

Contrôle en boucle fermée à travers un réseau

un aperçu de quelques problématiques et résultats récents

Jean-Pierre Richard

Journée SECTAF

Systèmes Embarqués Communicants Tolérants aux Fautes

Nancy, AIP Lorraine, 9 octobre 2008



<http://syner.ec-lille.fr/~richard>
jean-pierre.richard@ec-lille.fr



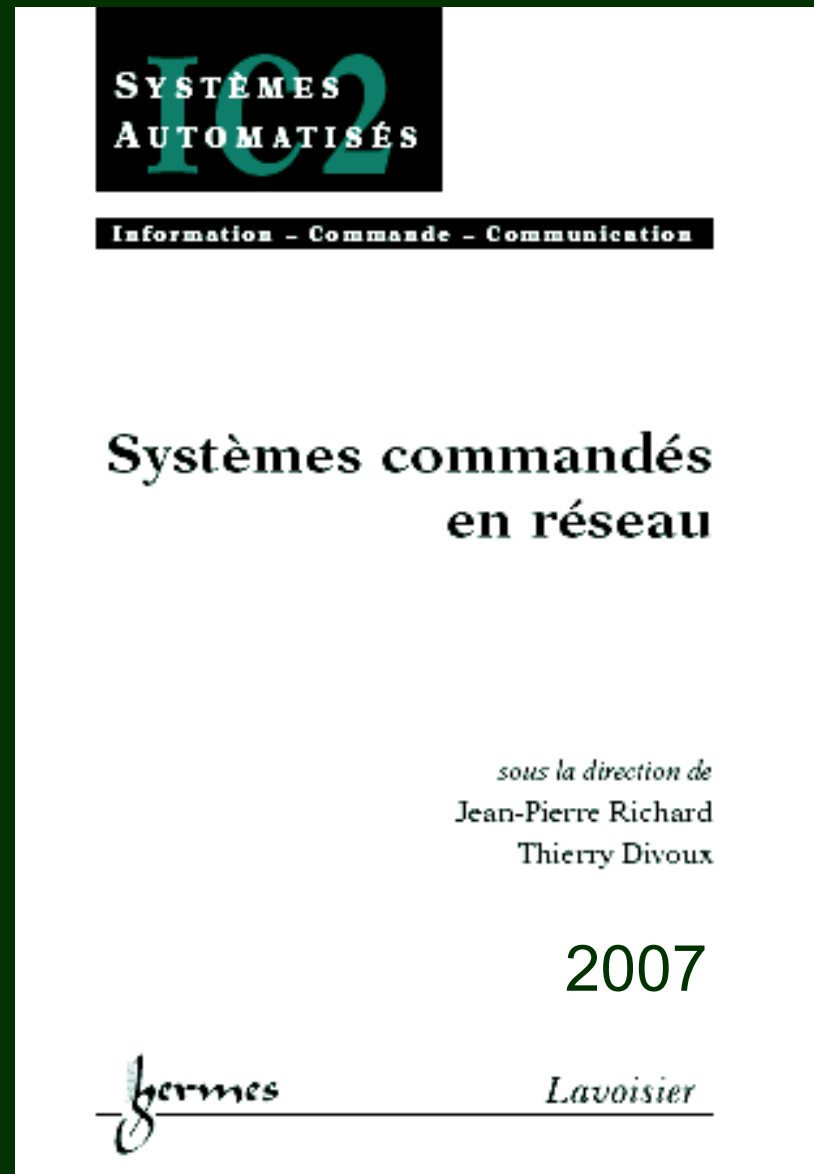
Quelques *surveys*...

- 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**

TB sauf...

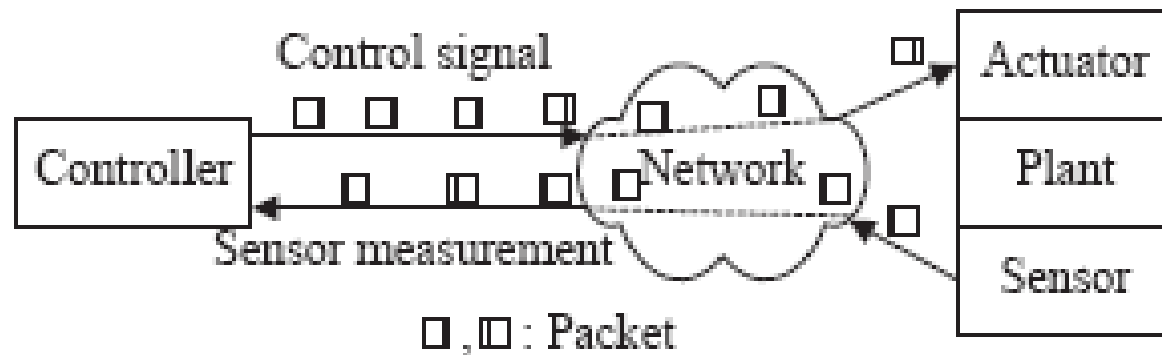


sans oublier...



C. Canudas de Wit, T. Divoux, P. Fraisse, 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



Tipsuwan 2003

Fig. 1. NCS in the direct structure.

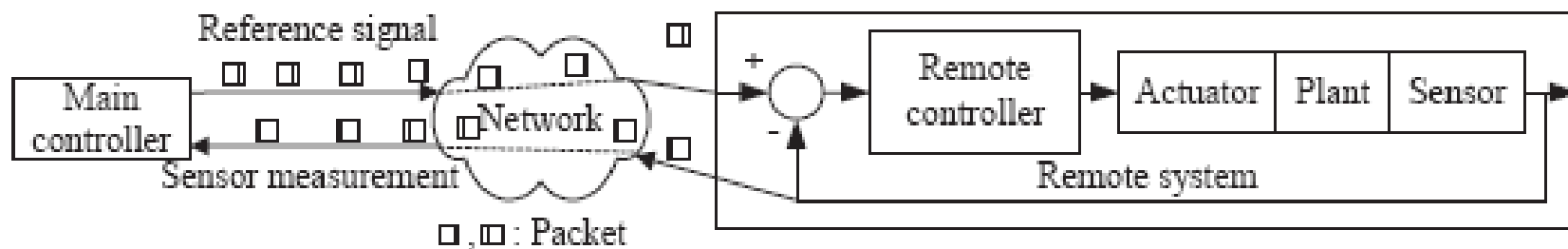


Fig. 2. NCS in the hierarchical structure.

Tipsuwan 2003

NCS multi-boucle ?

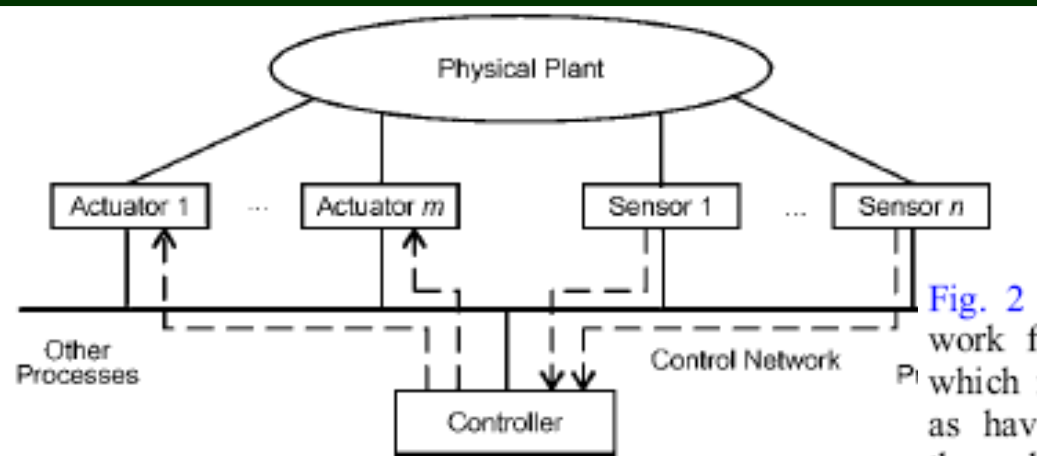
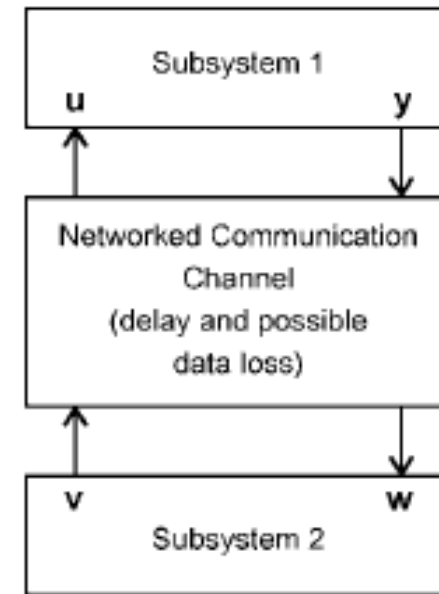


Fig. 1 Typical NCS setup and information flows

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 ?

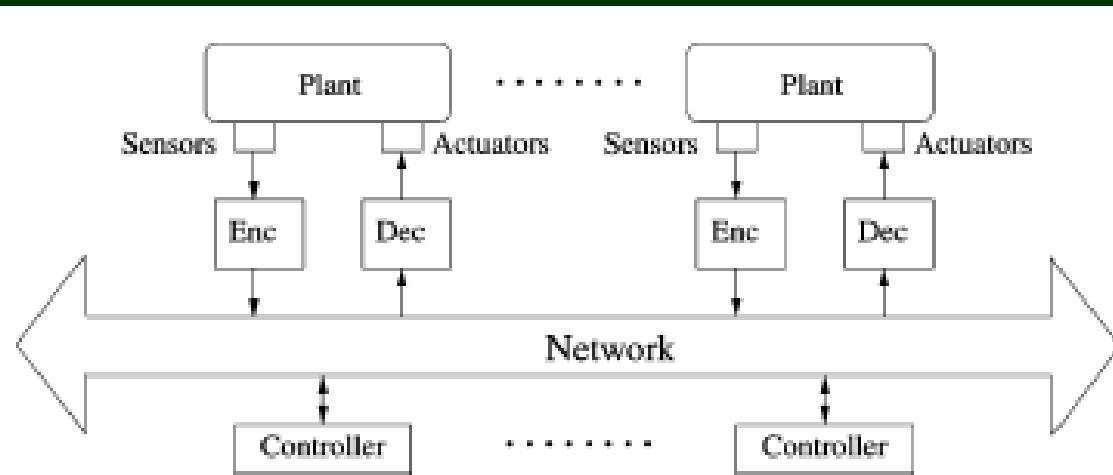


Fig. 1. General NCS architecture.

Hespanha 2007

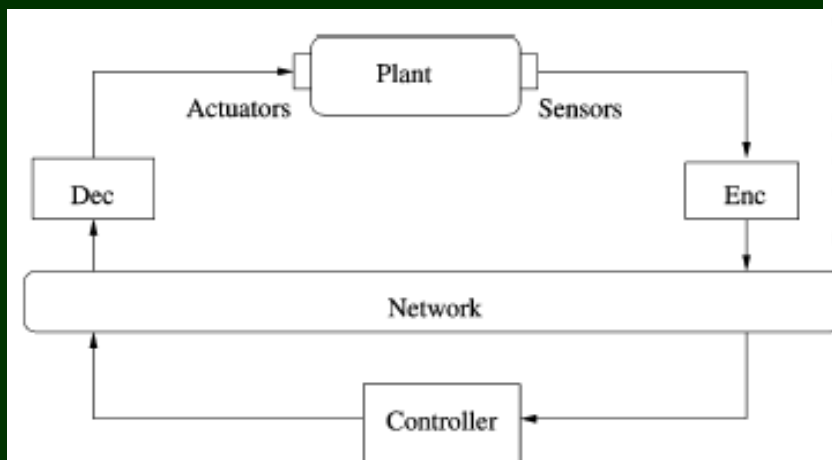


Fig. 2. Single-loop NCS.

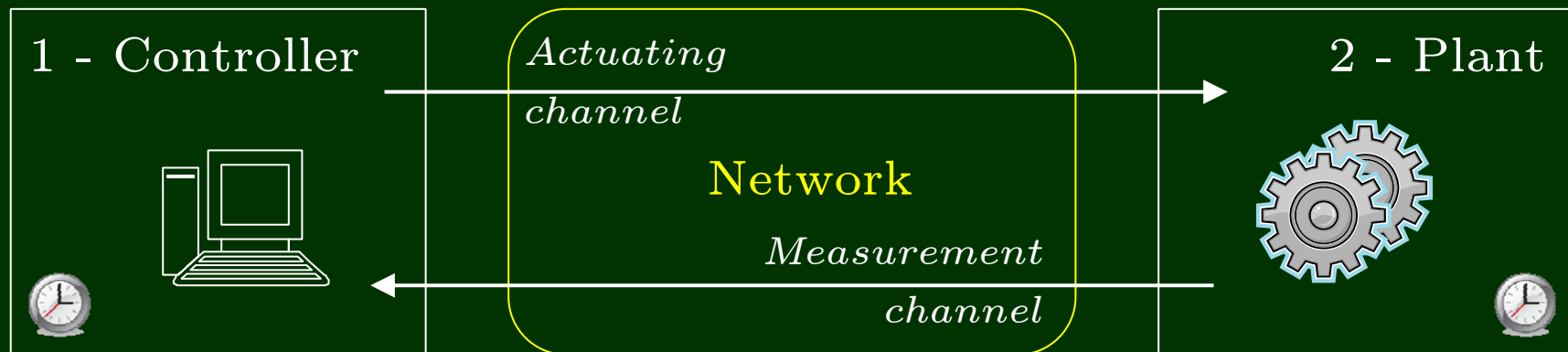
Hespanha 2007

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.

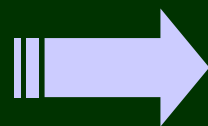
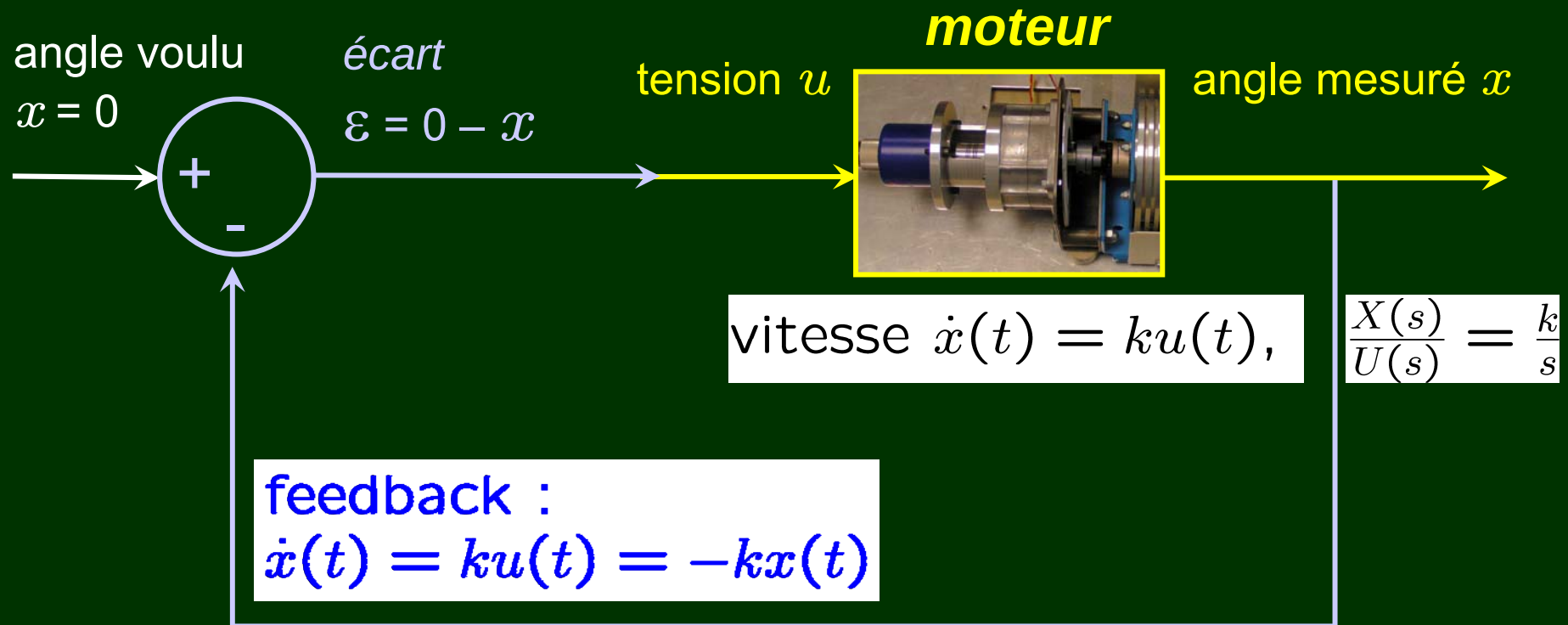
Un bon point de départ pour
comprendre les problématiques
liées à la présence du réseau
dans la boucle



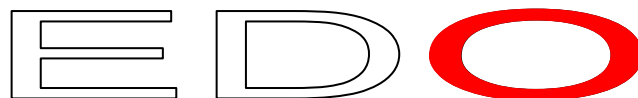
Plan

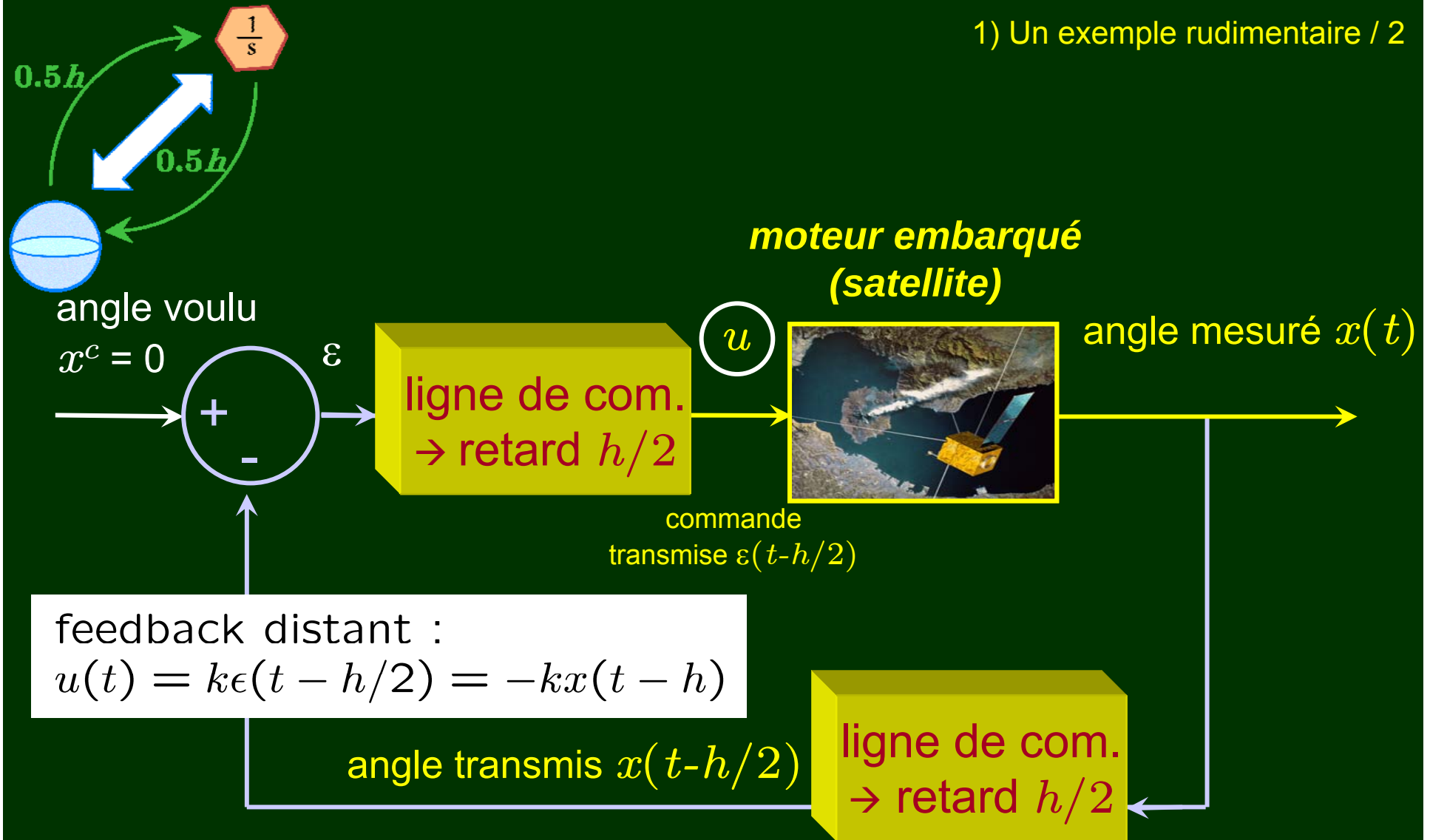
1. Introduction : un exemple rudimentaire
2. Problématique générale
3. Echantillonnage et retard
4. Commande
 - ✓ *to buff, or not to buff?*
 - ✓ sélection de résultats (thèses France)
5. Conclusion

1) Un exemple rudimentaire



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

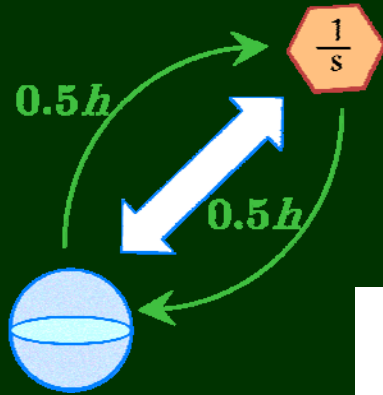




Paris-LA $h/2 \approx 50 \cdot 10^{-3}\text{sec}$ ($15 \cdot 10^6\text{m}$)
 $\odot - \text{☾}$ $h/2 \approx 1.28\text{sec}$ ($0.4 \cdot 10^9\text{m}$)
 $\odot - \text{♂}$ $h/2 \approx 260 \text{ à } 1260 \text{ sec}...$

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

E D F



exercice à donner... à nos étudiants

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

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

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

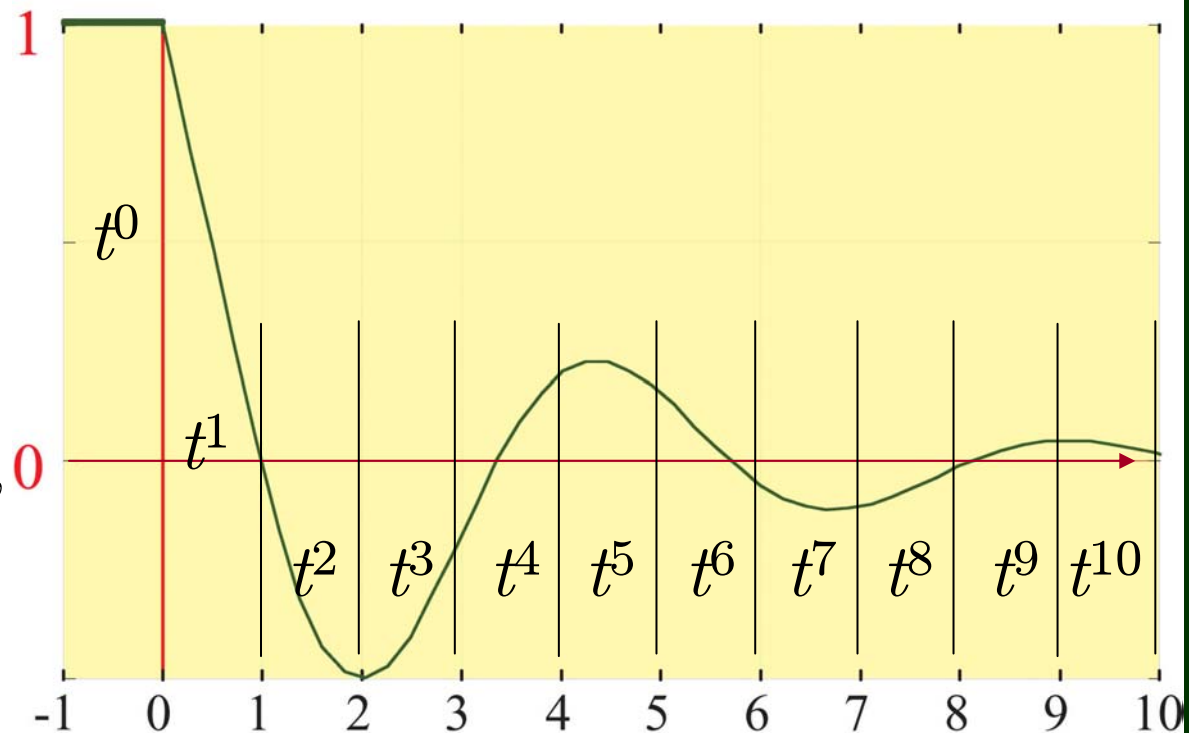
C.I. $t = 0 : x(t = 0) = 1$??

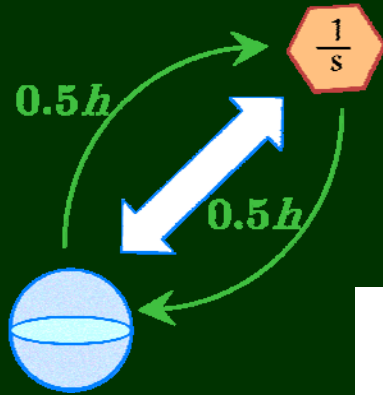
$t \in [-1, 0] : x(t) = 1$ (C.I.)

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

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

etc.





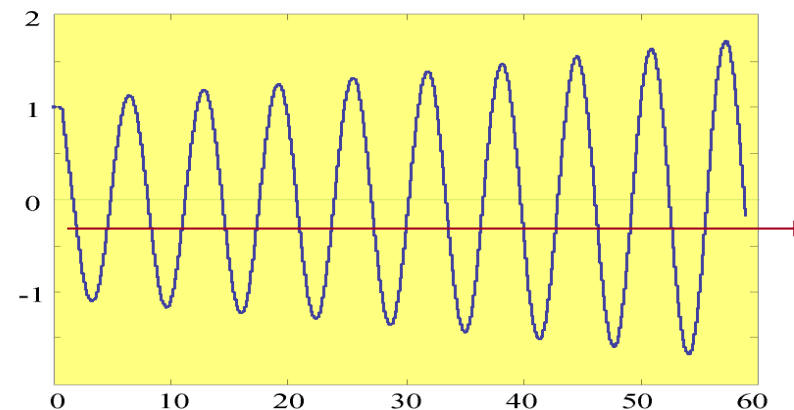
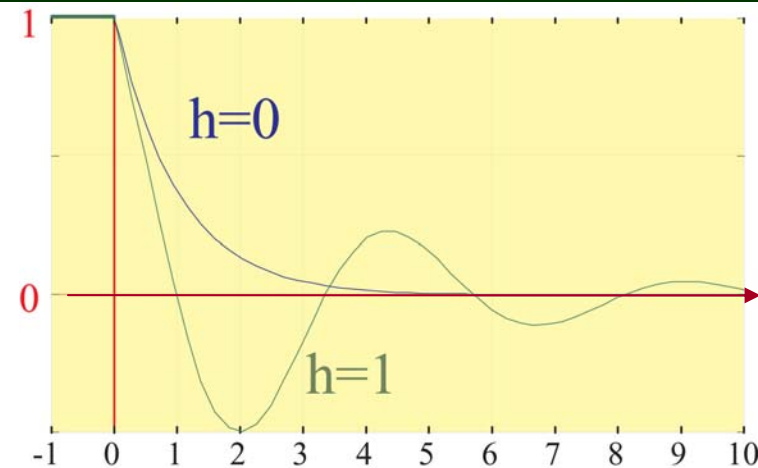
$$\dot{x}(t) + x(t - h) = 0$$

selon h ?

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

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

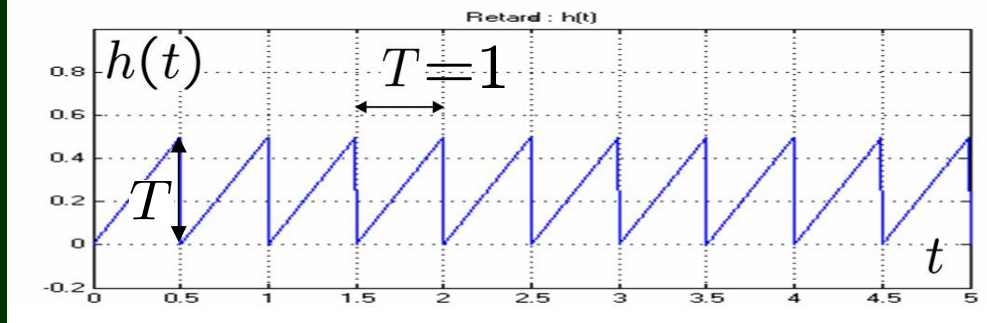
$$\dot{x}(t) + x(t - 1.6) = 0$$



... et attention aux retards variables !

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

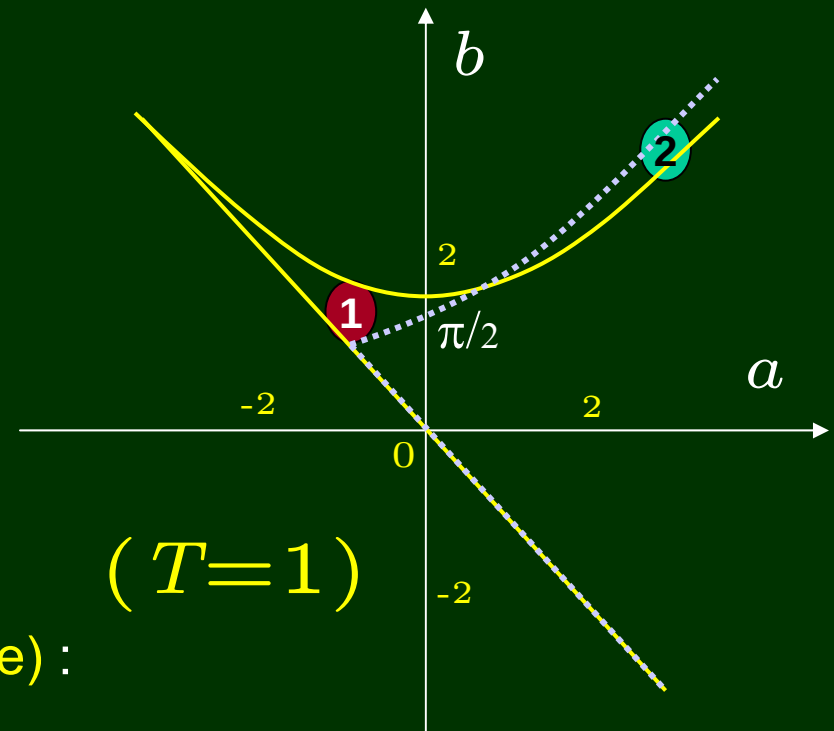
$$h(t) = t - kT \text{ pour } kT < t \leq (k+1)T$$



est asymptotiquement stable ssi (zone jaune) :

$$\begin{aligned} \left| \left(1 + \frac{b}{a}\right)e^{-aT} - \frac{b}{a} \right| &< 1 && \text{si } a \neq 0 \\ |1 - bT| &< 1 && \text{si } a = 0 \end{aligned}$$

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



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

Few words about Lyapunov's direct method for TDS

ODE :

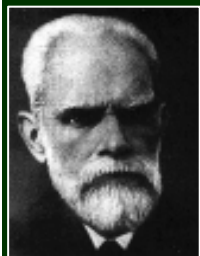
$$\dot{x}(t) = -ax(t) \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V(x(t)) = x^2(t) > 0 \\ \dot{V}(x(t)) = -2ax^2(t) < 0 \dots \text{etc.} \end{cases}$$

FDE :

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

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

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



➔ need of delay-dedicated methods :

1) Lyapunov-Razumikhin functions (not here)

2) Lyapunov-Krasovskii functionals



an illustration of the Lyapunov-Krasovskii approach

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

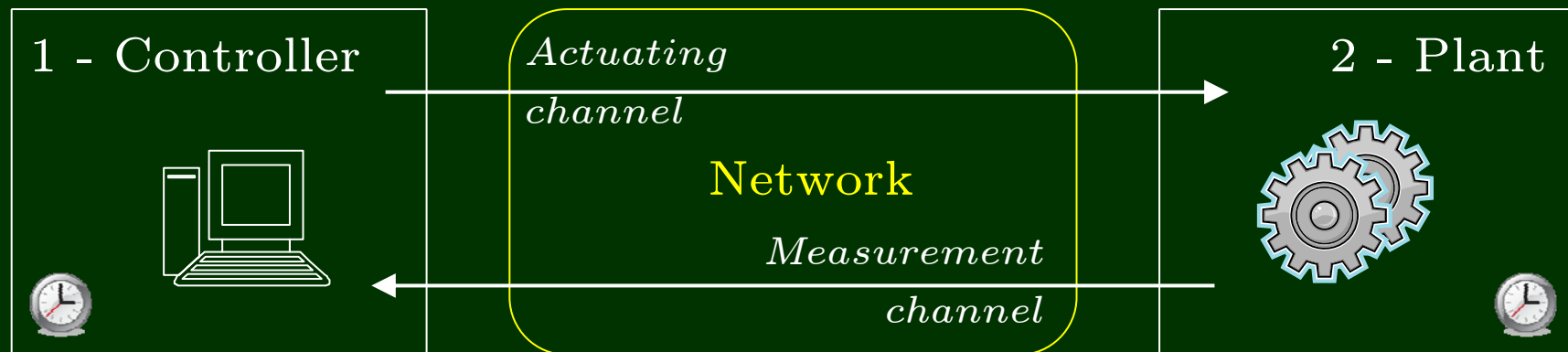
$$V(x_t) = x^2(t) + |b| \int_{-h}^0 x^2(t+s)ds \quad (\text{quad} + \text{integral})$$


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

LK-functionals were used in the above NCS proofs
(under a much more general form, since case $a=0$...)

2) Problématique générale

NCS boucle unique



Types de réseau :

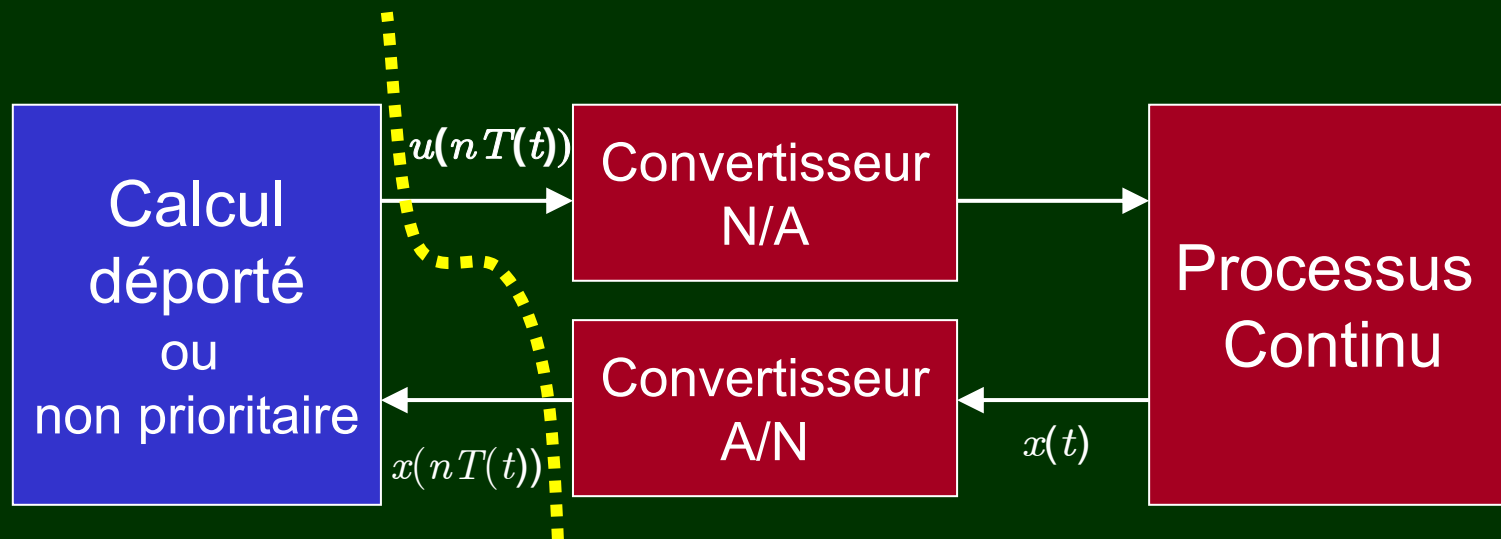
- ✓ **spécialisés** (ControlNet, DeviceNet) : transmission fréquente de petits paquets → temps garanti mais €
- ✓ **ethernet** : transmission plus rare de paquets plus gros → délais non garantis mais €

Effets du réseau sur le contrôle 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...)

3) Échantillonnage et retard

3) échantillonnage et retard

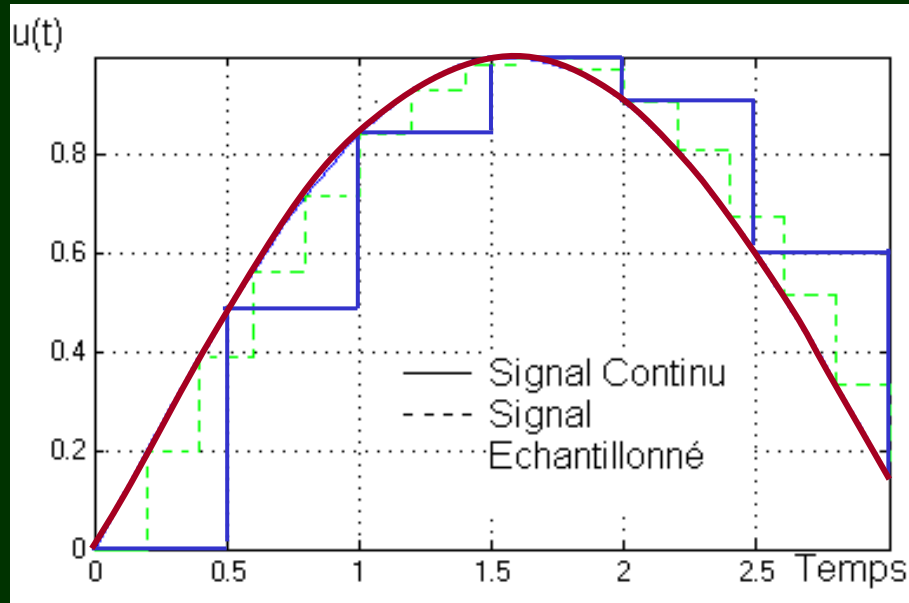
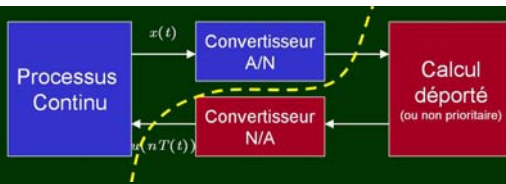


perte de paquet,
ordonnancement de tâches...

transformée en z , tout va bien, etc.

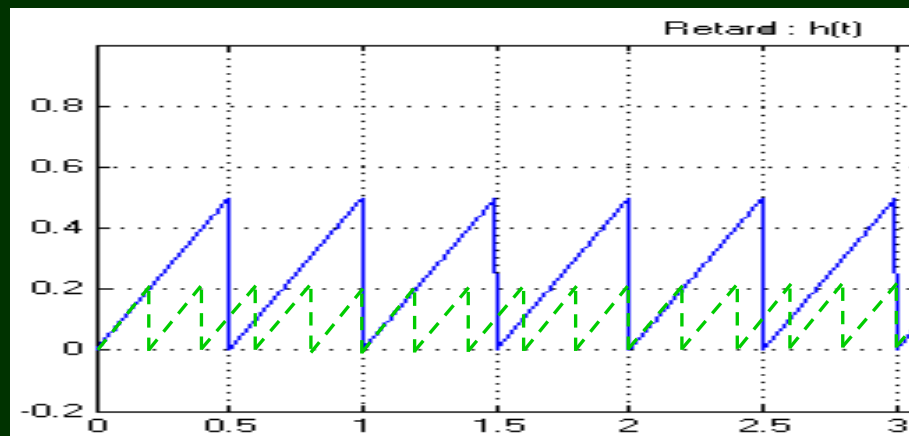
$$u(t) = u_d(t_k) = g(x(t_k)), \quad t_k \neq kT$$

2) échantillonnage et retard / 2



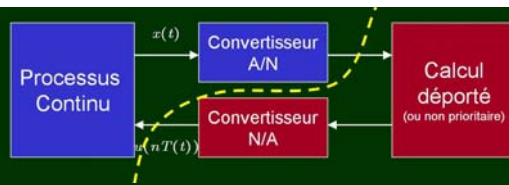
Fridman, Seuret, JPR - *Automatica* 2004

Signal
échantillonné bloqué
(ici, à période constante)

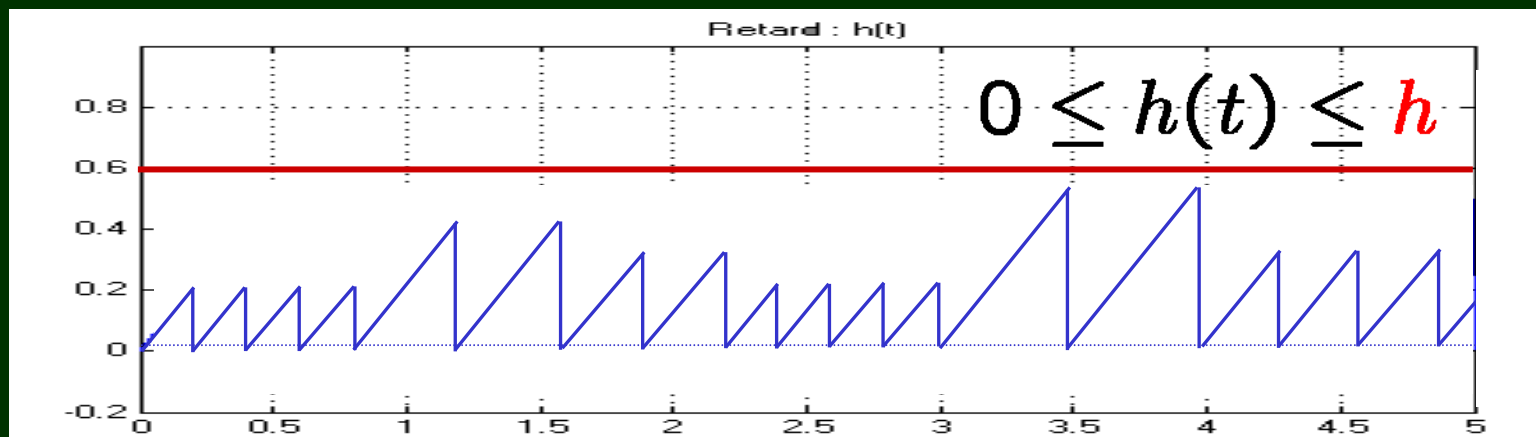


Signal retardé par
 $h(t)$ variable

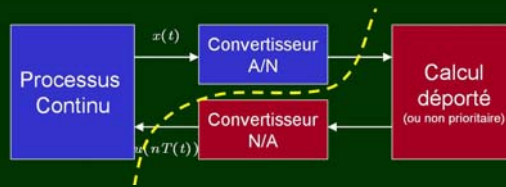
$$u(t) = u_d(t_k) = u_d(t - [t - t_k]) = u(t - h(t))$$



Re-formulation du problème



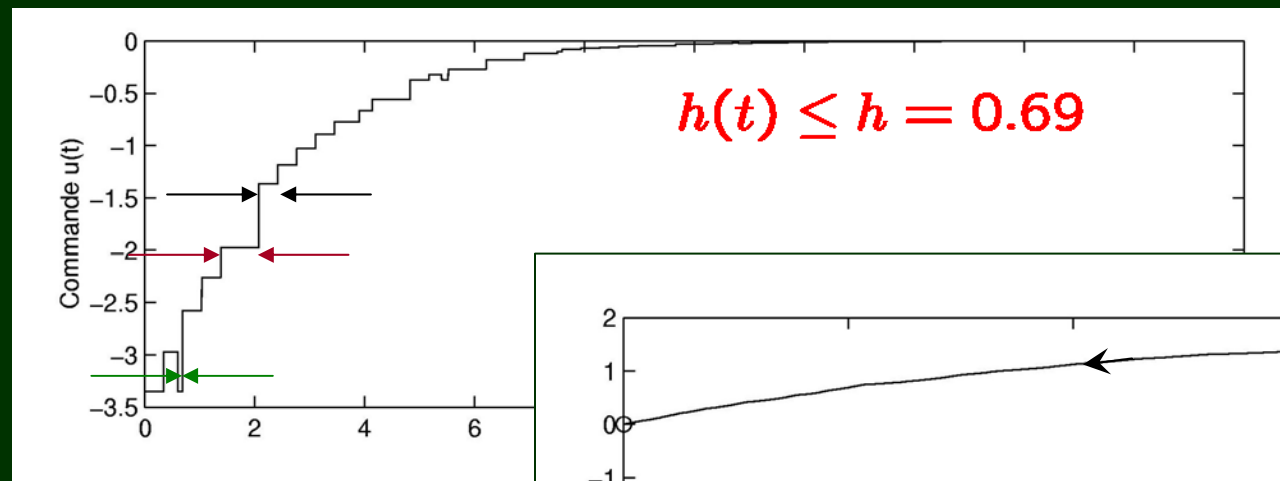
- influence de la période *maxi* d'échantillonnage h
- application du critère de E. Fridman $\dot{h}(t) \leq 1$



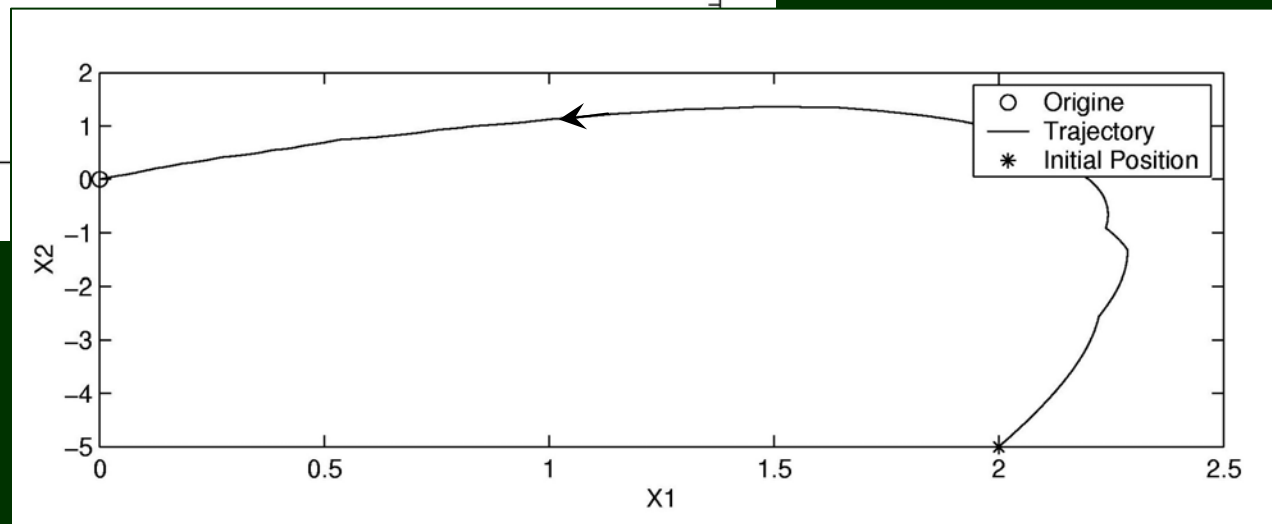
Exemple :
instable $\rightarrow$ glob. as. stable

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

avec sat possible



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



3.2. Autre approche de l'échantillonnage variable

Thèse L. Hetel 2007 + IEEE TAC 2006 (Daafouz, lung)

- incertitude exponentielle en $T=\theta_i \rightarrow$ modèle à événement
- Taylor des termes exponentiels + incertitude sur troncature $\rightarrow$ **modèle polytopique**
- modèle augmenté $\rightarrow$ **systèmes à commutation**
- **synthèse LMI** de retour d'état robuste en T

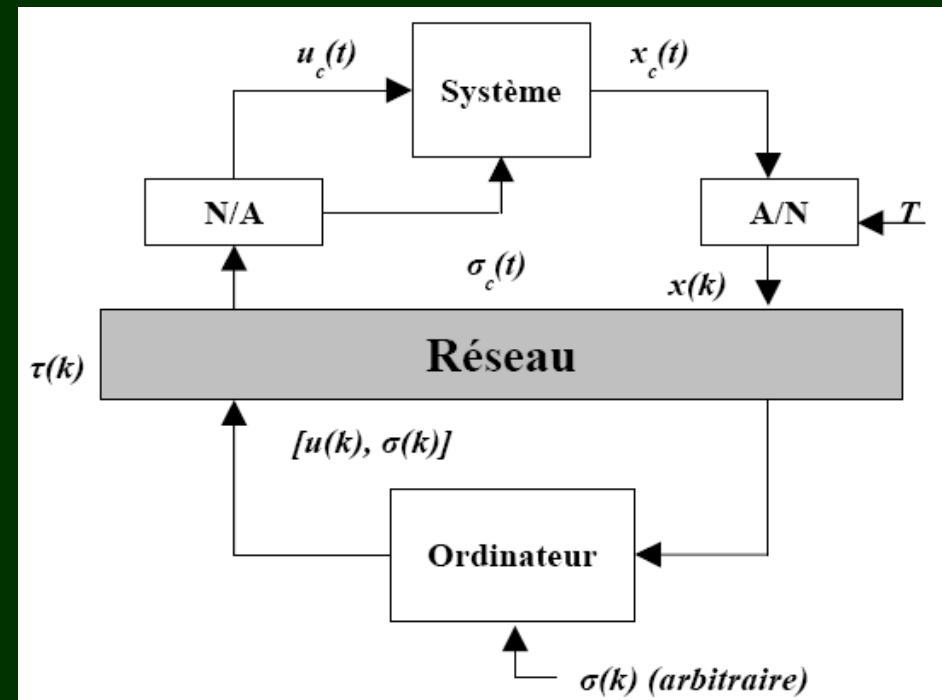
$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= A(k)x(k) + B(k)u(k) \\
 A(k) &= e^{M(t_{k+1}-t_k)}, \quad B(k) = \int_0^{t_{k+1}-t_k} e^{M(t_{k+1}-t_k-s)} ds N.
 \end{aligned}
 \left| \begin{aligned}
 \eta_{i+1} &= A(\rho_i)\eta_i + B(\rho_i)u_i. \\
 A(\rho_i) &= e^{M\rho_i}, \quad B(\rho_i) = \int_0^{\rho_i} e^{Ms} ds N. \\
 u_c(t_i) &= Kx_c(t_j) = Kx_c(t_i - \theta_i), \\
 \theta_i \in \mathcal{T} &= \{\theta \in \mathbb{Z}^+ : \underline{\theta} \leq \theta \leq \bar{\theta}\}
 \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned}
 z_i = \begin{bmatrix} \eta_i^T & \eta_{i-1}^T & \dots & \eta_{i-\bar{\theta}}^T \end{bmatrix}^T & \xrightarrow{\quad} \bar{A}(\rho_i) = \begin{bmatrix} A(\rho_i) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}(\rho_i) = \begin{bmatrix} B(\rho_i) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \left| \begin{aligned}
 u_i &= \bar{K}_{(\theta_i)} z_i, \\
 \bar{K}_{(\theta_i)} &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad K \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\
 \boxed{z_{i+1} &= (\bar{A}(\rho_i) + \bar{B}(\rho_i)\bar{K}_{(\theta_i)}) z_i}
 \end{aligned} \right.$$

autre cas traité par Hetel :

échantillonnage + réseau
avec :

$$\tau_{min} \leq \tau(k) \leq \tau_{max} \leq \overline{T_{ech}}$$



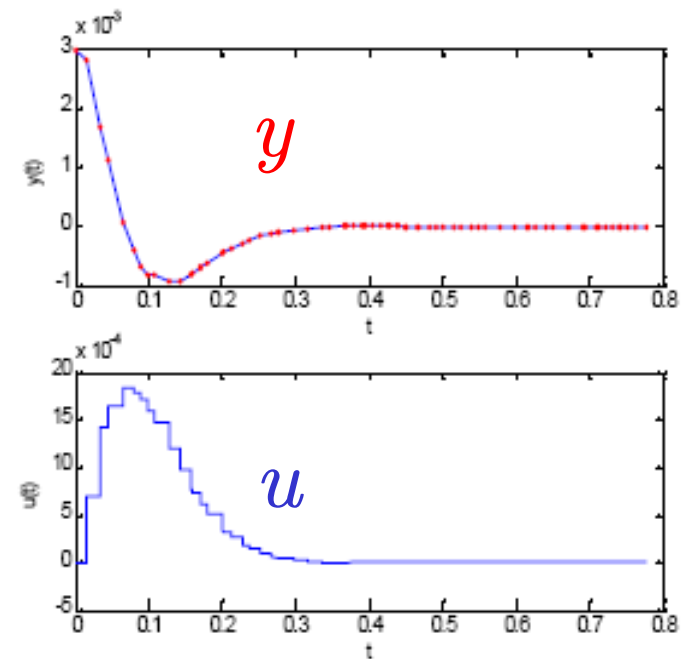
$$G_p(s) = \frac{1000}{s(0.25s + 1)}$$

$$T = 0.015s$$

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

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

Exemple
simulé :



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 2001]
 - ✓ écart à modèle de réf. retardé [Estrada, Marquez, Moog 2007]
 - ✓ etc.

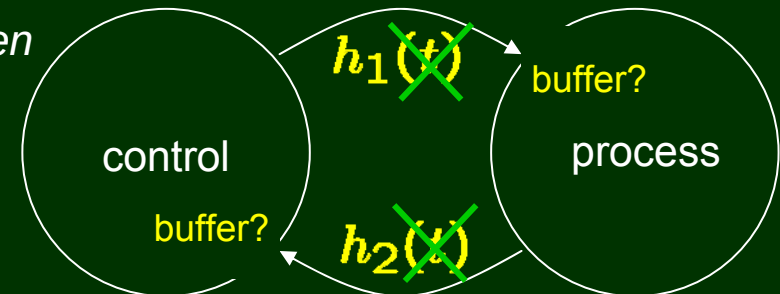
3^e solution (interméd.) à un seul buffer

[Seuret 06]
[Jiang et.al 08]

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

- ✓ [Witrant et al. 07][Seuret & Rich 08] → *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, Almir)

- 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

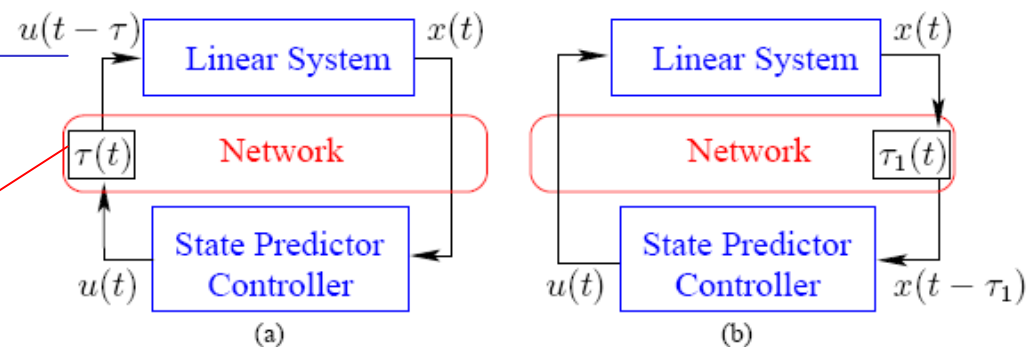
$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) \\ u(t) &= -Ke^{A\hat{\delta}(t)} \left[x(t) + e^{At} \int_t^{t+\hat{\delta}(t)} e^{-A\theta} Bu(\theta - \hat{\tau}(\theta)) d\theta \right]\end{aligned}$$

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

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

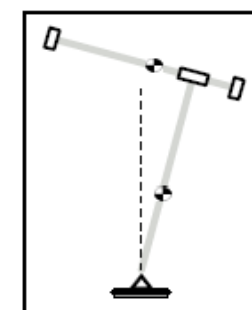
$$\dot{z}(t) = f(z(t), u_d(t)), \quad z(0) = z_0$$

$$\tau(t) = h(z(t), u_d(t))$$



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

Interface -
AmplificateurRéseau
Simulé

ns

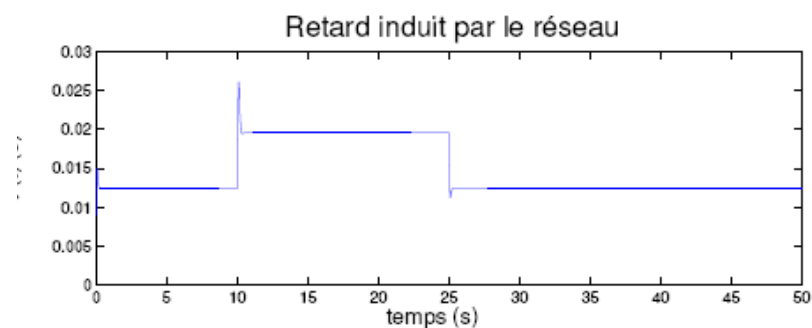
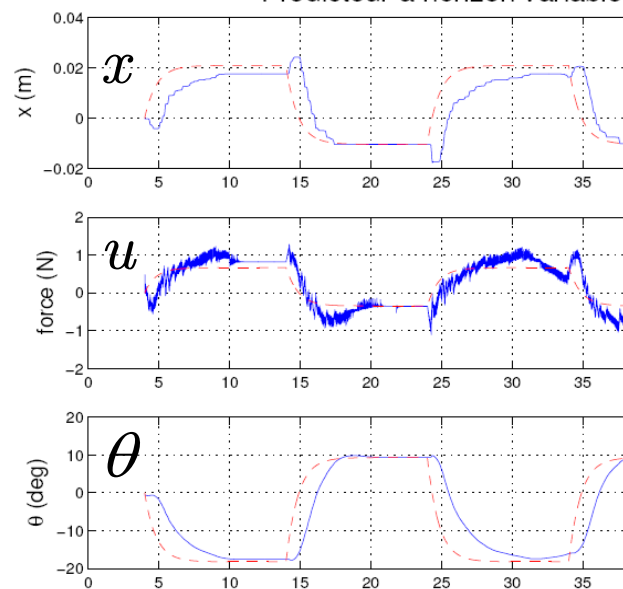
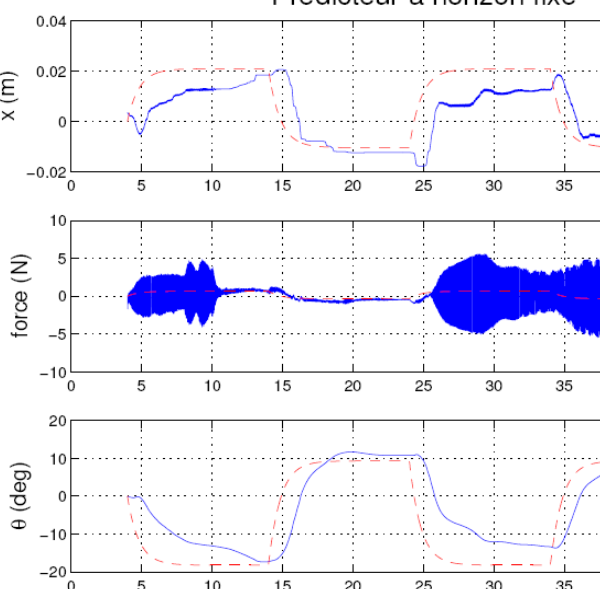
PC contrôle temps-réel
xPC TargetPC développement WindowsTM

FIG. 5.6 – Banc d'essai expérimental.

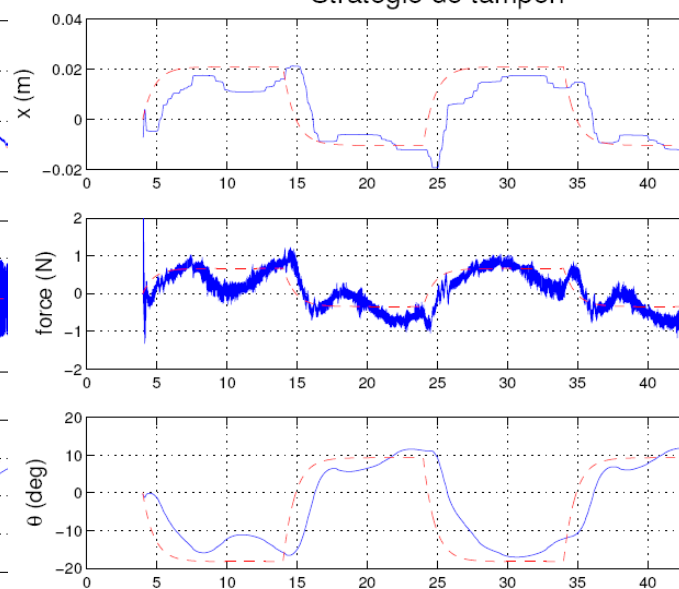
Prédicteur à horizon variable



Prédicteur à horizon fixe



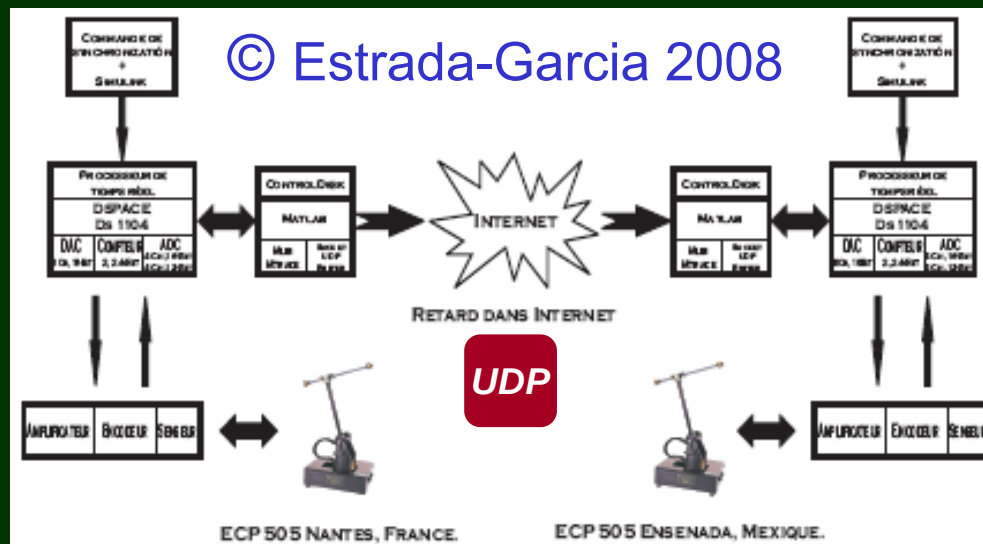
Stratégie de tampon



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).

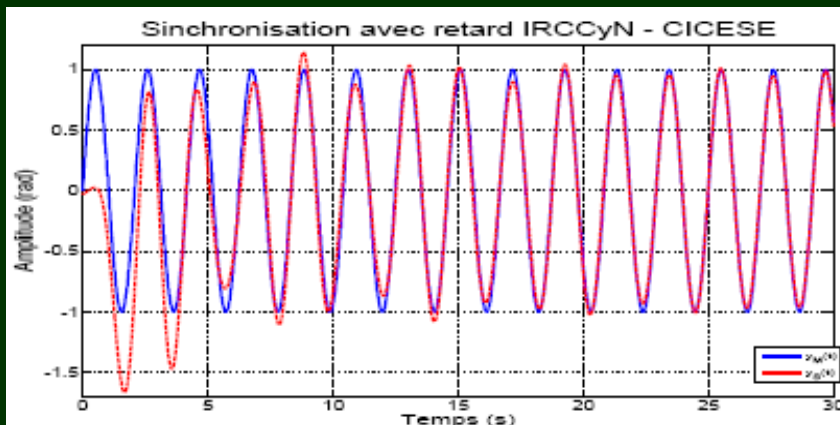
y^{ref} supposée connue par les deux.

Stratégie :

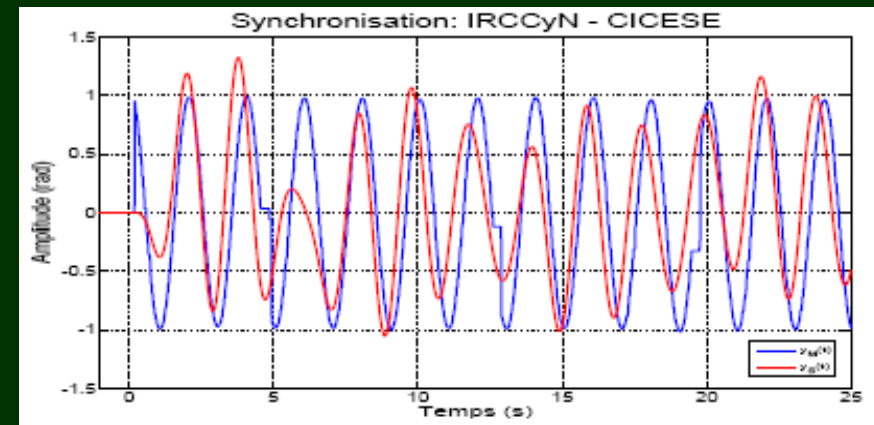
- 1) *buffers* à 300ms = τ
- 2) commande tq écart m/e régi par :

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

→ commande causale



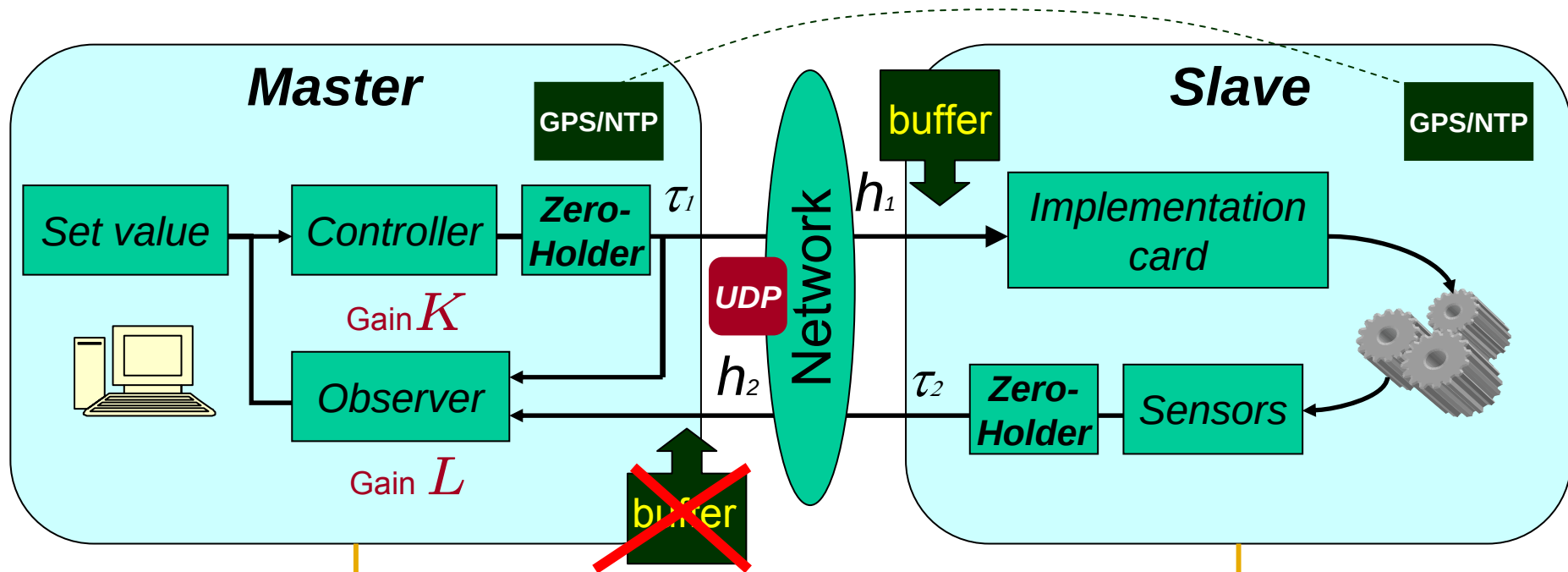
Pendule simulé, réseau réel



Pendule réel, réseau réel

4.3. Commande avec tampon aller seul

Thèse A. Seuret 2006 (+Dambrine, JPR)



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

→ connu grâce au buffer

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

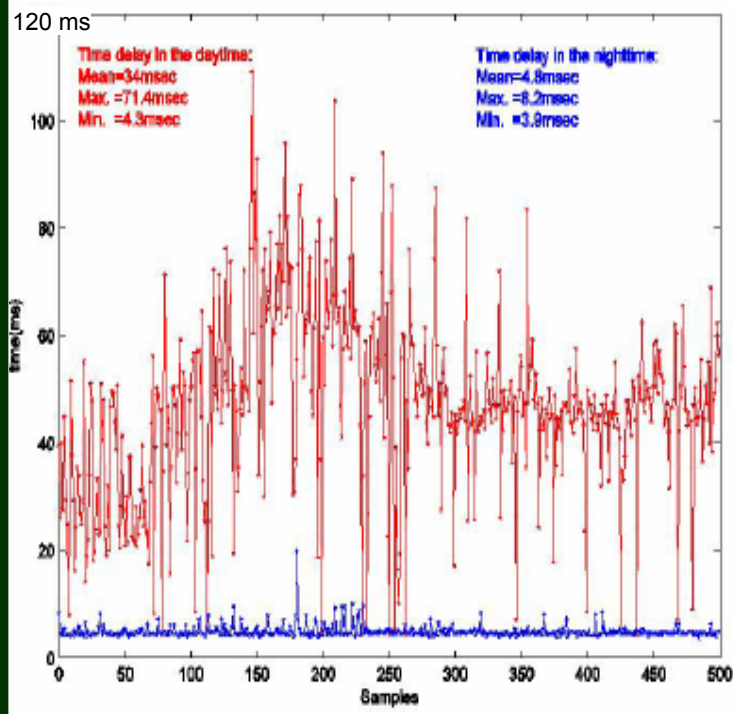
- Puissance de calcul limitée

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

- reçoit & applique commande
- envoie la sortie mesurée

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

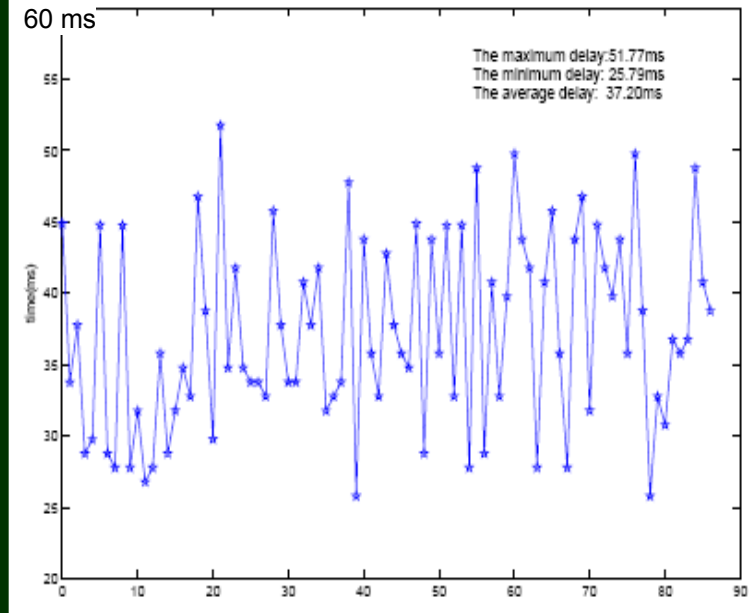
Passage à l'expérimental + adaptation à la QdS disponible

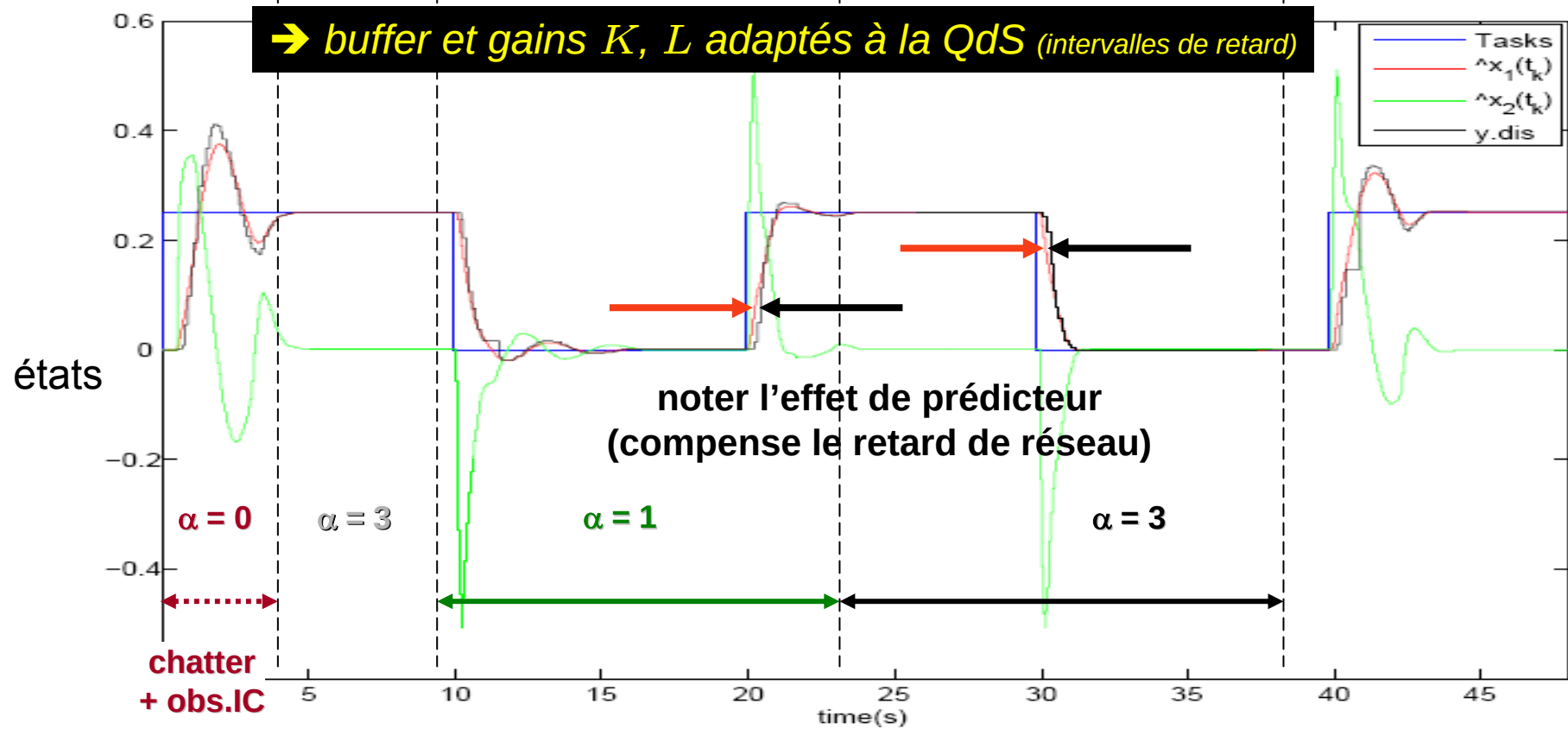
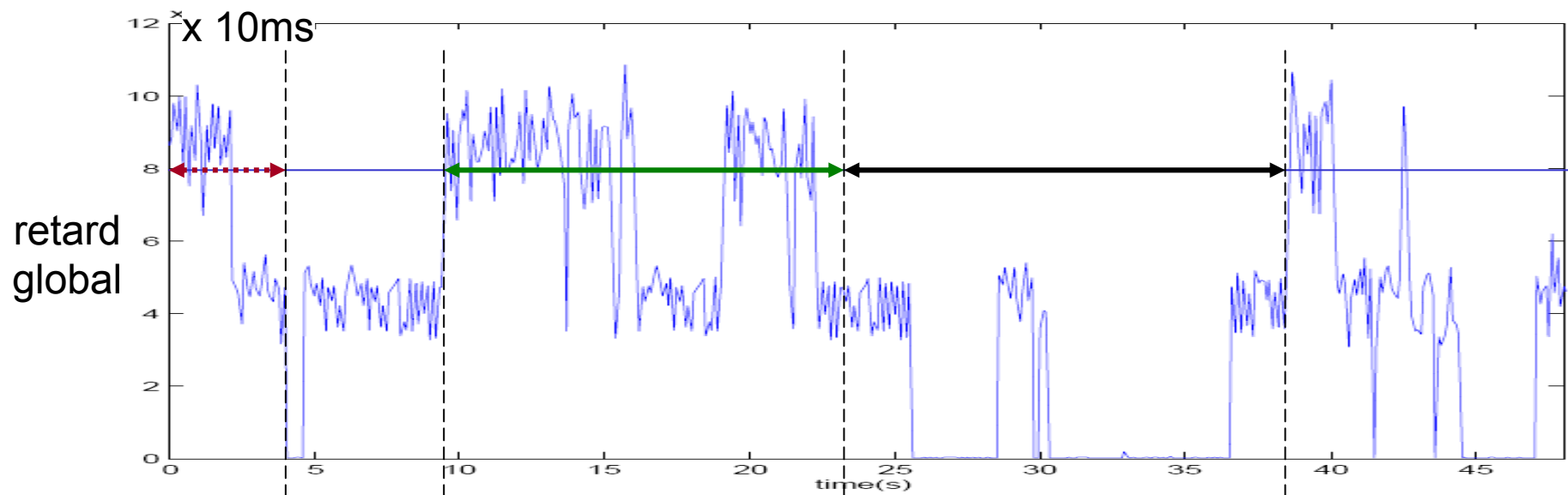


Internet:

**Nighttime
VS
Daytime**

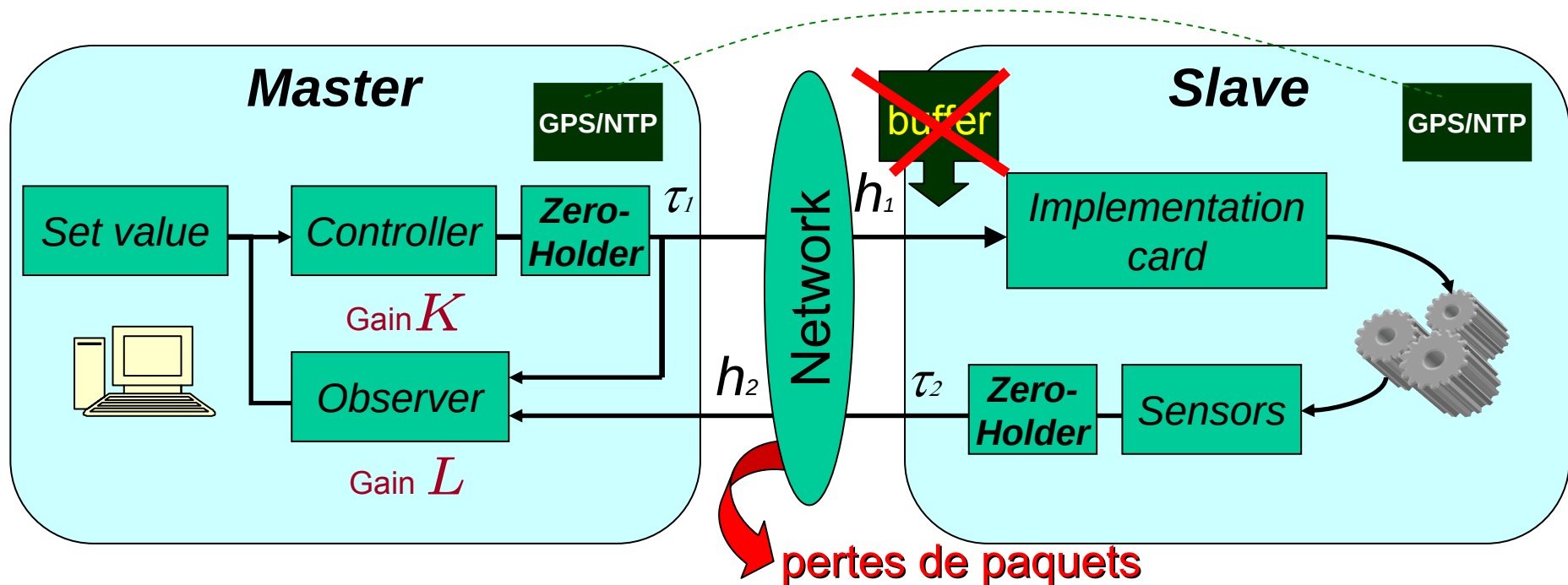
Bluetooth:





4.3. Commande sans tampon

A. Seuret - JPR 2008



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

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

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

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./prédict.
 - ✓ + adapt. à QoS [Jiang-K-R-T 08] “
 - ✓ avec 0 tampon [Seuret-R 08] “