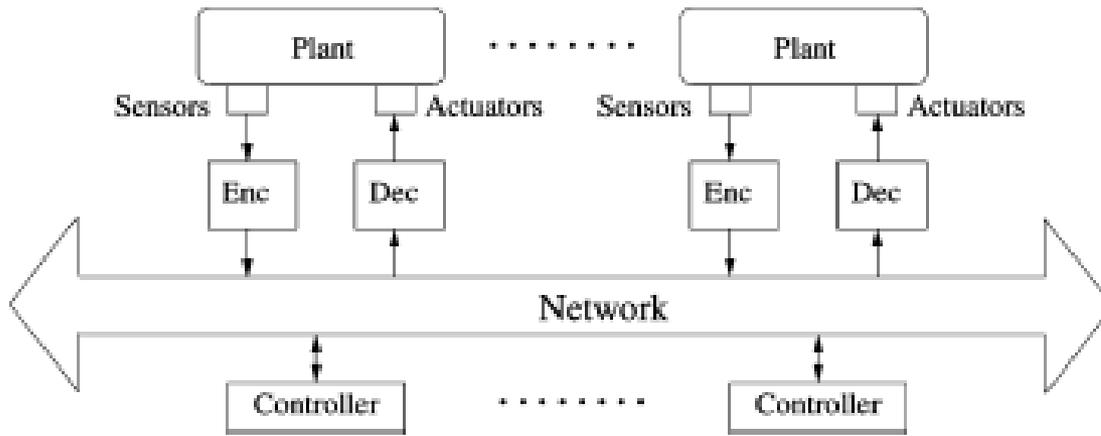
Fig. 2 is a block diagram, representing a general framework for the study of networks and control. An NCS, which is the main topic of this paper, can be considered as having **two subsystems** interacting with each other through networked communication channels. Here, it is



Yang 2006

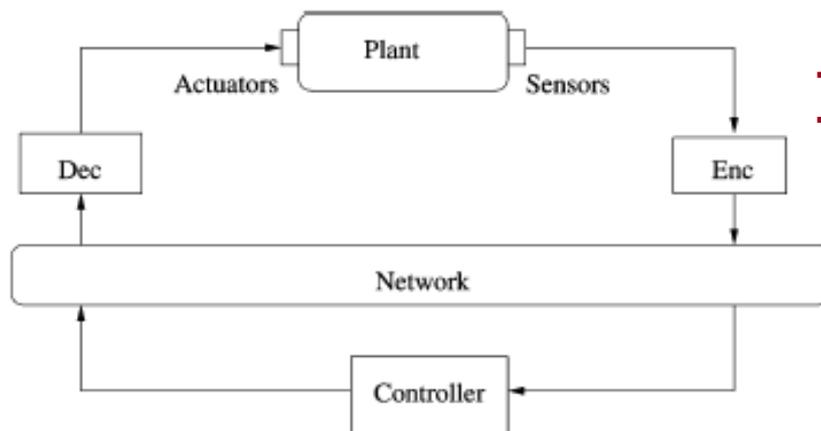
**Fig. 2** General framework for networks and control

# NCS multi-boucle selon [Hespanha 2007] :



**Fig. 1.** General NCS architecture.

Hespanha 2007



**Fig. 2.** Single-loop NCS.

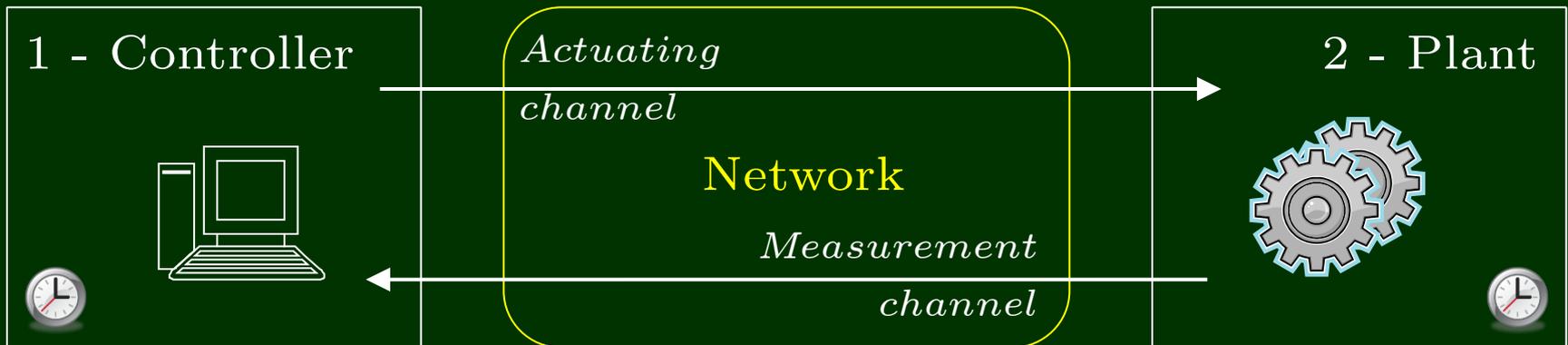
Hespanha 2007

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.

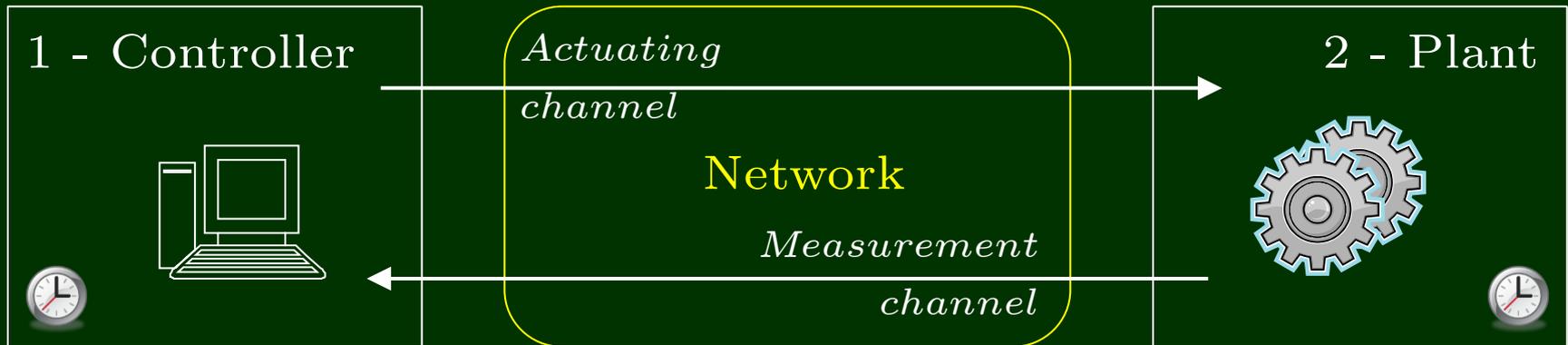
# NCS mono-boucle.

... 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



# NCS boucle unique



## Types de réseau :

- ✓ **spécialisés** (ControlNet, DeviceNet) : transmission fréquente de petits paquets → temps garanti mais €
- ✓ **Ethernet, wifi** : transmission plus rare de paquets plus gros → délais non garantis mais €

# Effets du réseau sur le contrôle en boucle fermée

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

ici

Dans ce contexte, on a l'équation :

*communication + pertes de paquets + échantillonnage = 1 retard*



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

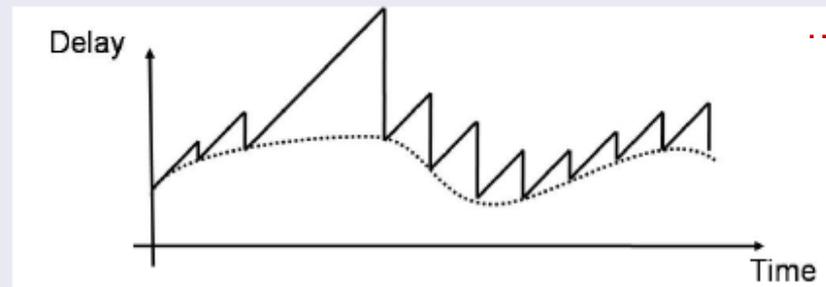


Delay from packet loss :  $nT$



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

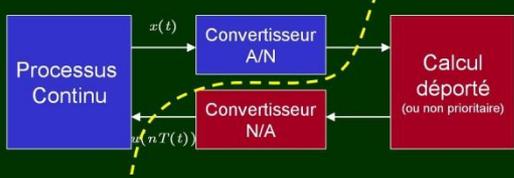
Total time-delay of NCS :  
 $\delta_{con}(t)$  and  $\delta_{obs}(t)$



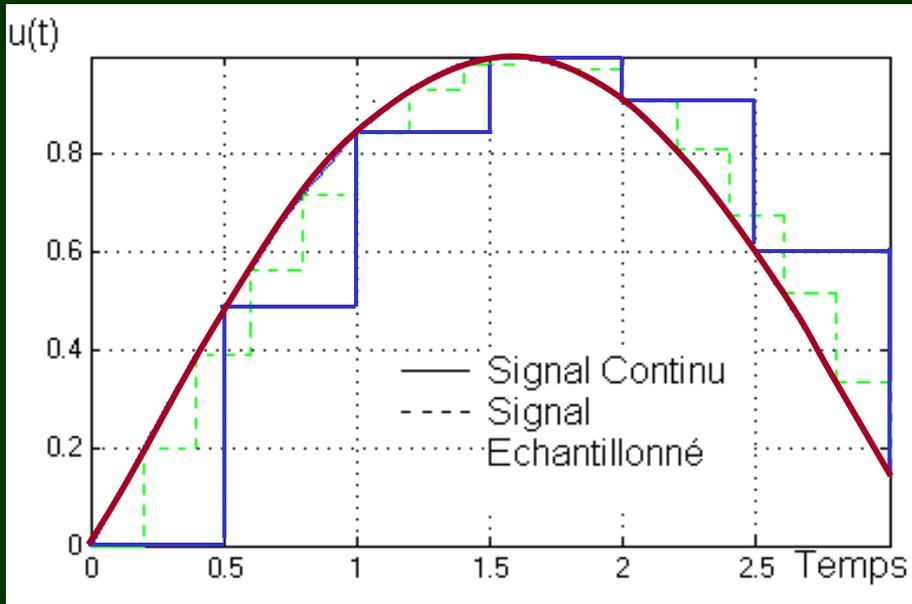
... TSVP

# Overview

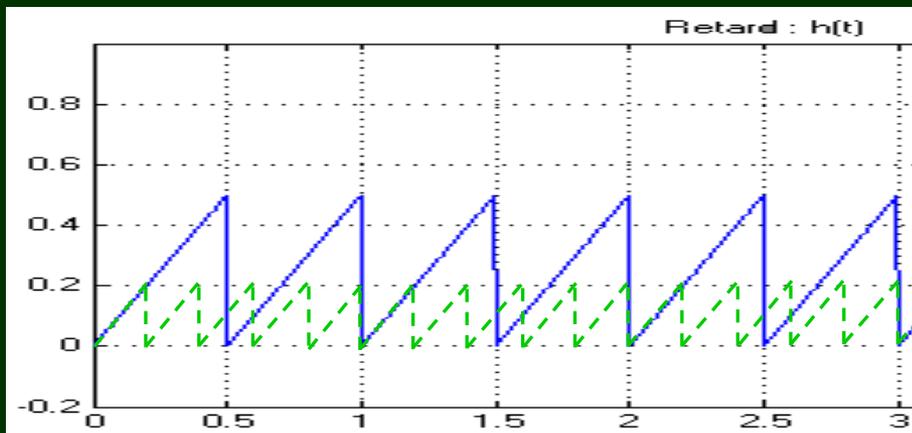
- Motivations et exemples
- Modélisation
- Echantillonnage et retard
- Un exemple rudimentaire
- Commande : *to buff, or not to buff?* Sélection de résultats
- Conclusions



Fridman, Seuret, JPR - *Automatica* 2004



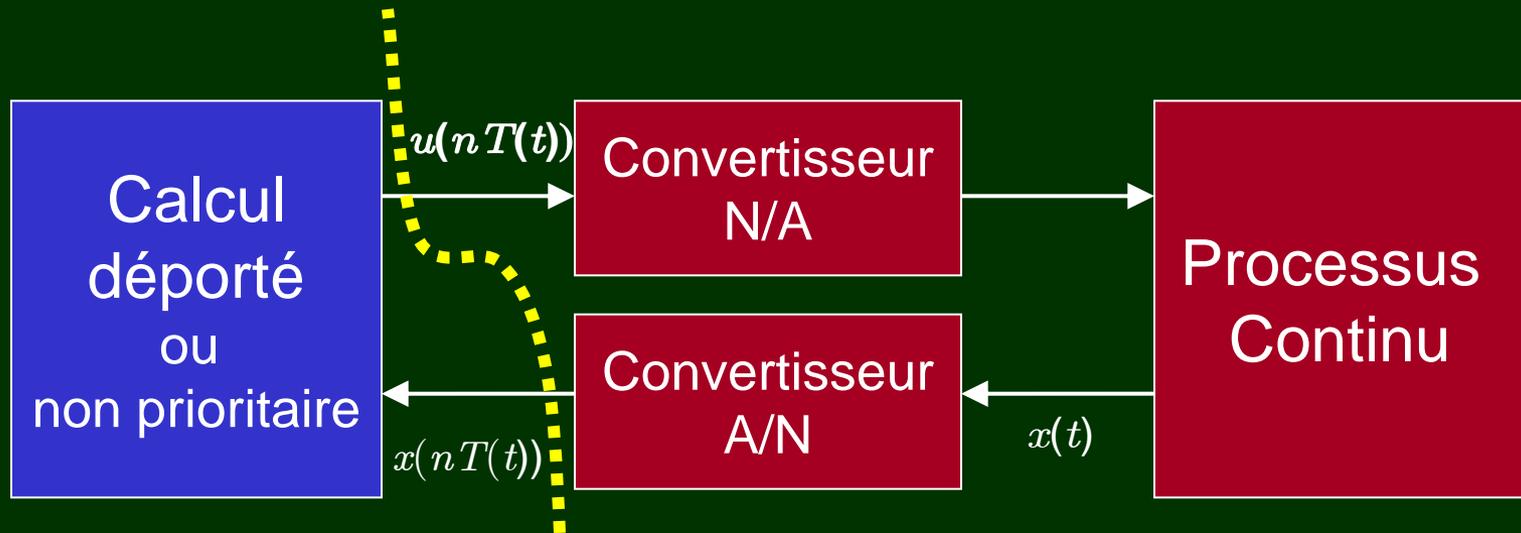
Signal échantillonné bloqué (ici, à période constante)



Signal retardé par  $h(t)$  variable

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

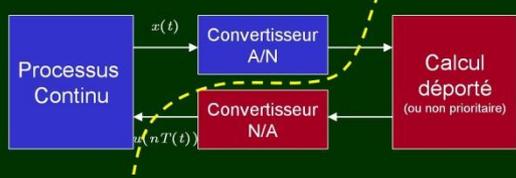
## échantillonnage et retard



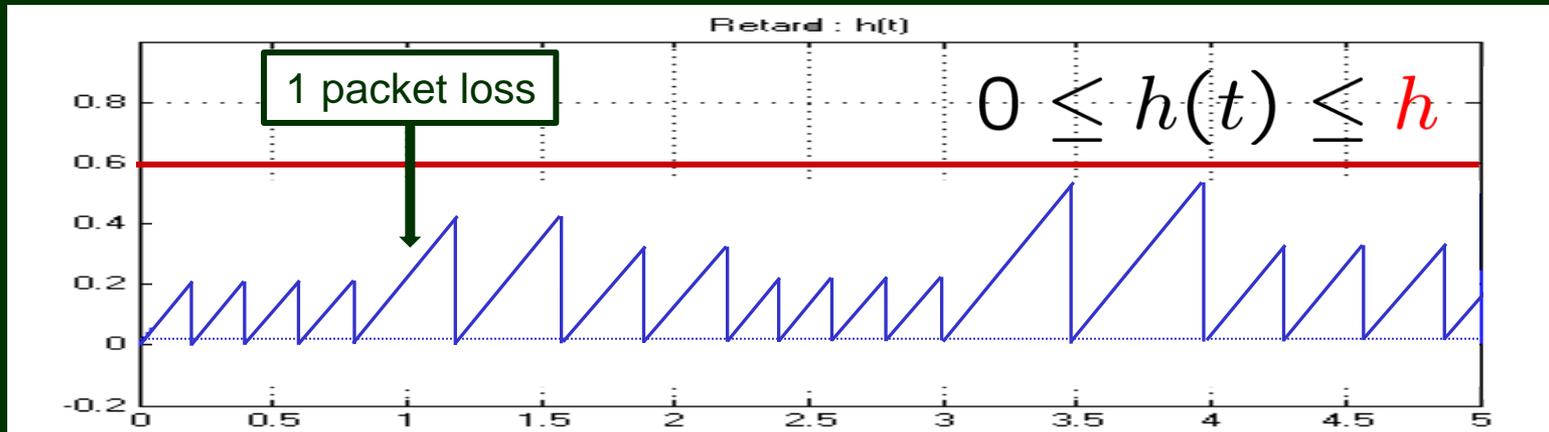
perte de paquet,  
ordonnancement de tâches...

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

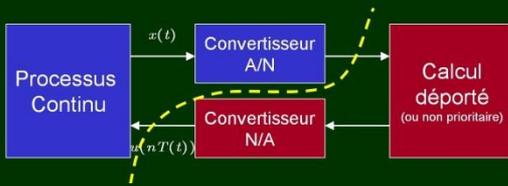
$$u(t) = u_d(t_k) = g(x(t_k)), \quad t_k \neq kT$$



## Re-formulation du problème



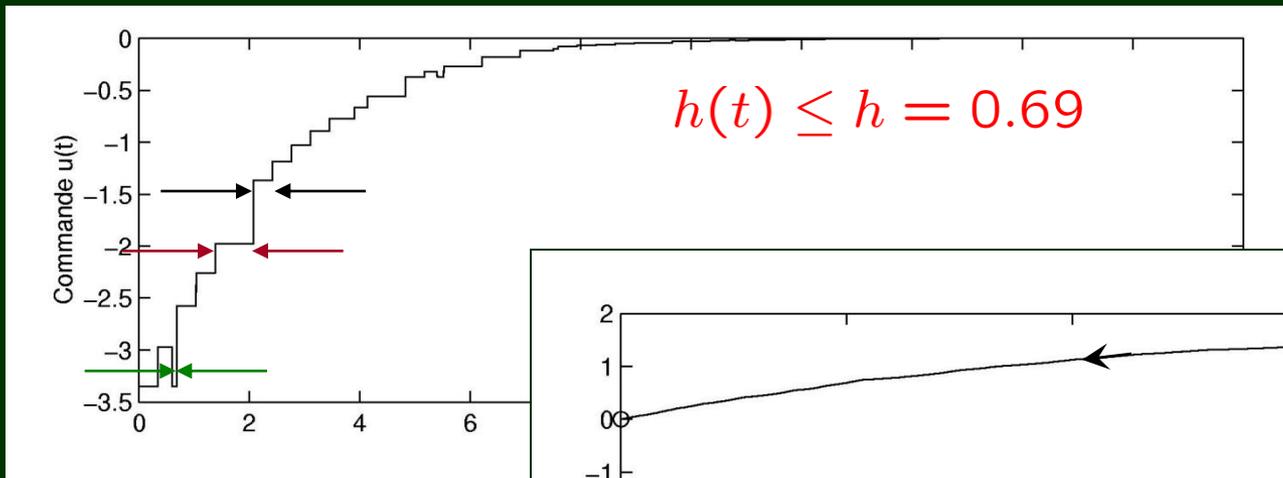
- influence de l'intervalle *maxi* d'échantillonnage  $h$
- critères de stabilité à  $\dot{h}(t) \leq 1$



Exemple :  
instable → glob. as. stable

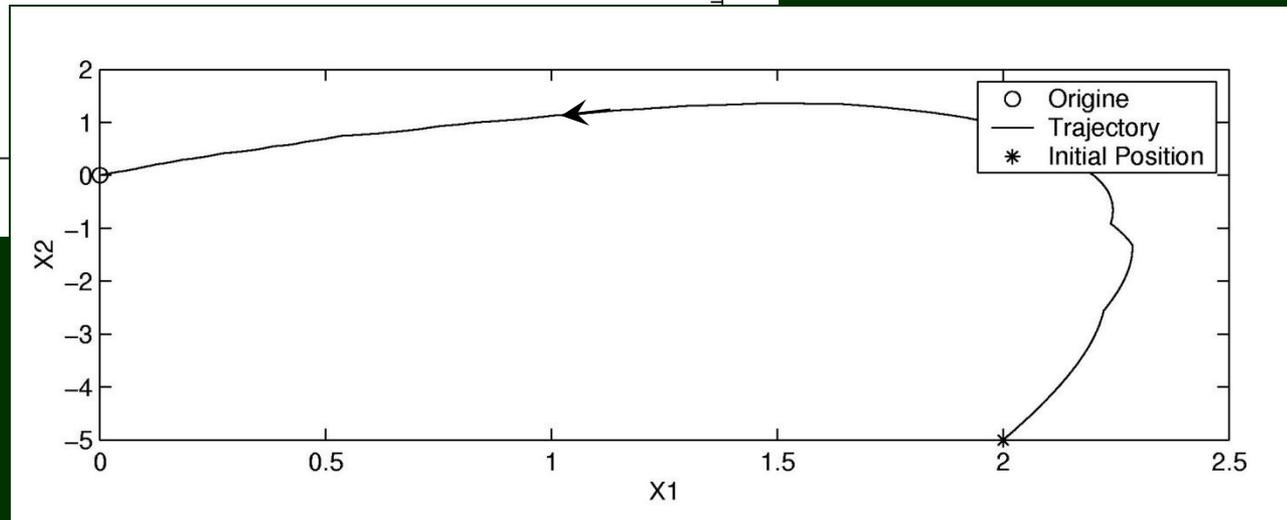
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} Kx(t_k) \\ \Rightarrow K = \begin{bmatrix} -1.05 & 0.25 \end{bmatrix} \end{cases}$$

avec sat possible



$$h(t) \leq h = 0.69$$

valeur limite en simu (T=cte) : 0.7



Remarque :  
approche de l'échantillonnage variable par *switched systems*

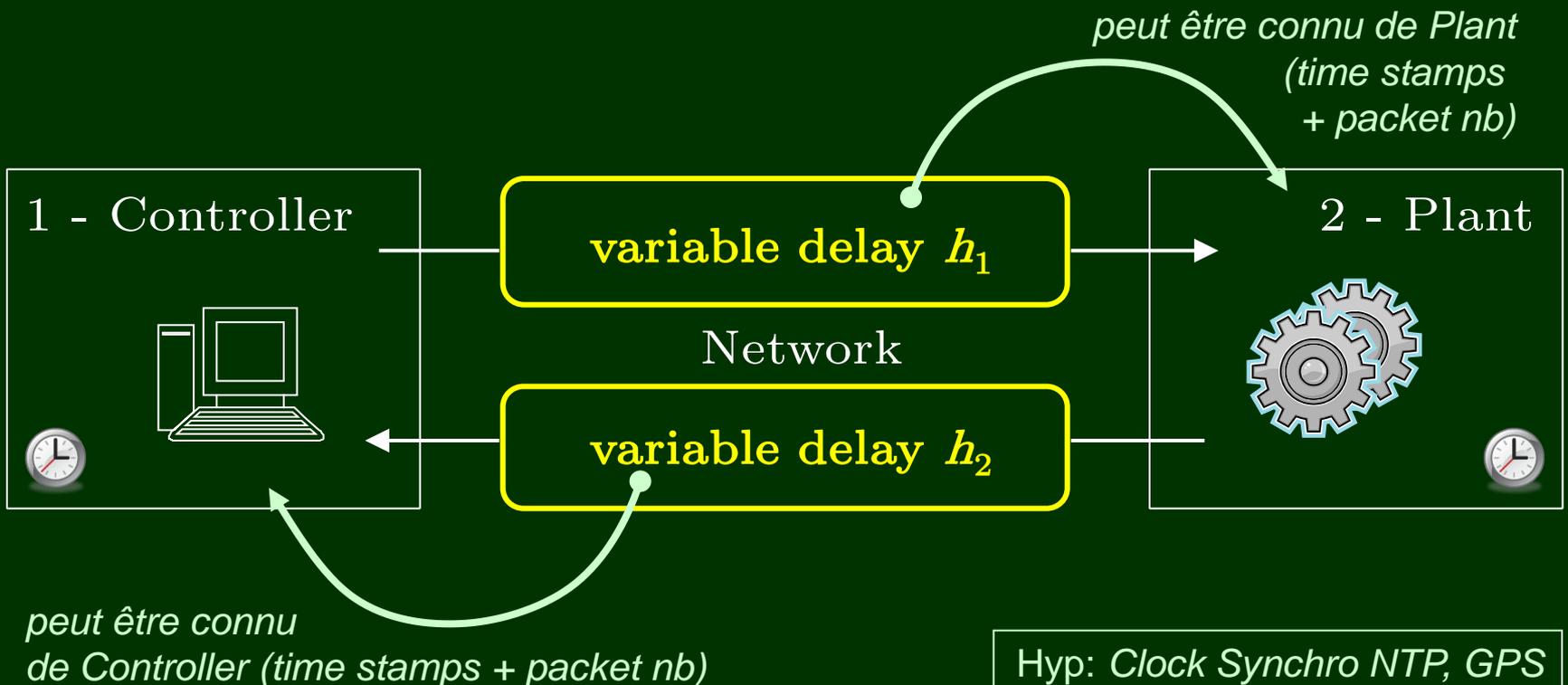
*cf. conférence de Laurentiu Hetel*

# Pour résumer jusqu'ici...

transmission + accès + pertes paquets + échantillonnage...

**= 2 retards variables**

connus / inconnus ?

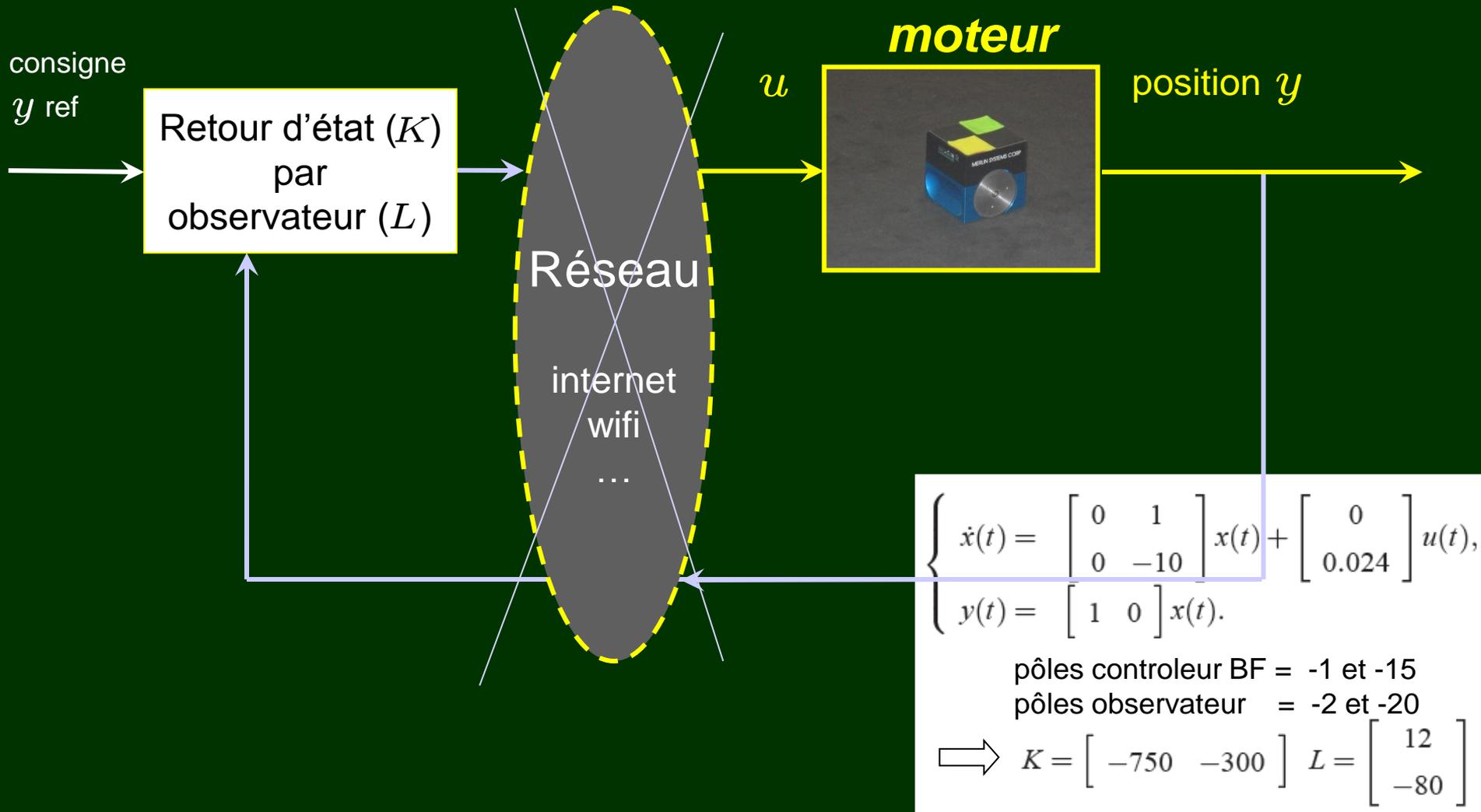


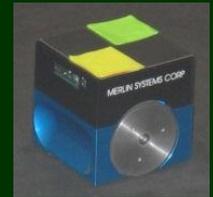
# Overview

- Motivations et exemples
- Modélisation
- Echantillonnage et retard
- **Un exemple rudimentaire**
- Commande : *to buff, or not to buff?* Sélection de résultats
- Conclusions

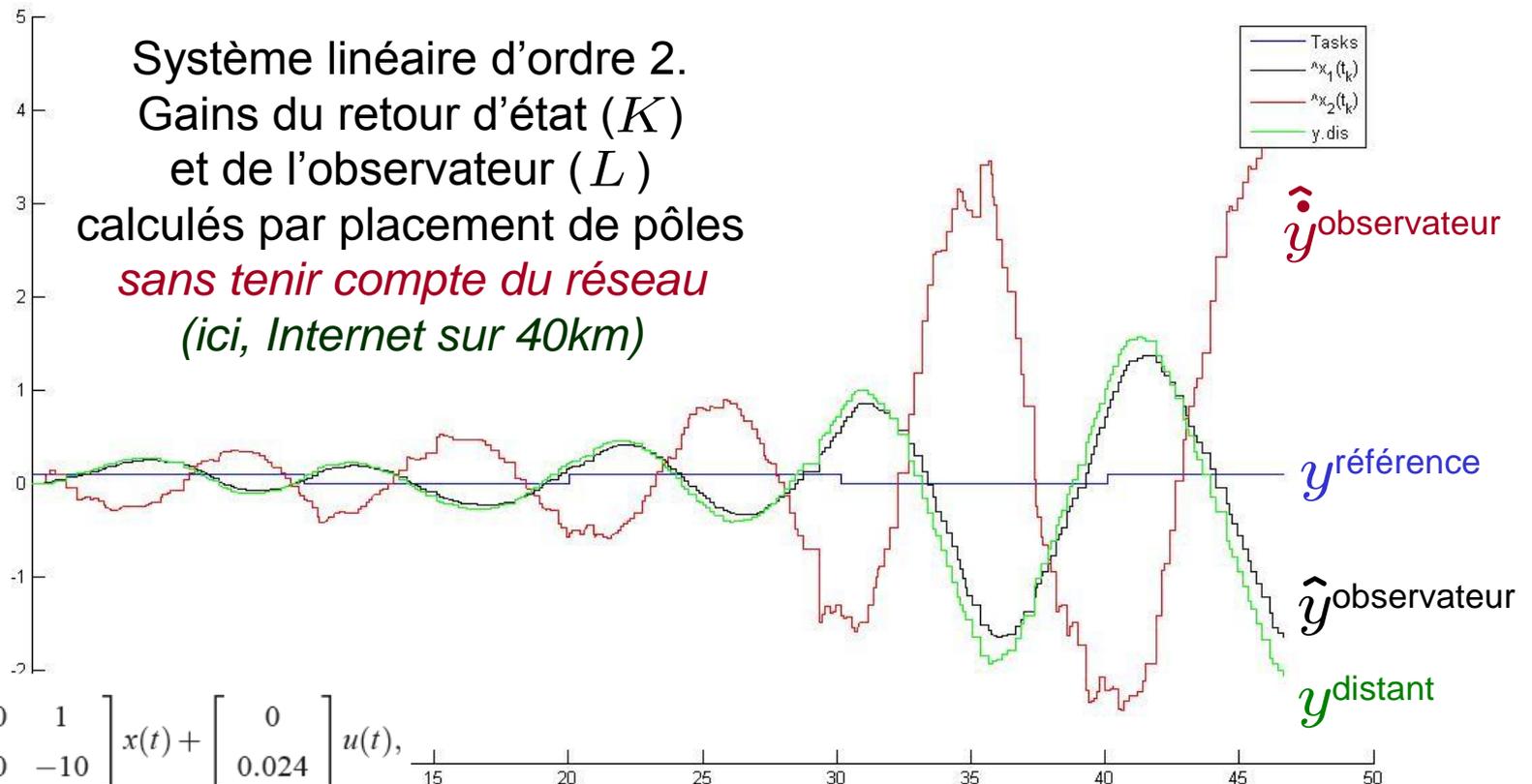
# Un exemple rudimentaire

théorie (effet réseau négligé)





## expérimentation (avec réseau)



$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -10 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.024 \end{bmatrix} u(t), \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t). \end{cases}$$

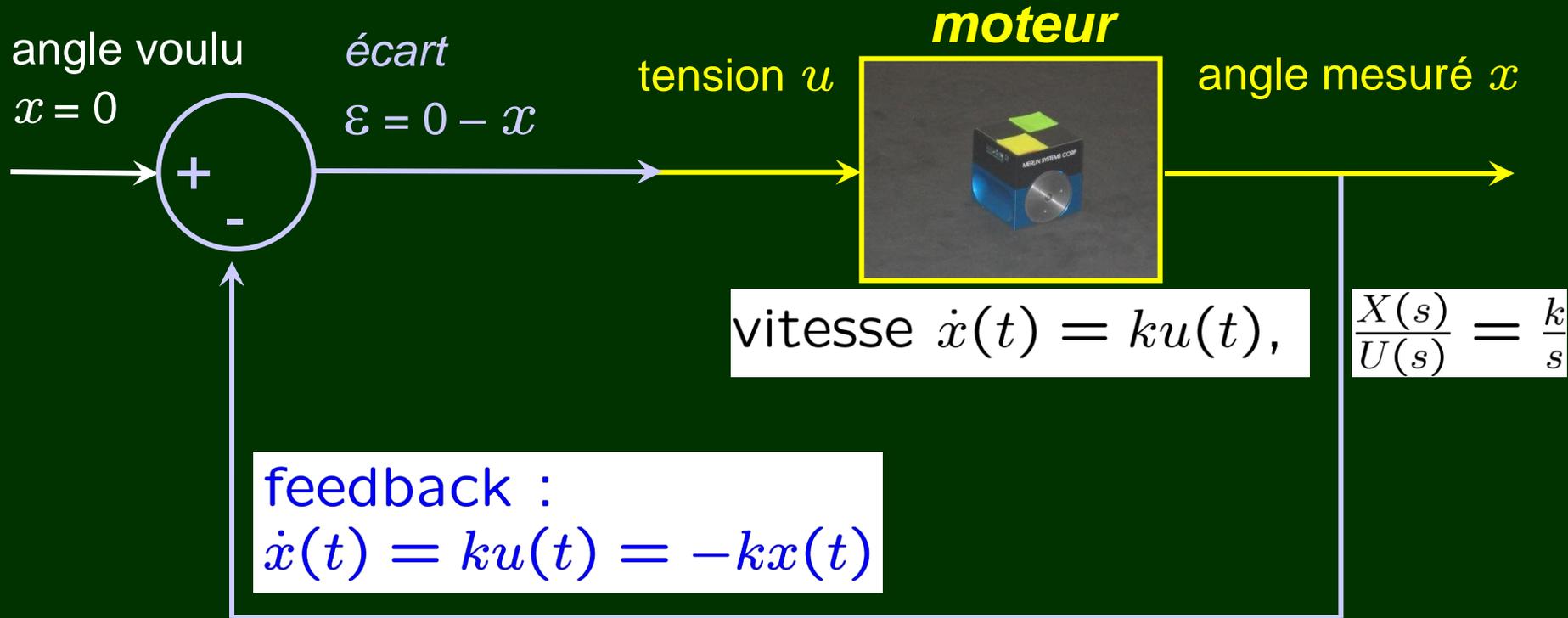
pôles contrôleur BF = -1 et -15

pôles observateur = -2 et -20

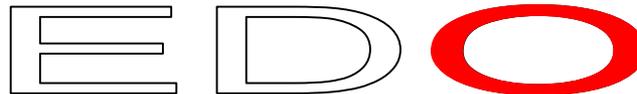
$$\Rightarrow K = \begin{bmatrix} -750 & -300 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} 12 \\ -80 \end{bmatrix}$$

# Un exemple rudimentaire

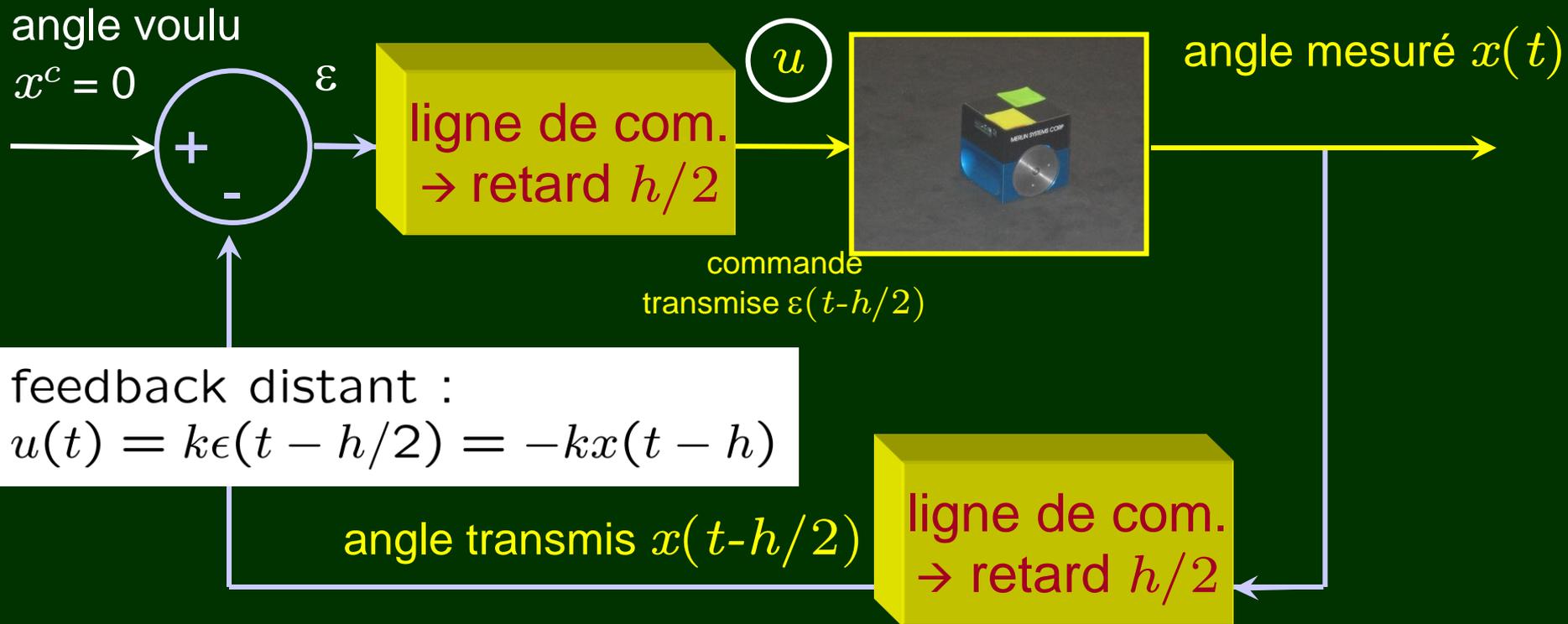
## Interprétation sur un modèle simplifié



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



# Un exemple rudimentaire



feedback distant :  
 $u(t) = k\epsilon(t - h/2) = -kx(t - h)$

angle transmis  $x(t-h/2)$

ligne de com.  
 $\rightarrow$  retard  $h/2$

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

E D F

## Un exemple rudimentaire

### Exercice...

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

(cas  $h = 1, k = 1$ )

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

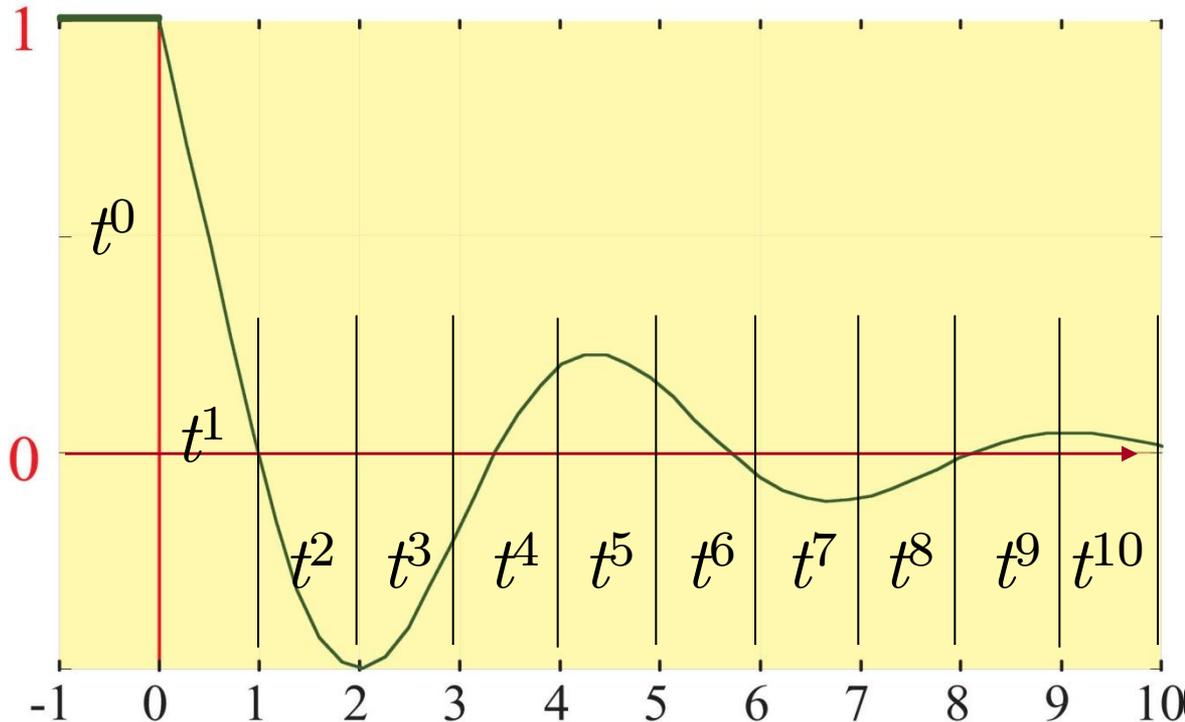
C.I.  $t = 0 : x(t = 0) = 1$  ??

$t \in [-1, 0] : x(t) = 1$  (C.I.)

$t \in [0, 1] : x(t) = 1 - t,$

$t \in [1, 2] : x(t) = \frac{1}{2} - t + \frac{t^2}{2},$

etc.



## Un exemple rudimentaire

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

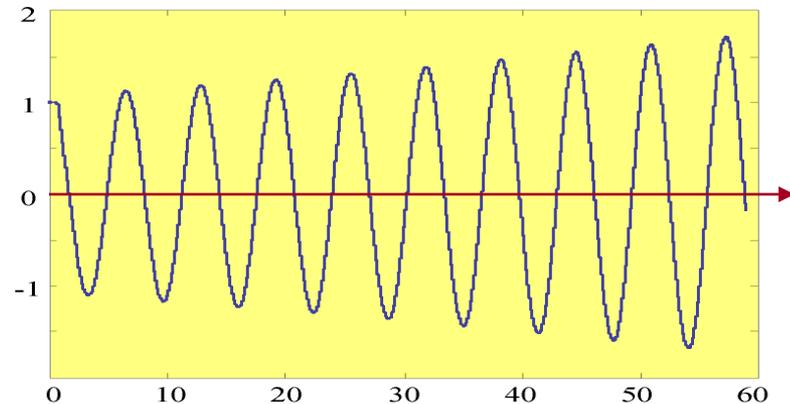
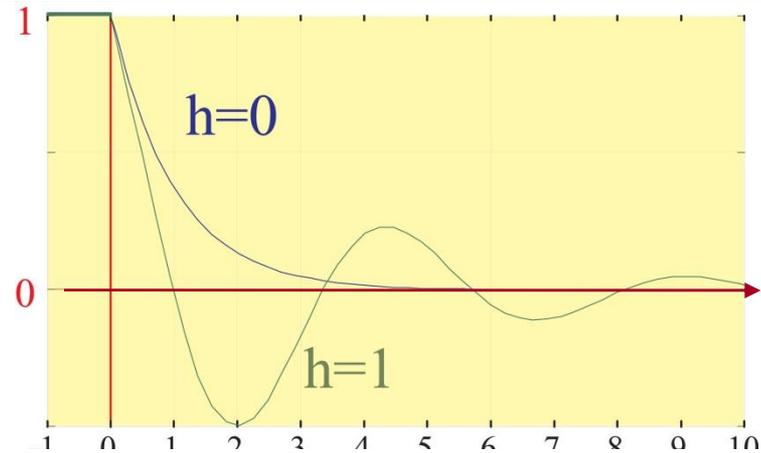
selon  $h$  ?

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

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

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

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

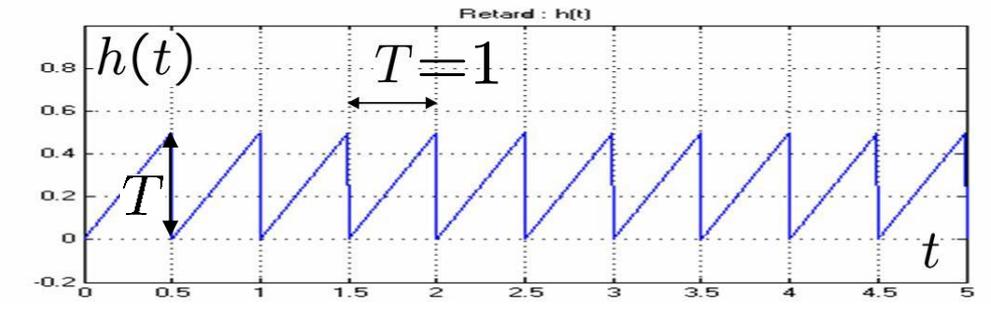


## Un exemple rudimentaire

... et attention aux retards variables !

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

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

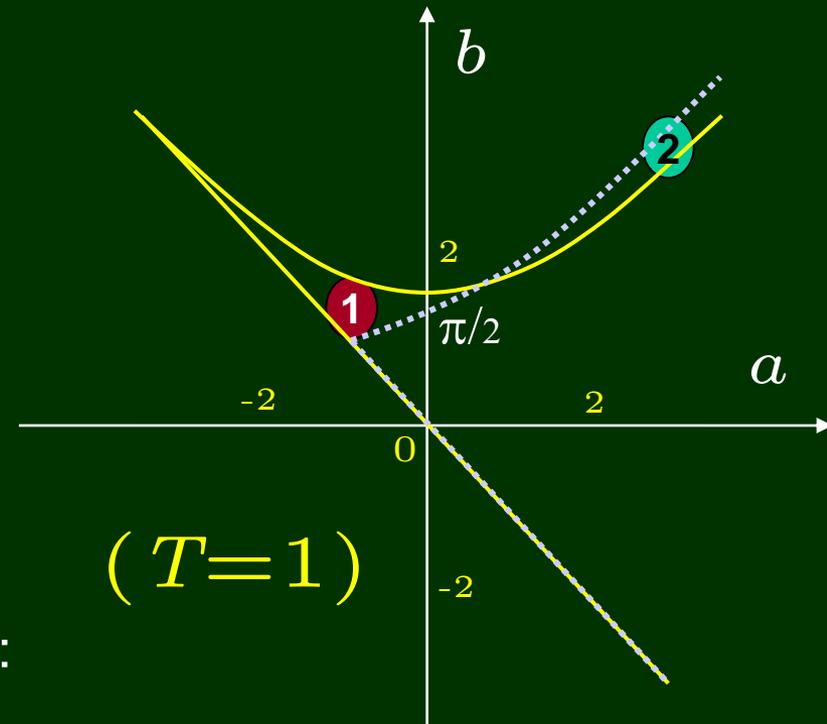


variable : asymptot. stable ssi (zone jaune) :

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

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

constant :  $\forall h \in [0,1]$  ssi (zone grise)



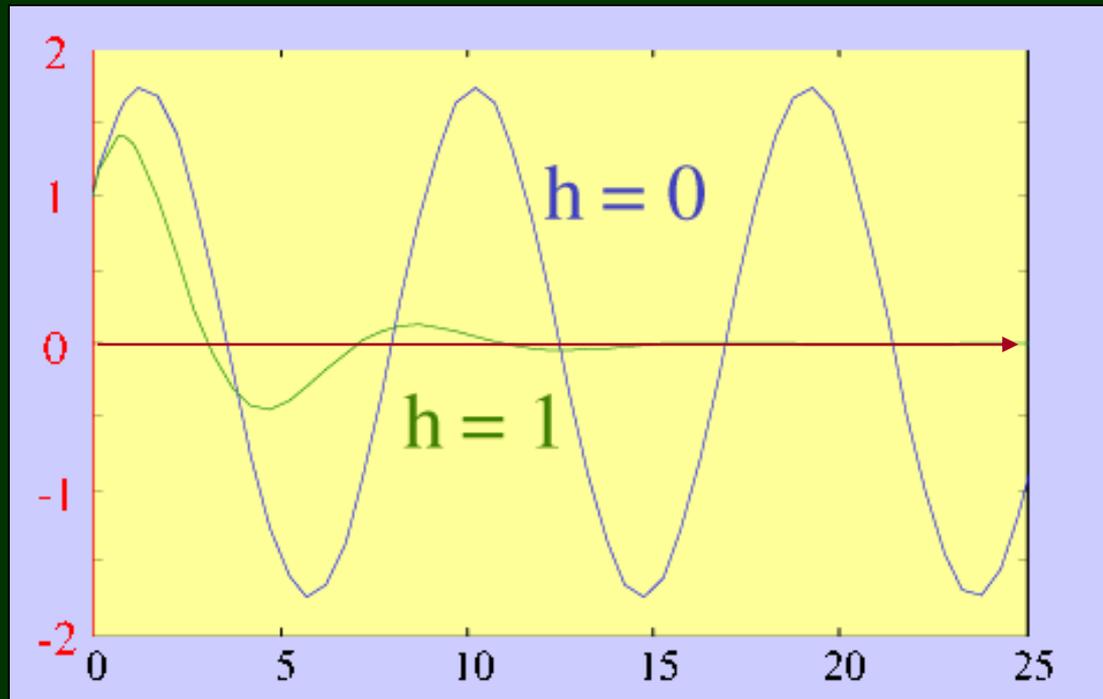
( $T=1$ )

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

*Un exemple rudimentaire*

(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 :**

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



$$V(x(t)) = x^2(t) > 0$$

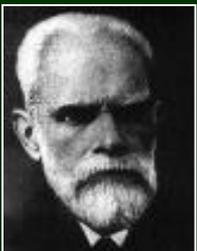
$$\dot{V}(x(t)) = -2 ax^2(t) < 0 \dots \text{etc.}$$

**EDF :**

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

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

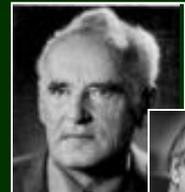
$$\dot{V}(x(t)) = -2 [ax^2(t) + \underbrace{bx(t)x(t-h)}_{\text{termes croisés}}] \leq \dots ?$$



→ besoin de méthodes spécifiques :

1) fonctions de Lyapunov-Razumikhin (pas ici)

2) fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii



# Illustration de l'approche LKF

(Lyapunov-Krasovskii functionals)

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

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

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

Remarques sur le conservatisme :

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

## Plus généralement...

## The system model

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

with the initial condition :

x vecteur + retard variable

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

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  $R, R_a, S, S_a \geq 0$ .

# Overview

- Motivations et exemples
- Modélisation
- Echantillonnage et retard
- Un exemple rudimentaire
- **Commande : *to buff, or not to buff?* Sélection de résultats**
- Conclusions

# to buff, or not buff?

## 1<sup>ère</sup> solution = faire « comme si » constant

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

## 2<sup>ème</sup> 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.

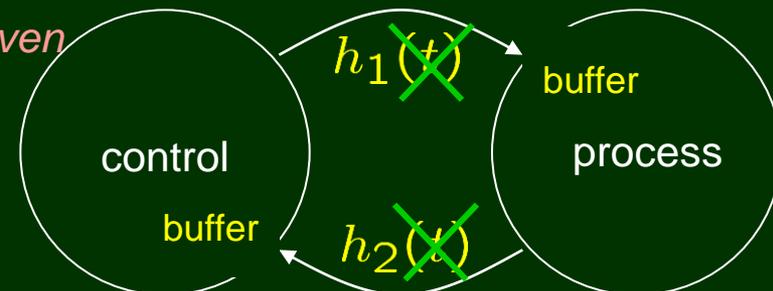
## 3<sup>e</sup> solution (intermédi.) à un seul buffer

[Seuret 06]  
[Jiang et.al 08]

## 4<sup>ème</sup> solution = garder le retard variable...

- ✓ [Witrant et al. 07] [Seuret&Richard 08] → *event-driven*  
[Jiang et al. 09] [Kruszewski et al.11]

Retard de réseau : variable, asymétrique →



# 4.1. Commande avec modèle prédictif du réseau

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

avec un modèle du réseau et sans perte de paquets

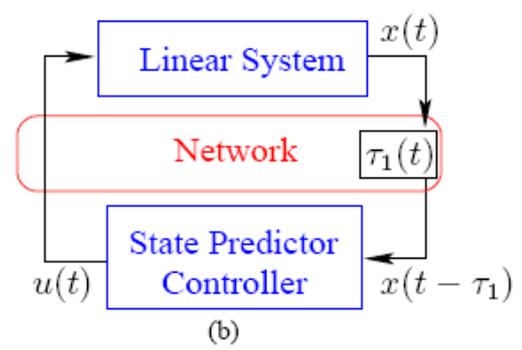
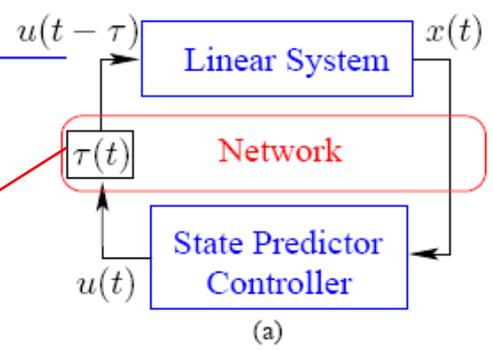
- prédicteur d'état pour retards *variables* (connus, prédits)
- contrôleur type placement de spectre fini (FSA)
- horizon de prédiction variable
- preuves de robustesse (par approche *small gain*)
- application pendule inverse en T

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

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

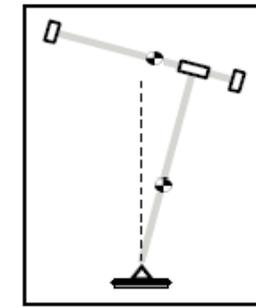
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau(t)), \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= f(z(t), u_d(t)), \quad z(0) = z_0 \\ \tau(t) &= h(z(t), u_d(t)) \end{aligned}$$

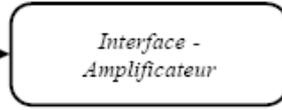


Time-delay on the actuator (a) and measurement (b) signals.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -18.785 & 0 & 14.820 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 56.924 & 0 & -15.181 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 7.520 \\ 0 \\ -8.824 \end{bmatrix} u$$



Système électromécanique



PC développement Windows<sup>TM</sup>

PC contrôlé temps-réel xPC Target

Retard induit par le réseau

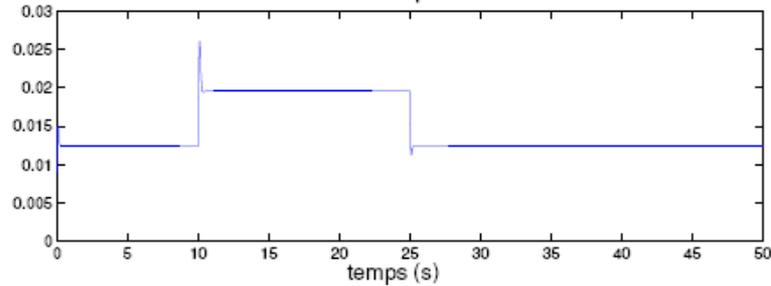
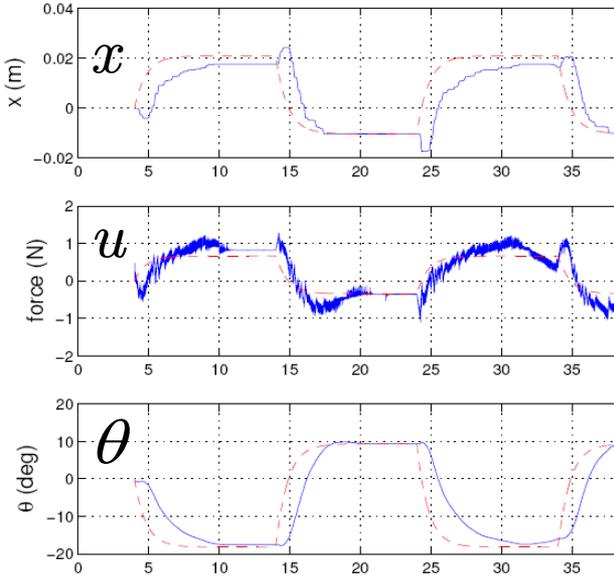
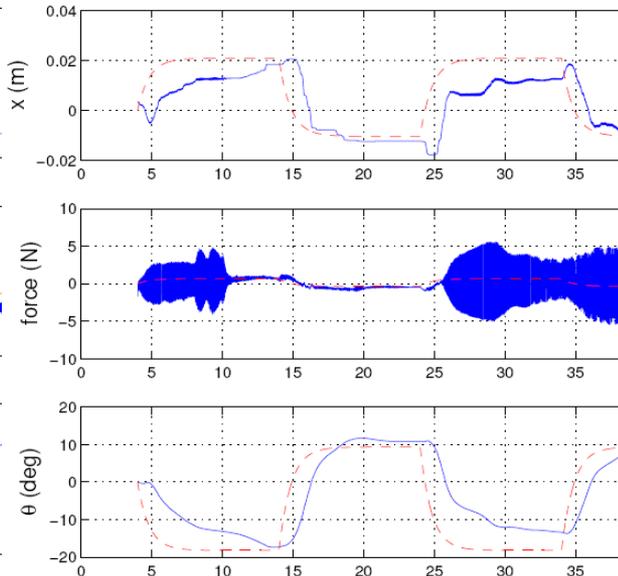


FIG. 5.6 – Banc d'essai expérimental.

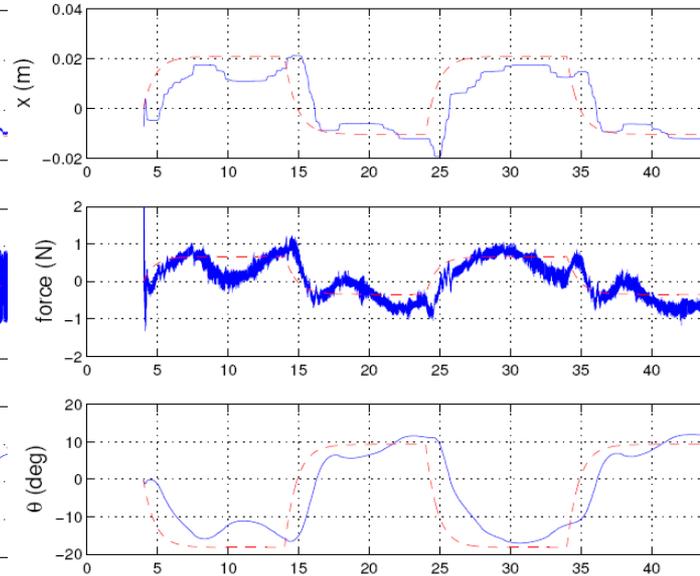
Prédicteur à horizon variable



Prédicteur à horizon fixe



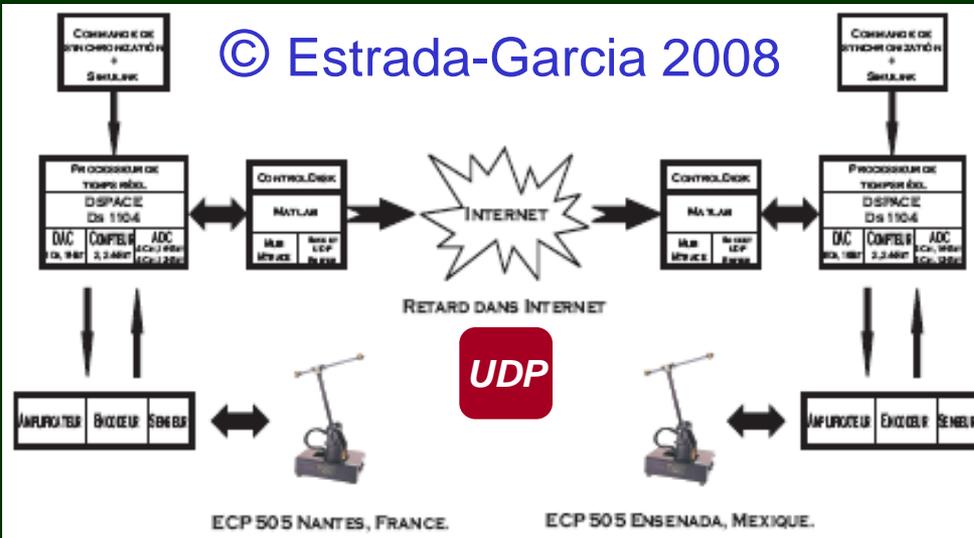
Stratégie de tampon



## 4.2. Commande avec tampons aller+retour

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

© Estrada-Garcia 2008



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

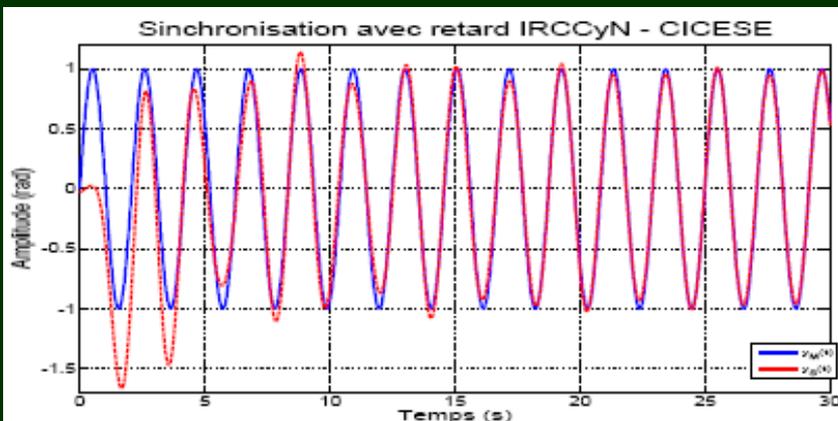
$y^{\text{ref}}$  supposée connue par les deux.

**Stratégie :**

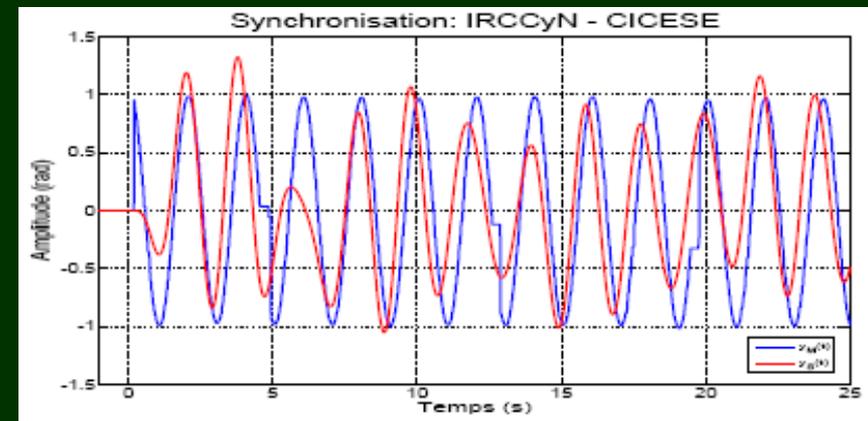
- 1) buffers à 300ms =  $\tau$
- 2) commande tq écart m/e régi par :

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

→ commande causale



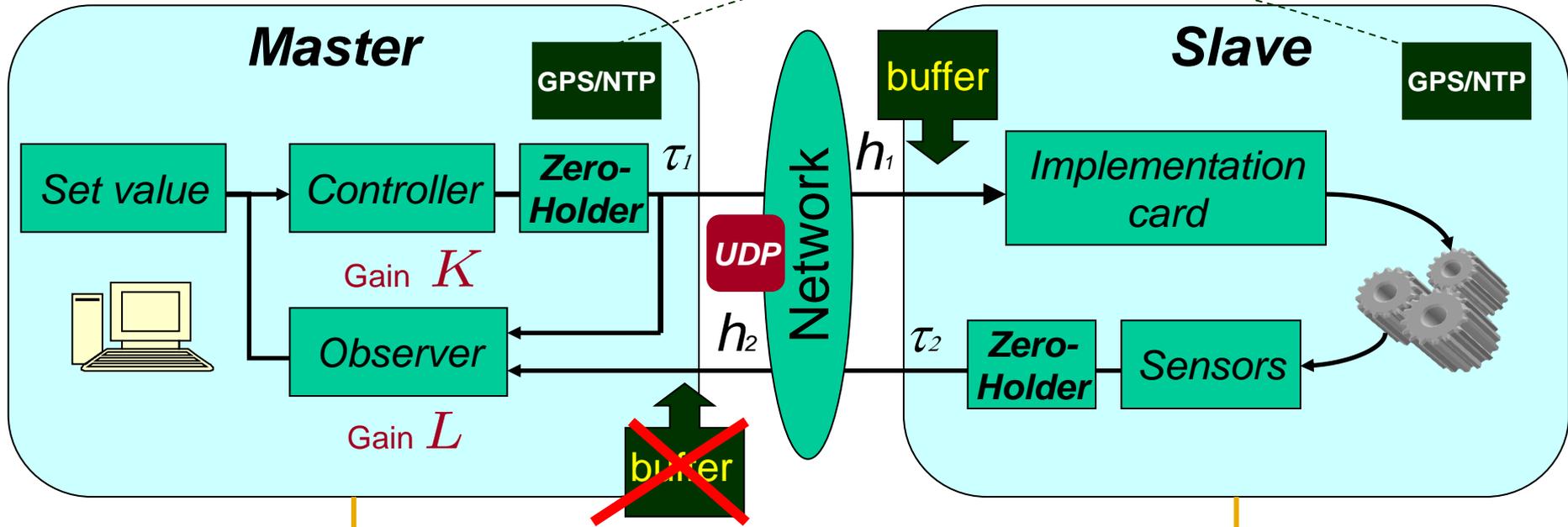
Pendule simulé, réseau réel



Pendule réel, réseau réel

# 4.3. Commande avec tampon aller seul

Thèse A. Seuret 2006 (+Dambrine, Richard)



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

connu grâce au buffer

connu grâce aux time-stamps

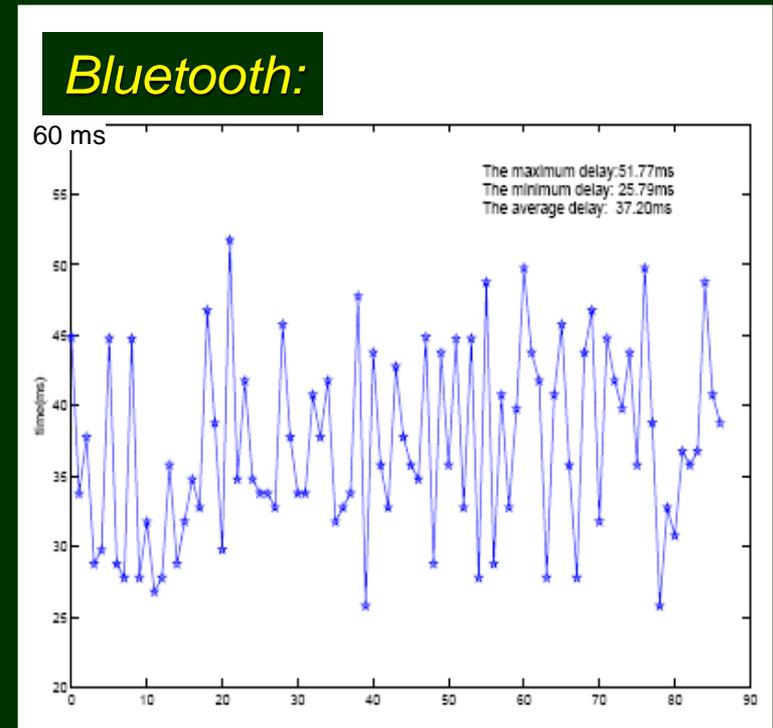
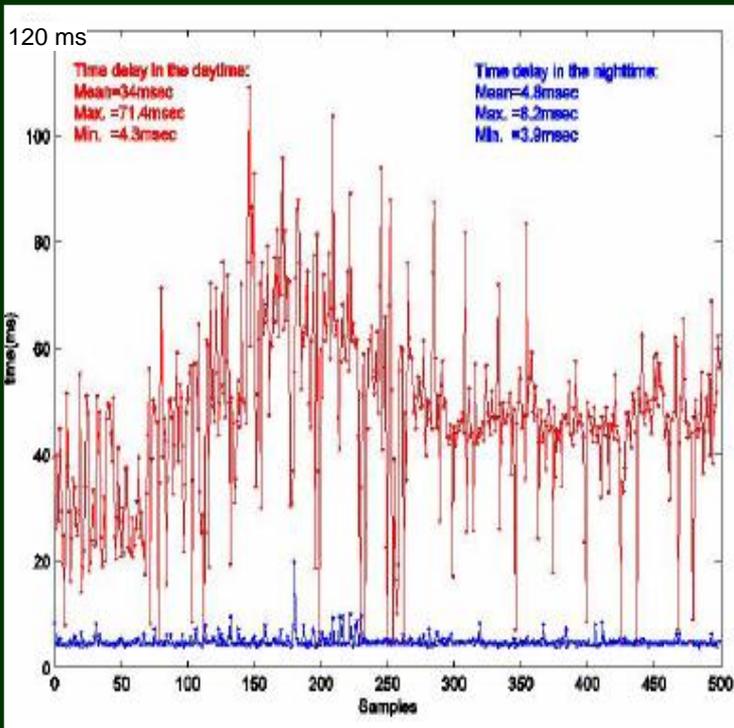
- fixe la consigne
- reçoit la sortie de Slave
- observe l'état de Slave
- calcule & envoie commande

• Puissance de calcul limitée

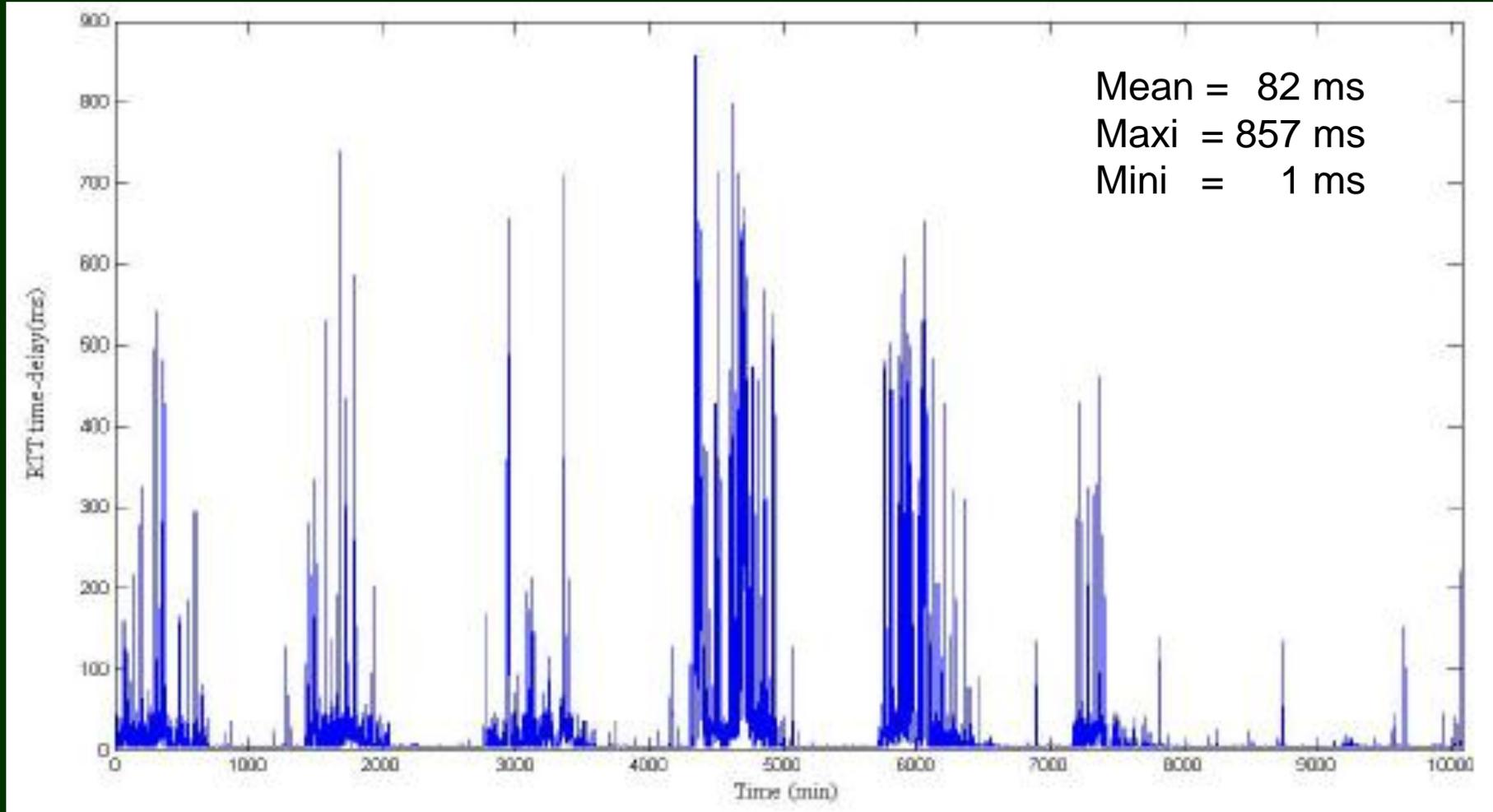
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \delta_1(t)), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases}$$

- reçoit & applique commande
- envoie la sortie mesurée

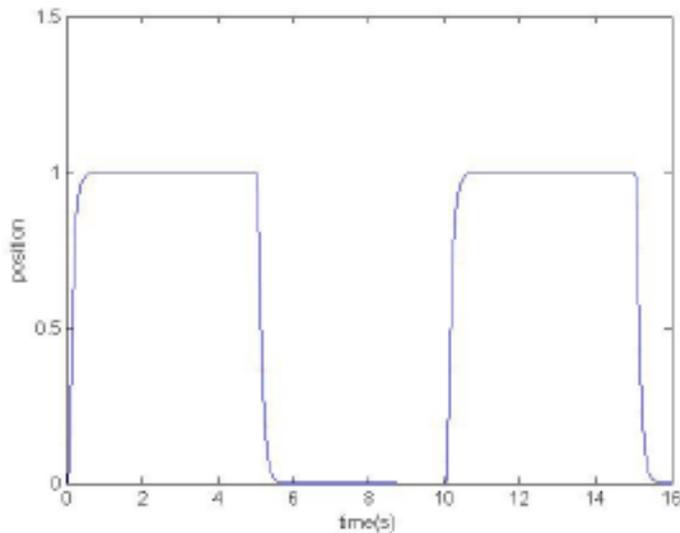
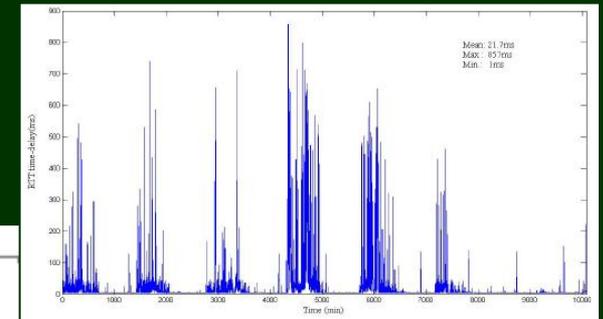
Passage à l'expérimental + adaptation à la QoS disponible



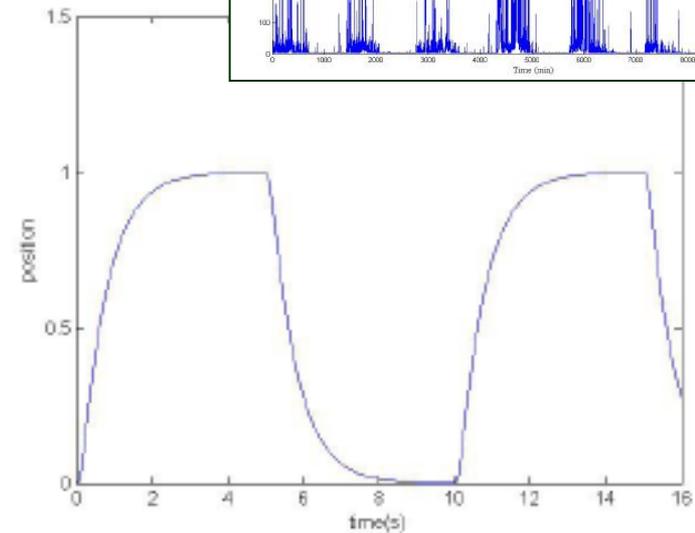
# Une semaine de RTT...



# 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  $\chi(\delta_{con}(t)) = \chi(\delta_{obs}(t))$ .

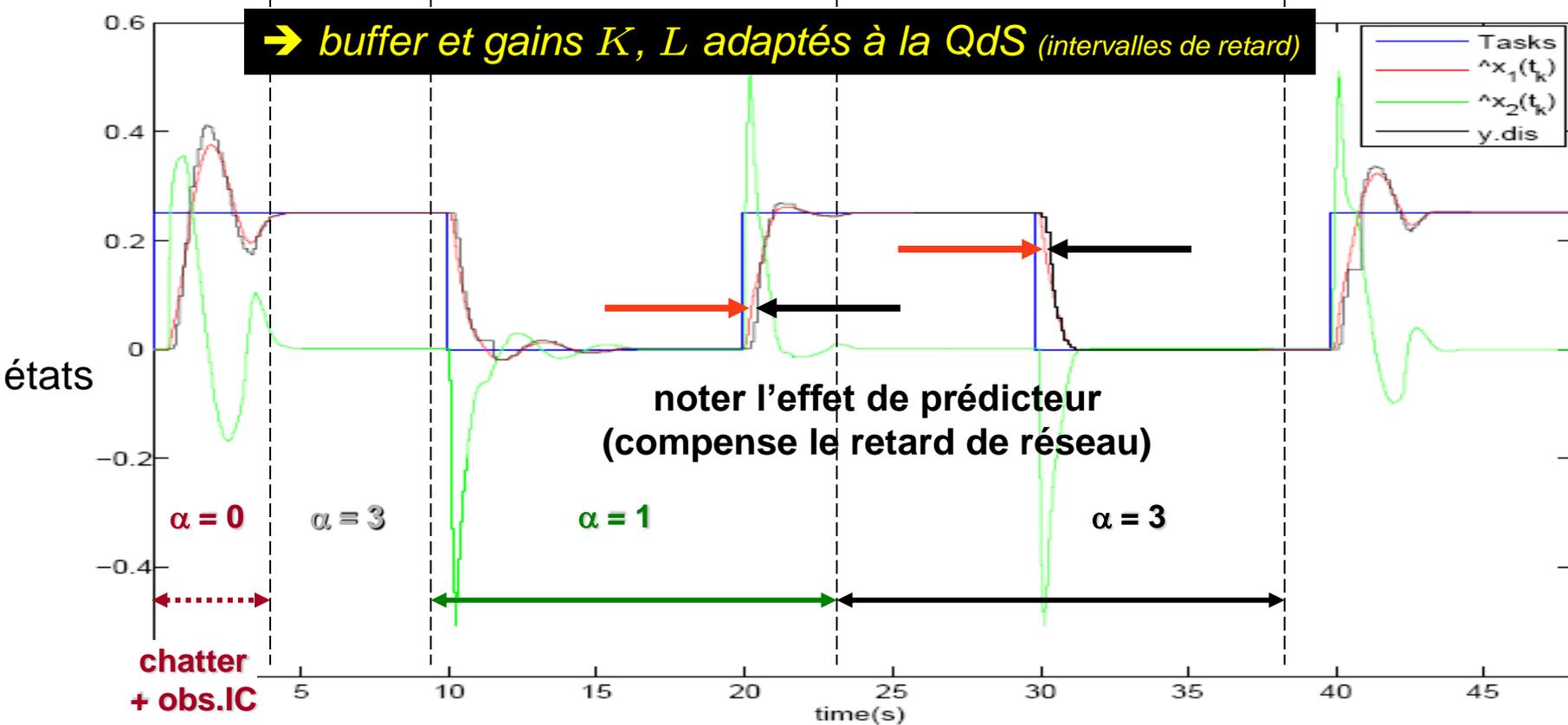
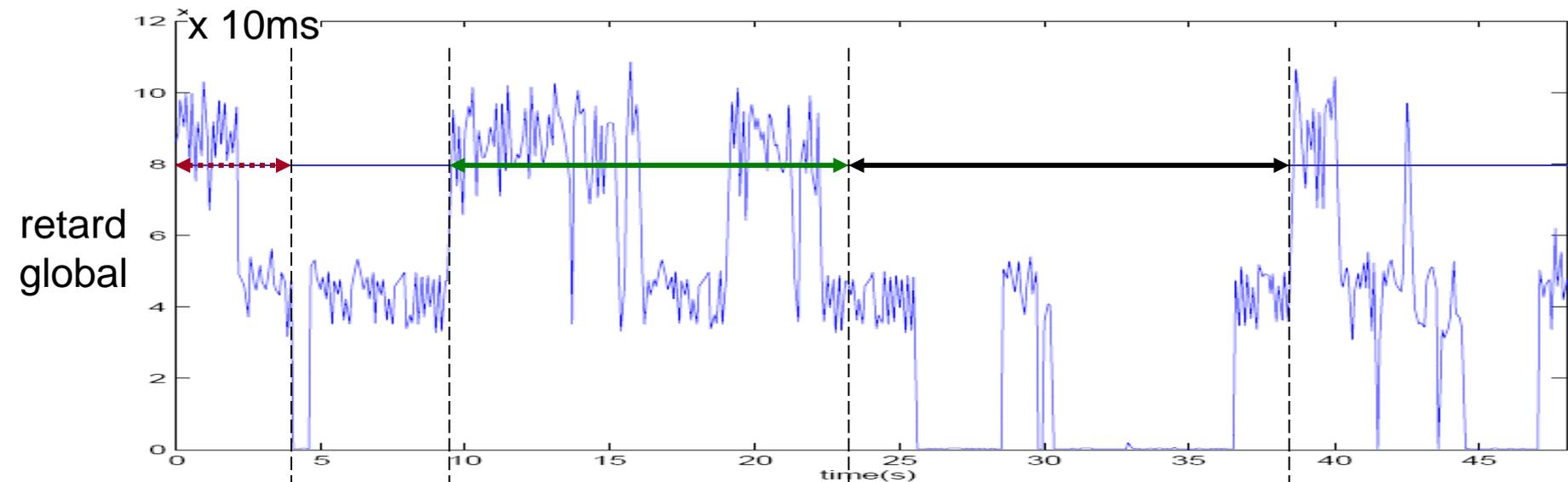
## General switched system

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

## The LKF :

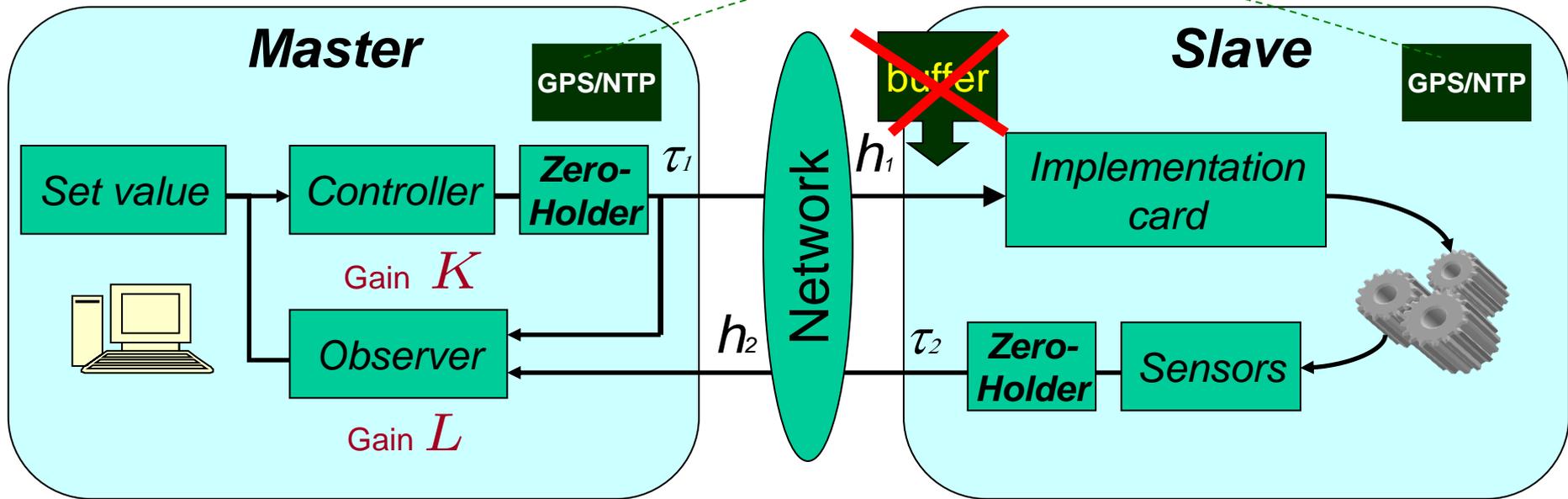
$$V(t, x_t, \dot{x}_t) = x^T(t)Px(t) + \sum_{i=0}^2 \int_{t-h_{i+1}}^t x^T(s)S_i x(s) ds + \sum_{i=0}^2 (h_{i+1} - h_i) \int_{-h_{i+1}}^{-h_i} \int_{t+\theta}^t x^T(s)R_i \dot{x}(s) ds d\theta, \quad (12)$$

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, A. Kruszewski *et al.* (expérim.+switches)  
cf. IEEE T. CST 2011

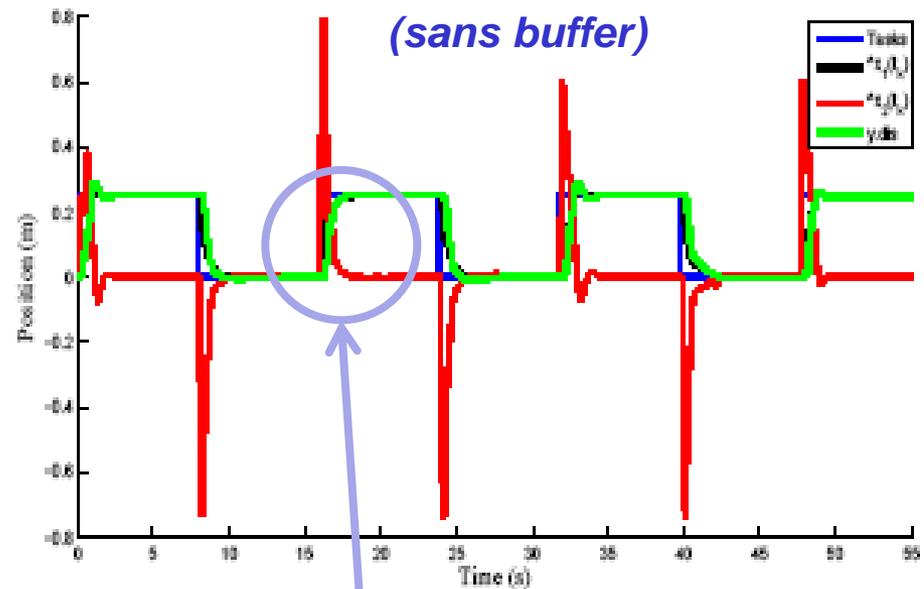
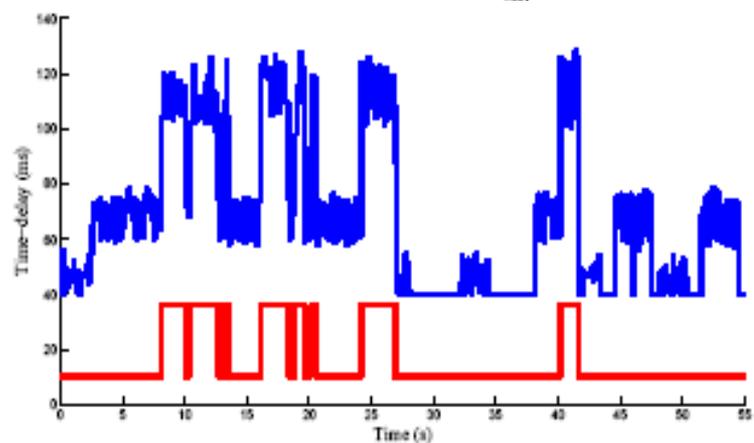
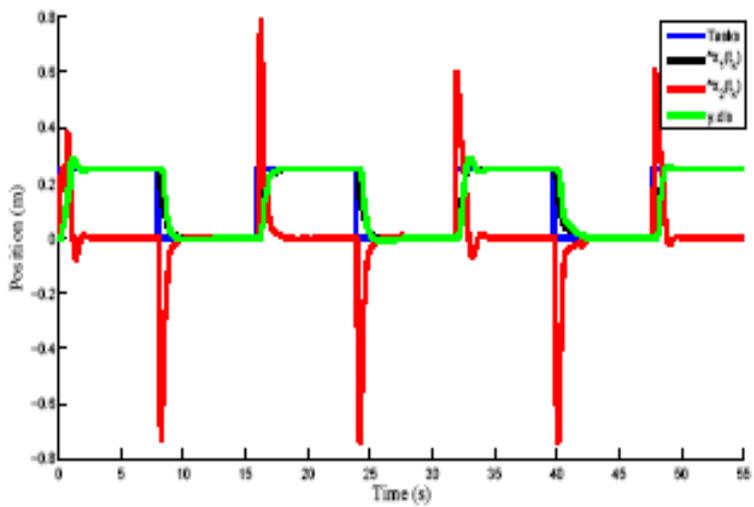


$$\hat{\delta} \neq \delta$$

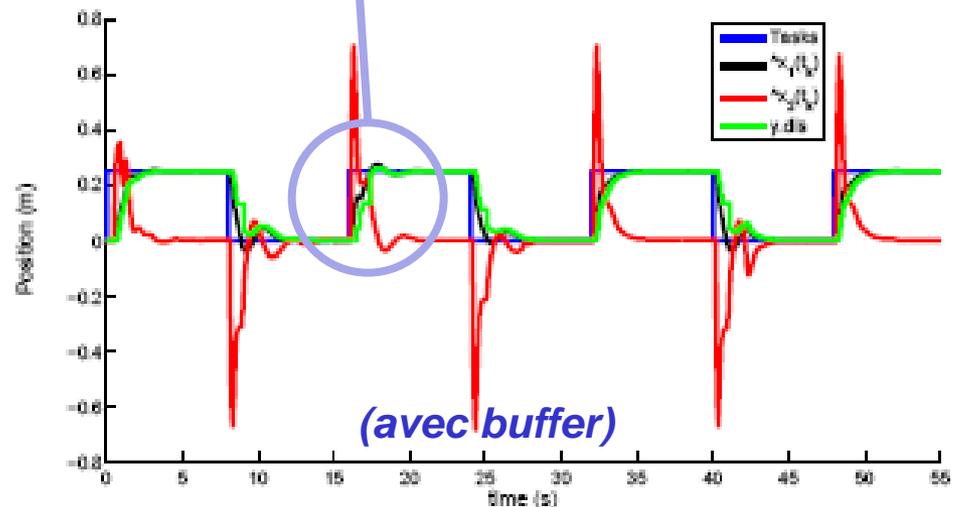
$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t - \hat{\delta}_1(t)) \\ \quad -L(y(t - \delta_2(t)) - \hat{y}(t - \delta_2(t))), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \end{cases}$$

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

# Results from the event-driven mode

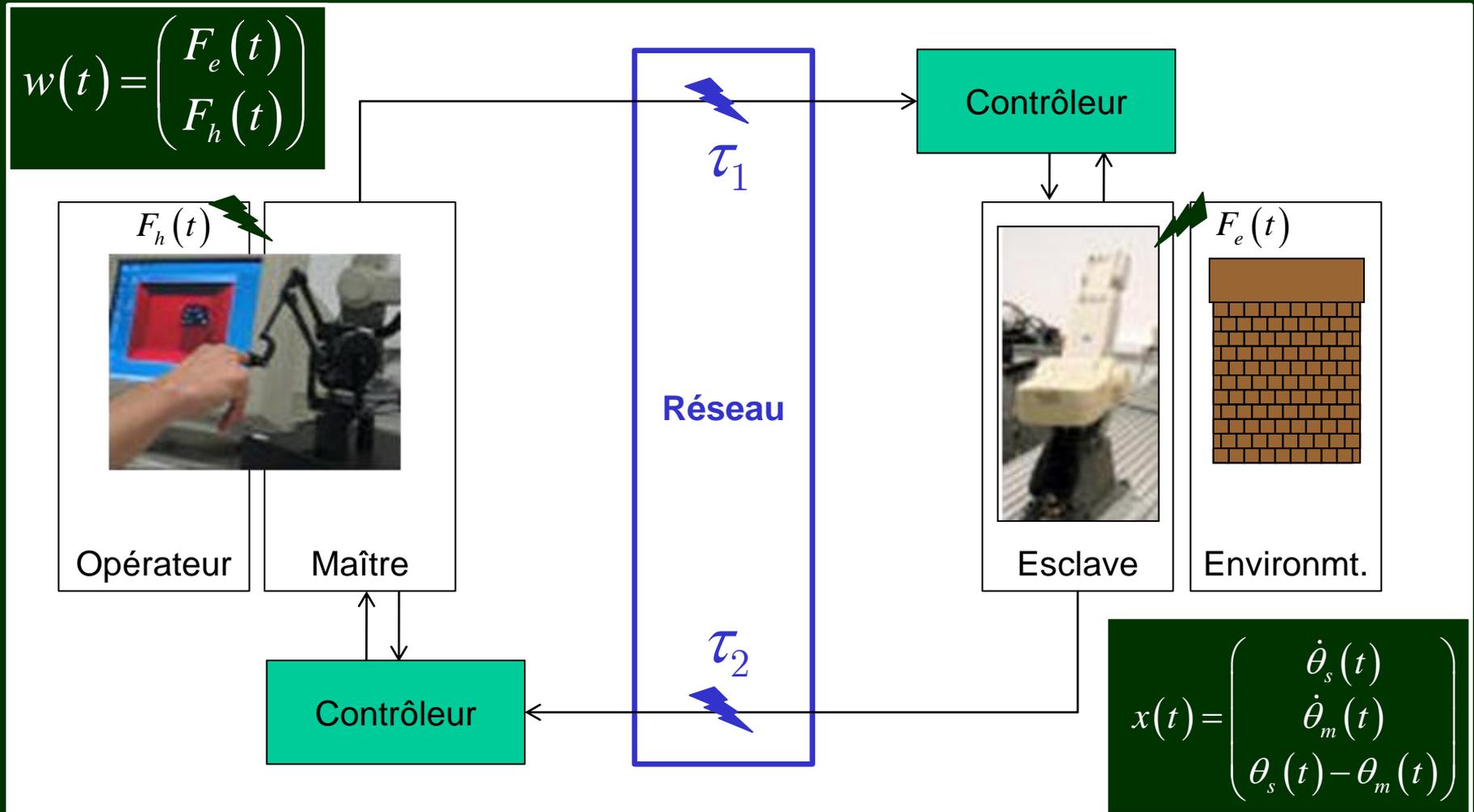


Event-driven vs. time-driven mode.



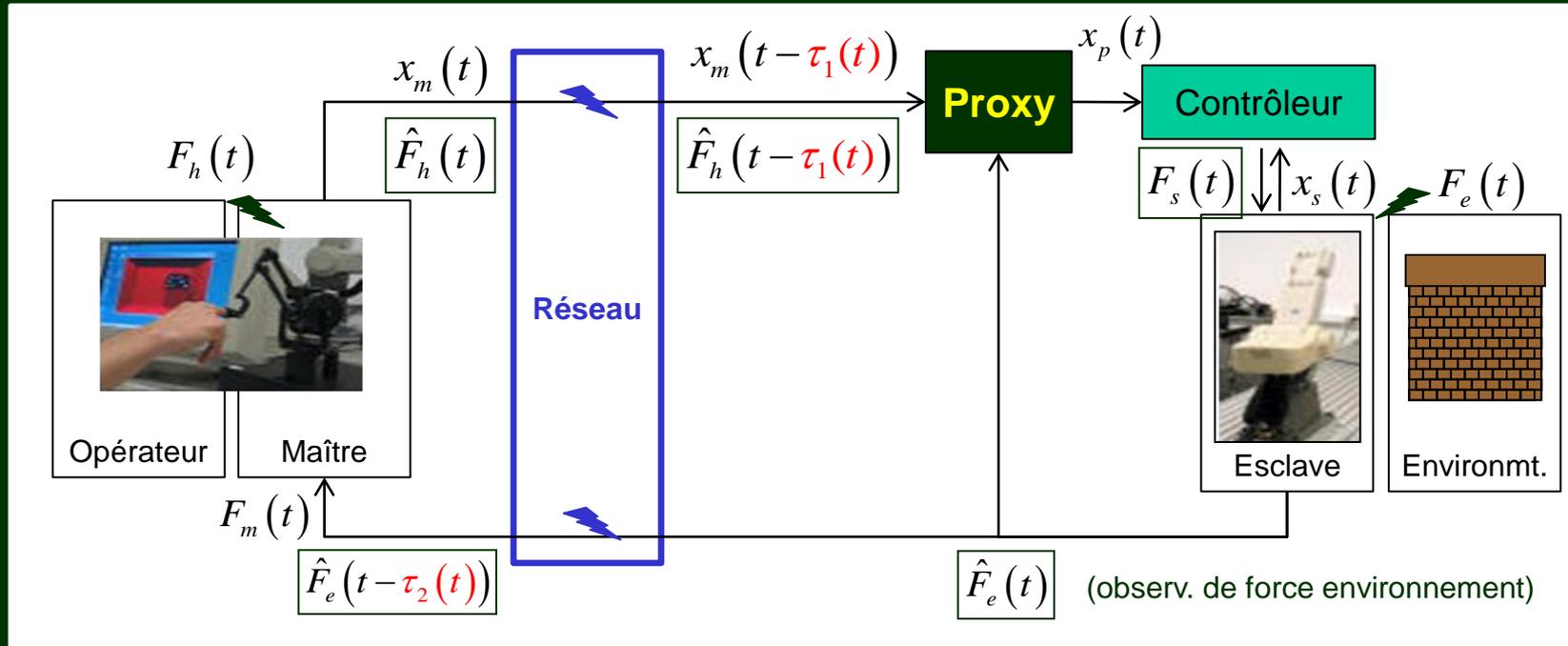
# Suite naturelle : télé-opération ( LKF + H<sub>∞</sub> )

## 1) Schéma de base : asservissement en position $\theta$ (pas en force)



## 2) Schéma amélioré : asserv. en force et position (rendu haptique)

(ETFA 2011)



- Synchronisation du proxy avec le maître
- Synchronisation de l'esclave avec le proxy

proxy « émule » le maître  
sans le retard



- Réduction de l'effet des retards
- Rendu haptique fidèle

Combinaison LKF et  $H_\infty$ 

$$J(w) = \int_0^\infty (z(t)^T z(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t)) dt < 0$$

To ensure  $J(w) < 0$ , we consider the condition,

$$\dot{V}(t, x(t), \dot{x}(t)) + z(t)^T z(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t) < 0$$

We choose a Lyapunov-Krasovskii Functional candidate,

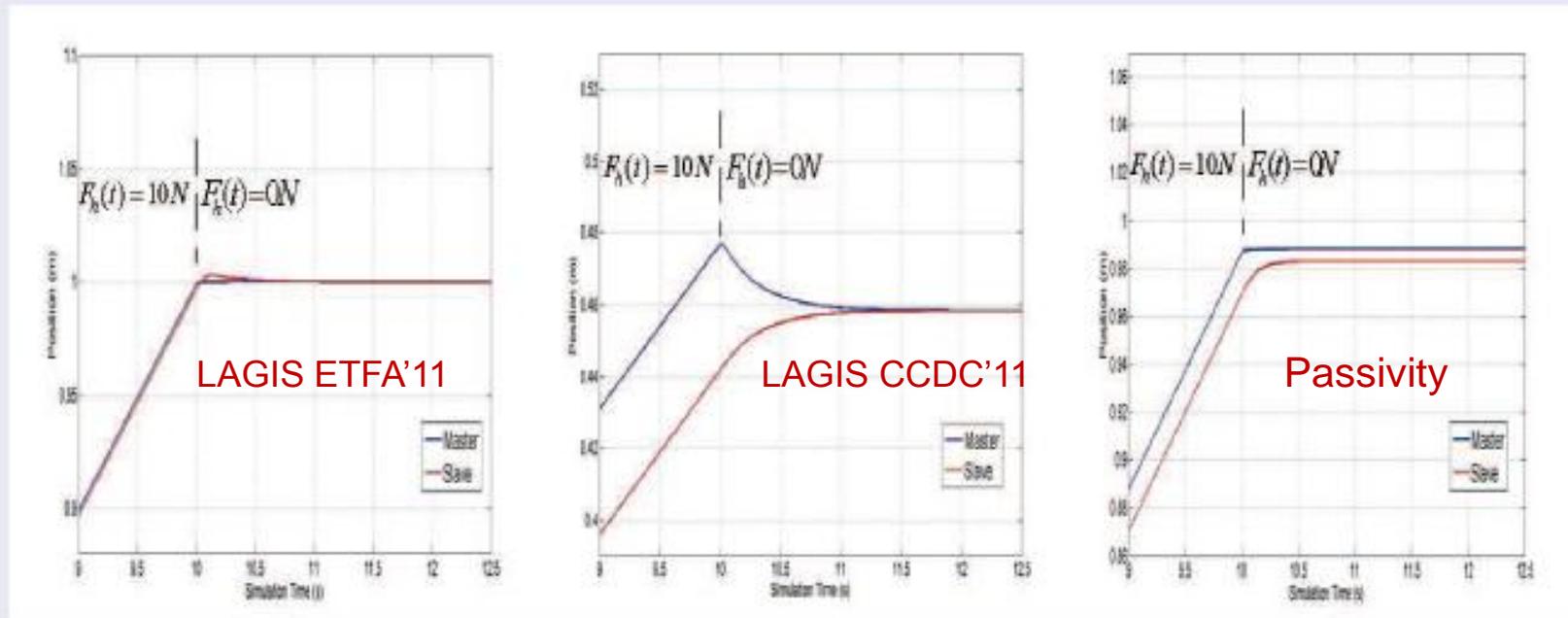
$$\begin{aligned} V(t, x(t), \dot{x}(t)) &= x(t)^T P x(t) \\ &+ \int_{t-h_2}^t x(s)^T S_a x(s) ds + \int_{t-h_1}^t x(s)^T S x(s) ds \\ &+ h_1 \int_{-h_1}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}(s)^T R \dot{x}(s) ds d\theta \\ &+ \sum_{i=1}^n (h_2 - h_1) \int_{-h_2}^{-h_1} \int_{t+\theta}^t \dot{x}(s)^T R_{ai} \dot{x}(s) ds d\theta \end{aligned}$$

$$w(t) = \begin{pmatrix} F_e(t) \\ F_h(t) \end{pmatrix}$$

$$x(t) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_s(t) \\ \dot{\theta}_m(t) \\ \theta_s(t) - \theta_m(t) \end{pmatrix}$$

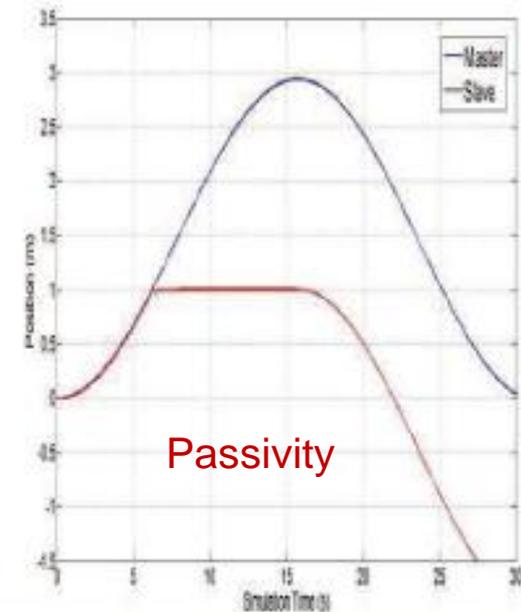
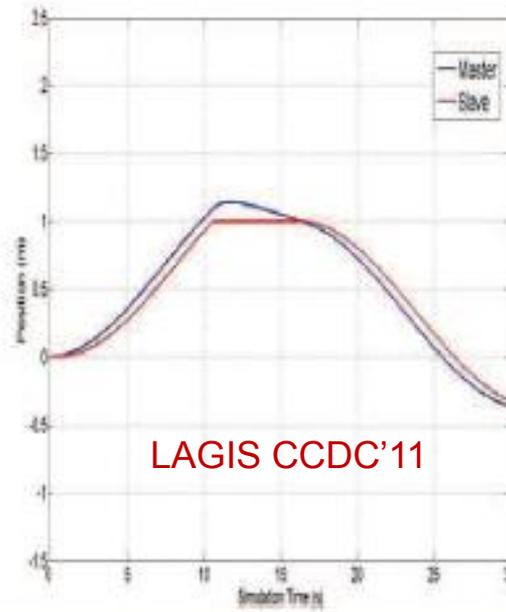
$\rightarrow = z(t)$

# Tracking in abrupt changing motion :



- Left Figure : new proxy control scheme.
- Middle Figure : new control scheme (B. Zhang, A. Kruszewski, J.-P. Richard, CCDC, 2011).
- Right Figure : passivity theorem (Y. Ye, Y.-J. Pan and Y. Gupta, CDC, 2009).

# Tracking in wall contact motion :



- The hard wall : the stiffness  $K_e = 30kN/m$ , the position  $x = 1.0m$ .
- Left Figure : new proxy control scheme.
- Middle Figure : new control scheme (B. Zhang, A. Kruszewski, J.-P. Richard, CCDC, 2011).
- Right Figure : passivity theorem (Y. Ye, Y.-J. Pan and Y. Gupta, CDC, 2009).

## Conclusion intermédiaire sur la télé-opération

- Solution classique = passivité, sans performance
- Alternative LFK + Hinf, plusieurs structures possibles :
  - Position/Position (CCDC 2011) => suivi position OK
  - Force/Position (ETFA 2011) => position + rendu haptique
  - Conditions LMI => stabilité et performance  $\gamma$
  - sous retards variables (estimés par time stamps)
  - et toujours sans buffer...

# Résumé

- Problématique générale formulée par modèles delay/switches
- = problèmes de synthèse en présence de retards variables
- Commande avec modèle du réseau [Witrant 05]      prédicteur à retard variable
- Commande générale (sans modèle de réseau) :
  - ✓ avec 2 tampons [Estrada 08]      modèle d'écart retardé
  - ✓ avec 1 tampon [Seuret 06]      retour d'état + observ./prédict.
  - ✓ + adapt. à QoS [Jiang-Kruszewski-R-T 08]      ‘ ‘
  - ✓ avec 0 tampon [S-R 08, Jiang-K-R-T 09]      ‘ ‘
- Télé-opération avec critère de performance (alternative à la passivité)
  - ✓ avec 0 tampon [Zhang-K-R 11]      retour d'état + obs +  $H_{\infty}$

# d'autres saines lectures :



*"A switched system approach to exponential stabilization through communication network"*

A. KRUSZEWSKI, W.J. JIANG, E. FRIDMAN, J.-P. RICHARD, A.TOGUYENI

**IEEE Trans. on Control Systems Technology**, to appear, Regular Paper TCST-2010-0404

*"Tracking improvement based on the Proxy control scheme for bilateral teleoperation system under time-varying delays"*

B. ZHANG, A. KRUSZEWSKI, J.P. RICHARD

**ETFA'11**, 16th IEEE int. conf. on Emerging Technology & Factory Automation, Toulouse, France, Sept. 5-9 2011

*"A novel control scheme for teleoperation with guaranteed performance under time-varying delays"*

B. ZHANG, A. KRUSZEWSKI, J.P. RICHARD

**CCDC'11**, 23rd Chinese Control & Decision Conference, Mianyang, China., 23-25 mai 2011

*"Remote Stabilization via Communication Networks with a Distributed Control Law"*

E. WITRANT, C. CANUDAS DE WIT, D. GEORGES, M. ALAMIR

**IEEE Trans. on Automatic Control**, vol. 52, pp. 1480-1485, 2007

*"Master-Slave synchronization for two inverted pendulums with communication time-delay"*

H J. ESTRADA-GARCIA, L.A. MARQUEZ-MARTINEZ, C.H. MOOG

**Springer LNCIS** vol.388, 2009, Chap. Part V, pp. 403-414.

*"Control of a remote system over network including delays and packet dropout"*

A. SEURET, J.P. RICHARD

**IFAC'08**, 17th IFAC World Congress, Seoul, South Korea, July 2008

# Nos perspectives sur ce thème

- Implantation sur notre plate-forme retour d'effort  
(thèse de Bo Zhang démarrée en 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, avec L2S)
- Développer plate-forme modulable de commande en réseaux  
Wifi – Zigbee – LAN – CAN – filaire  
(responsable : Alexandre Kruszewski)