

# Commande robuste et tolérante aux fautes :

## applications aux systèmes mécatroniques

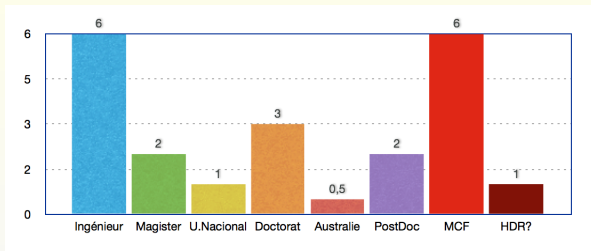
**John J. Martínez Molina**

MCF à Grenoble-INP ENSE3, GIPSA-lab, Saint Martin d'Hères 38402, France.



**Soutenance**  
**en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches**  
Université de Grenoble, 12 Juillet 2013

- 1 Mon parcours et mes activités de recherche
- 2 Commande Robuste : Aspects méthodologiques privilégiés
- 3 Commande Tolérant aux Fautes, mon point de vue
- 4 Perspectives



## Expériences :

- Stage industriel - ECOPETROL
- Visiteur : The University of Newcastle, Australia
- Chercheur postdoctoral INP : Projet European Blaze
- Maître de Conférences (MCF) depuis 2007

## Diplômes :

- Diplôme d'ingénieur, Génie Electrique
- Magister en Automatique (Master recherche à 2 ans incluant des enseignements)
- Doctorat en Automatique (sous la direction de Carlos Canudas-de-Wit)
- Habilitation à Diriger des Recherches HDR....après délibération du jury...j'espère !

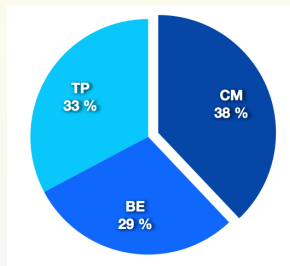
# Quelques éléments pour l'HDR :

- Expérience de co-encadrement : **6 Thèses**, dont 3 déjà soutenues + 10 PFE
- Collaborations scientifiques :
  - Locales** : O. Sename, D. Koenig, I. Landau, G. Besançon, L. Dugard, A. Voda, N. Marchand,...
  - Extérieures** : M. Seron, J. De Doná, P. Gaspar, Z. Szabo, J. Bokor, S. Olaru, R. Morales, J. Ramírez,...
- Collaborations industrielles :
  - Nationales** : **EDF DTG, Alstom, Ascotel, Hutchinson, EDF R&D.**
  - Internationales** : DaTarius (Autriche), Philips Research (Pays-bas).
- Expérience en évaluation des travaux scientifiques :
  - Révision d'articles** : Multiples
  - Jury des Thèses** : 2 colombiennes + 1 française.
- **Expérience en enseignement ?**

# Enseignements dispensés :

Depuis Septembre 2007 plus de 192h/an à l'**ENSE3** mais aussi à l'ENSIMAG :

- Identification des systèmes
- Commande avancée des systèmes linéaires
- Modélisation et commande des systèmes mécatroniques



Autres tâches :

- Resp. de relations internationales et industrielles (filiale ASI) 2008-2012
- Resp. pédagogique de la plateforme d'automatique AIDA (depuis 2012)
- Membre élu du Conseil ENSE3 et Membre comité de pilotage ENSE3-2015.

## Thèses soutenues :

**Marouane Alma** Soutenance : 20 Mai 2011  
Directeurs : ID Landau & J. Martinez (Encadrement à 50%)  
Sujet : "Rejet adaptatif de perturbation multi-sinusoïdales. Application à une suspension active"  
Il est devenu Maître de Conférences à l'IUT Longwy, Laboratoire CRAN à Nancy.

**Antoine Lemarchand** Soutenance 24 Oct. 2011  
Directeurs : D. Koenig & J. Martinez (Encadrement à 50%)  
Sujet : "Régulation optimale d'un système à modes multiples de fonctionnement : application à la gestion des flux de trafic routier"  
Il est devenu Ingénieur R&D chez MOVEA à Grenoble.

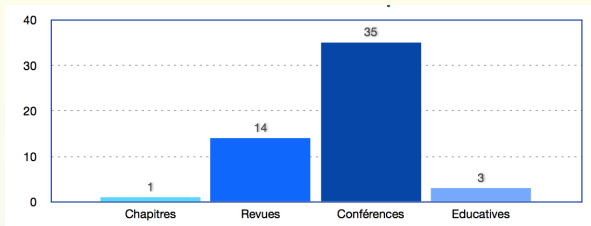
**Jennifer Zarate-Florez** Soutenance 4 Mai 2012  
Directeurs : G. Besançon & J. Martinez (Encadrement à 50%)  
Sujet : "Commande optimale et robuste d'une chaîne d'aménagements hydroélectriques"  
Elle est devenue Ingénieur R&D chez EDF à Chatou.

## Thèses en cours :

**Sébastien Varrier** Soutenance prévue pour Sept. 2013  
Directeurs : D. Koenig & J. Martinez (Encadrement à 50%)  
Sujet : "Détection de situations critiques et commande tolérante aux fautes pour le véhicule"

**Ting-Hong Wang** Soutenance prévue pour Oct. 2013  
Directeurs : O. Sename & J. Martinez (Encadrement à 50%)  
Sujet : "Commande robuste pour le véhicule hybride"

**John A. Sandoval-Moreno** (Début Oct. 2011, Soutenance prévue pour Automne 2014)  
Directeurs : G. Besançon & J. Martinez (Encadrement à 50%)  
Sujet : "Commande optimale et robuste des systèmes multi-energie"



## Revue :

- IEEE Transaction on Control System Technology 3
- Control Engineering Practice 2
- Automatica 2
- European Journal of Control 2
- Autres : Mechatronics, Int J. of Robust and Nonlinear C, Math and Computer in Simulation,...

## Conférences :

- IEEE Conference on Decision and Control (CDC) 8
- IFAC World Congress 6
- IFAC Safeprocess 4
- American Control Conference (ACC) 3
- European Control Conference (ECC) 3
- Autres : IFAC Symposium on..., MED, VSDI,...

... La moitié avec mes thésards.



## Projets :

- ANR INOVE 2010-2014 ; ANR EVA (2008-2012)
- PICS-CNRS CROTALE 2010-2013 (Académie de Sciences, Hongrie)
- PCP FLORE 2010-2013 (TEC-Monterrey, Mexique)
- PEPS INS2I SpikeRob (Institut des Sciences du Mouvement de Marseille)
- Autres collaborations : University of Newcastle (Australia), Universidad del Valle (Colombie)
- En construction : avec l'Angleterre, Espagne, Brésil et Argentine.



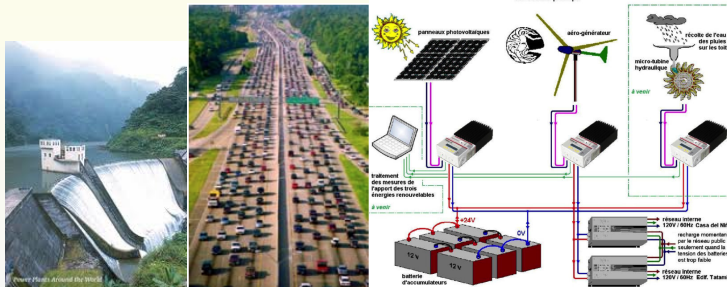
## Applications : **Systemes mécatroniques**



## Méthodes investiguées :

- Rejet adaptatif des perturbations (paramétrisation Youla-Kucera)
- Observation et commande robuste (synthèse  $H_\infty$ )
- Détection de défauts (espace de parité LPV)
- Commande tolérante aux fautes (théorie des systèmes commutés + **ensembles invariants**)

## Autres applications : Grands systèmes



## Méthodes investiguées :

- Techniques de coordination optimale (algorithme d'Uzawa)
- Commande prédictive MPC explicite
- Commande robuste LPV et systèmes commutés

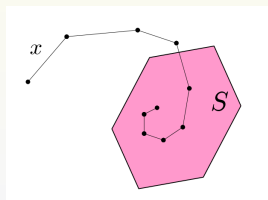
# Robust Control !!

# Definition of Robust Positively Invariant Set

Consider the perturbed system :

$$x(k+1) = Ax(k) + Ew(k),$$

where  $A$  has eigenvalues strictly inside the unit circle and  $w(k) \in \mathbb{W}$ .



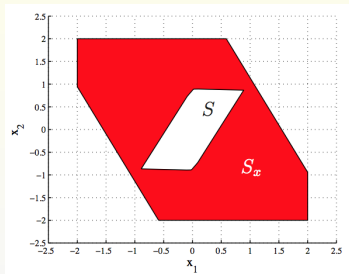
If the states  $x \in S$  and  $x^+ \in S$  for all  $t > t^*$ , then  $S$  is a **Robust Positively Invariant (RPI) set**.

Consider the perturbed system :

$$\begin{aligned}x^+ &= Ax + Bu + Ew \\ y &= Cx\end{aligned}$$

In close-loop we wish :

$x \in S$  bounded if  $w \in \mathcal{W}$  bounded  
and  $S \subseteq S_x$ ,  $S_x$  an admissible set.



In practice :

- Sometimes **stability** requires **performance** :  $S \subseteq S_x$
- **Performance** : find  $u$  to minimize the transfer function  $X(z)/W(z)$
- **More performance** : reduce the disturbance  $w$ .

# Constrained control

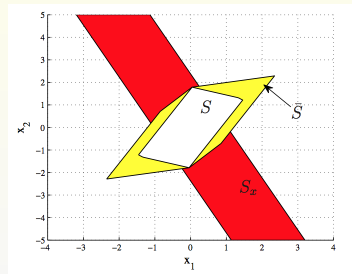
Consider the perturbed system :

$$\begin{aligned}x^+ &= Ax + B\text{sat}(u) + Ew \\ y &= Cx\end{aligned}$$

where  $\text{sat}(u) := \{u : Lu \leq \Delta\}$

In close-loop we wish :

$x \in \bar{S}$  bounded if  $w \in \mathcal{W}$  bounded.



In practice :

- Sometimes state trajectories  $x$  saturate the control  $u$
- **Performance** : find  $u$  subject to  $Lu \leq \Delta$  such that it minimizes  $\bar{S}$
- **More performance** : reduce the disturbance  $w$ .

# Robust control (Youla-Kucera parametrization)

Take a control law written in the form : **Observer, State-feedback and Youla-Kucera parametrization** :

$$\begin{aligned}\hat{x}^+ &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ u &= -K\hat{x} + v\end{aligned}$$

where

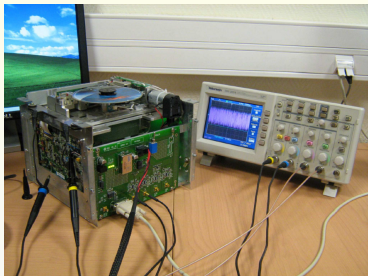
$$v = Q(z)[y - \hat{y}] = Q(z)S_o(z)w$$

Remark the similarity w.r.t. the **Parity space approach** for residual computation :

$$r(k) = W^T(Y_s(k) - H_{us}U_s(k))$$

- The parameter YK could be used for **faults/disturbances rejection**.
- and for detection of critical situations.

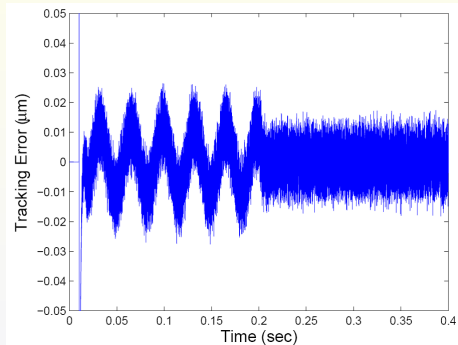
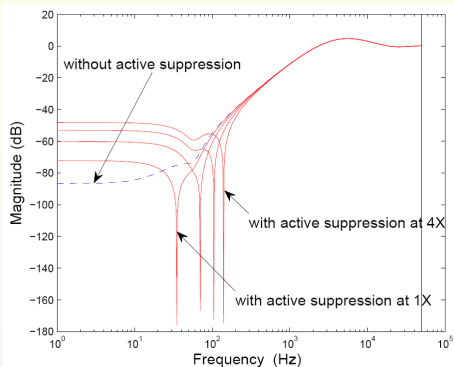
# Example : Bluray Disc servo control (Martinez and Alma, 2012)



- The problem is to reject repetitive disturbances (disc deformations).
- The disturbance frequency depends on the disc speed.
- Requires limited controller bandwidth to avoid high mechanical resonances.

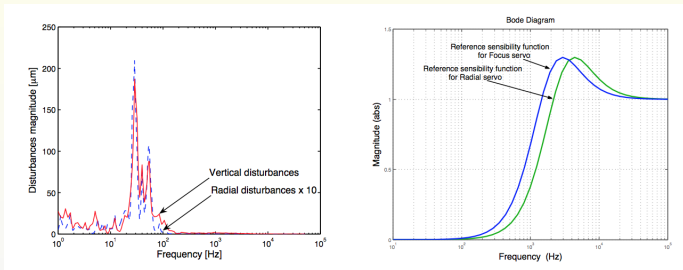


# Example : Bluray Disc servo control (Martinez and Alma, 2012)



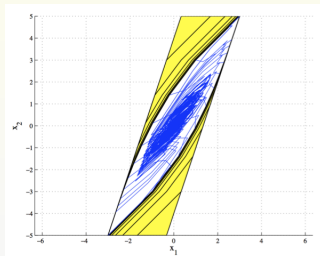
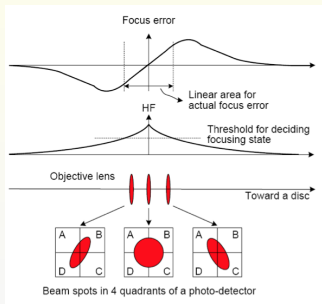
- High speed playback is now possible.
- Exact disturbance rejection is obtained, allowing to read poor quality optical disc.
- Obtained limited controller bandwidth to avoid high mechanical resonances.

## Performance evaluation (Well-Known : Frequency domain)



- **Bounded and small sensitivity** implies more stability robustness.
- Sensitivity functions have to verify the **desired reference shape**.
- More attenuation of disturbance implies more performance.

## Performance evaluation (New : Time domaine)



- **Bounded and small sets** implies more stability robustness.
- Invariant sets have to verify the **desired inclusion condition**.
- More attenuation of disturbance implies more performance.

What about fault tolerance??

Voici un article dont la présentation orale m'a motivée...

**SUPERVISORY FAULT-TOLERANT CONTROL  
WITH APPLICATION TO THE IFATIS  
TWO-TANKS BENCHMARK <sup>1</sup>**

**Joseph J. Yamé, Michel Kinnaert**

*Service d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, CP 165  
Fac. des sciences appliquées, Université libre de Bruxelles,  
50 av. F.D. Roosevelt, Brussels-1050, Belgium  
Fax:32-2-650.26.77, email: joseph.yame@ulb.ac.be*

**Abstract:** This paper reports the main ideas of a new technique for real-time fault-tolerant control (FTC) and demonstrates the effectiveness of this technique on a two-tanks process benchmark. The proposed technique relies on the operating data produced by the plant and on the control objective expressed quantitatively by a performance functional. The resulting control system architecture is of a supervisory type with the main feature that it achieves real-time fault tolerant control without on-line model-based fault detection and isolation (FDI) algorithms. The research activity has been performed within the framework of the research project Intelligent Fault Tolerant Control in Integrated Systems-IFATIS- funded by the European Union.  
*Copyright© 2005 IFAC*

**Keywords:** Fault tolerant control, performance monitoring, supervisory switching

Mon premier travail dans le domaine FTC :

Martinez J., Zhuo X., De-Dona J. and Seron M. "Multi-sensor switching strategy for automotive longitudinal control". American Control Conference - Minneapolis, Minnesota USA. June, 2006.

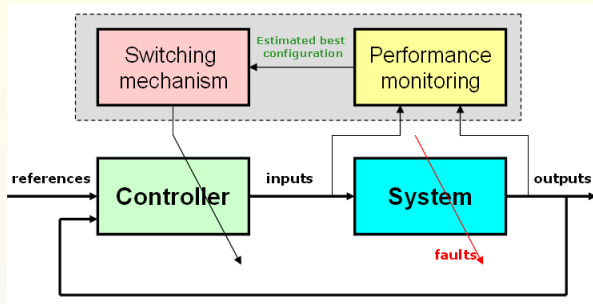
# Motivation : critical systems



Goal of a Fault-Tolerant Control (FTC) system is to :

- 1 Guarantee the **stability** of the system in presence of faults.
- 2 Maintain the **performance** of the faulty system as much as possible.

# Fault-Tolerant Control (New approach)



- It is based on the minimisation of a **control-performance** criterion.
- Achieves **"implicit" faulty detection and isolation** by avoiding the selection of faulty components.
- Allows **less conservative** FTC scenarios. Requiring, for example, at least one healthy component (or a combination of healthy components).

# Faults Modeling (classic approach for FDI)

Consider the **nominal system** :

$$x^+ = Ax + Bu + Ew$$

$$y = Cx + \eta$$

The **faulty system** is modeled as follows :

$$x^+ = Ax + Bu + w_F + w$$

$$y = Cx + \eta_F + \eta$$

where  $w_F$  and  $\eta_F$  reflect the faults.

- This fault model covers offsets in actuators and sensors for instance.
- The fault magnitude can be arbitrary, but most of time is just a constant.



# Faults Modeling (more suitable for FTC)

Consider the **nominal system** :

$$x^+ = Ax + Bu + Ew$$

$$y = Cx + \eta$$

The **faulty system** is modeled as follows :

$$x^+ = Ax + F_a Bu + Ew$$

$$y = F_s Cx + \eta$$

where  $F_a$  and  $F_s$  reflect the faults.

## Multiplicative vs. Additive fault models

- Severe faults such as component failure is better represented by multiplicative models (see [Niemann and Stoustrup \(2005\)](#)).
- Additive faults can never destabilise a stable linear closed-loop system, whereas actuator or sensor failures can destabilise the loop for an open-loop unstable plant.

# Reconfiguration

- Fault-hiding approach

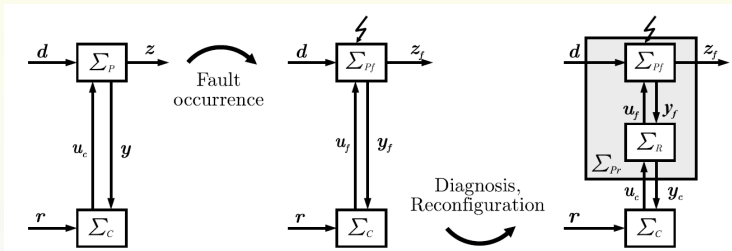


Figure taken from [Richter et al. \(2011\)](#).

- (a) **Nominal** closed-loop system (Fault-free),
- (b) **Faulty** closed-loop system before reconfiguration
- (c) **Reconfigured** closed-loop system for fault-hiding.

**Conditions** : keep the system states into an admissible domaine.

# Example : Multi-sensor reconfiguration

- Virtual sensor approach (fault-hiding)

Take now a nominal (**unchanged**) controller as :

$$u_c = -K\hat{x}$$

$$\hat{x}^+ = A\hat{x} + Bu_c + L(y_c - C\hat{x})$$

Virtual sensor dynamics :

$$\theta^+ = (A - L_\sigma F_\sigma C)\theta + Bu_c + L_\sigma y$$

$$y_c = (C - F_\sigma C)\theta + y$$

Here  $L_\sigma$  is computed for each fault matrix  $F_\sigma$  to assure that  $(A - L_\sigma F_\sigma C)$  is a Schur matrix.

## Example : Multi-sensor reconfiguration

- Virtual sensor approach (fault-hiding)

Take now a nominal (**unchanged**) controller as :

$$u_c = -K\hat{x}$$

$$\hat{x}^+ = A\hat{x} + Bu_c + L(y_c - C\hat{x})$$

Virtual sensor dynamics :

$$\theta^+ = (A - L_\sigma F_\sigma C)\theta + Bu_c + L_\sigma y$$

$$y_c = (C - F_\sigma C)\theta + y$$

Here  $L_\sigma$  is computed for each fault matrix  $F_\sigma$  to assure that  $(A - L_\sigma F_\sigma C)$  is a Schur matrix.

How to estimate the faulty situation ?

## Popular techniques for residual generation :

- Parity space approach (Gertler & Singer, 1990)
- Unknown input observer (Frank & Wünnenberg, 1989)
- A bank of Kalman filters (Basseville and Benveniste, 1986)
- Parameter estimation (Isermann, 1984)
- Voting schemes (Desai and Ray, 1984)

## More recent techniques for uncertain and/or LPV systems :

- Parity space approach for LPV systems (S. Varrier et al., 2012)
- (Invariant) sets-separation approach (M. Seron et al., 2008)
- Norm-based approaches (D. Henry et al., 2006)
- Generalized structured singular value approach (D. Henry et al., 2002)

## Popular techniques for residual generation :

- Parity space approach (Gertler & Singer, 1990)
- Unknown input observer (Frank & Wünnenberg, 1989)
- A bank of Kalman filters (Basseville and Benveniste, 1986)
- Parameter estimation (Isermann, 1984)
- Voting schemes (Desai and Ray, 1984)

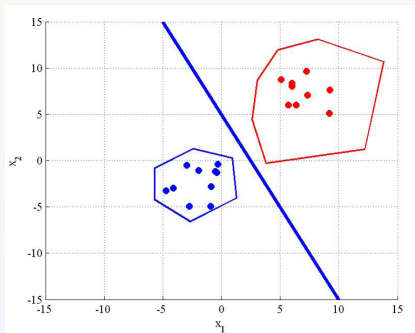
## More recent techniques for uncertain and/or LPV systems :

- Parity space approach for LPV systems (S. Varrier et al., 2012)
- (Invariant) sets-separation approach (M. Seron et al., 2008)
- Norm-based approaches (D. Henry et al., 2006)
- Generalized structured singular value approach (D. Henry et al., 2002)

# Residual generation

For each fault  $F_i$  consider a **residual signal**  $r_i$  (Blanke et al. [2006]) which is **sensitive to the fault** and is constructed using measurable information (system outputs/inputs, state estimations, references, etc).

$$r_i = \begin{cases} r_i^H \in \mathcal{S}_i^H, & \text{if } F_i \text{ inactive} \\ r_i^F \in \mathcal{S}_i^F, & \text{if } F_i \text{ active} \end{cases}$$

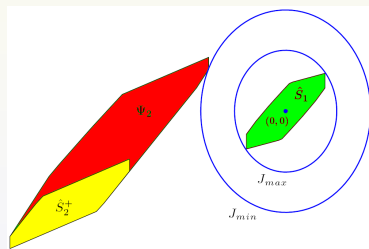




# Invariant Set Separation Principle

We can use **invariant-set computation** for **fault detection and isolation**.

- 1 Using a quadratic function for residual evaluation (e.g. ellipsoids)
- 2 Using a barrier function for residual evaluation (e.g. hyperplanes)

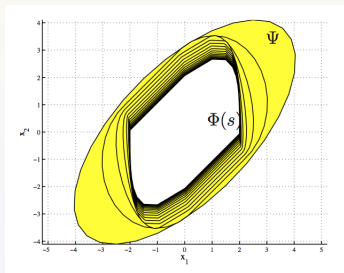


Here the residual is a quadratic "performance" function :  $J_i = x_i^T P x_i$ , with  $P$  a matrix obtained by solving a [Riccati equation](#) during the control design.

# Computation of Invariant Sets

Recently, we are able to compute minimal RPI sets for :

- Linear systems (Rakovik et al, 2005) (Kofman et al, 2007) (Olaru, 2010)
- Linear switched systems (Haimovich and Seron, 2009)
- Polytopic LPV systems (Martinez and Varrier 2012)



Outer-RPI approximation of the mRPI set :

$$\Phi(0) = \Psi$$

$$\Phi(s+1) = A\Phi(s) \oplus EW$$

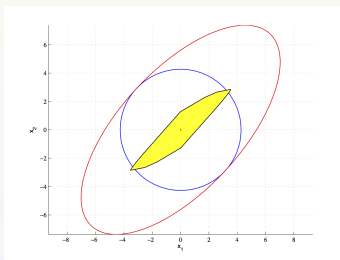
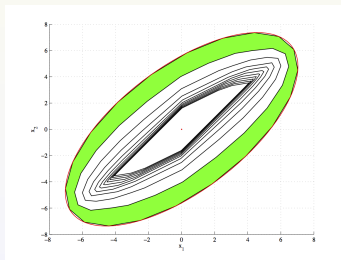
These sets could be used as **Thresholds** for fault detection.

# Shrinking RPI sets for Polytopic LPV systems

A sequence of invariant sets can be recursively built by considering the convex hull of the images of the individual subsystems :

$$\bar{S}_i = A_i \Phi(s) \oplus E_i \Delta, \quad \Phi(0) = \Psi$$

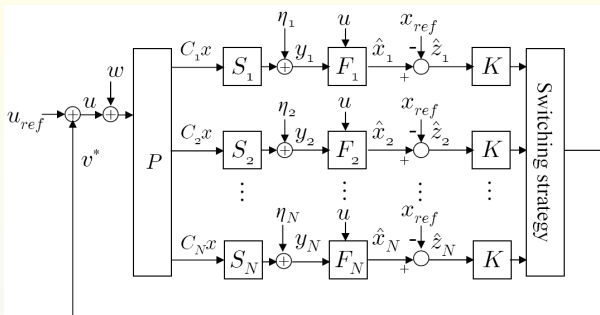
$$\Phi(s+1) = \text{convex.hull} \{ \bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_N \},$$



The initial RPI set is computed by using the **Bounded-real lemma**.

## Multi-sensor switching approach

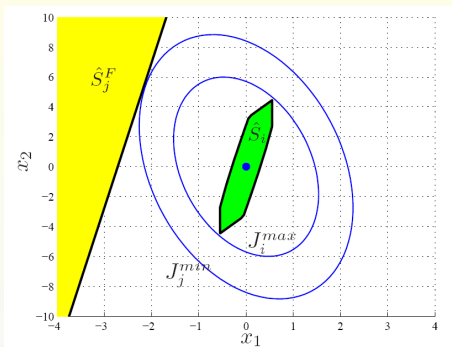
# The multi-sensor switching scheme



## Key features

- The scheme switches between sensor-controller pairs and selects the one which minimizes some "performance" criteria (*Martinez et al. 2006*).
- Closed-loop stability is guaranteed in the absence of faults.
- Closed-loop stability is preserved under faults since the switching scheme *automatically avoids selecting faulty sensors*.

# Simulation example (Stability conditions)

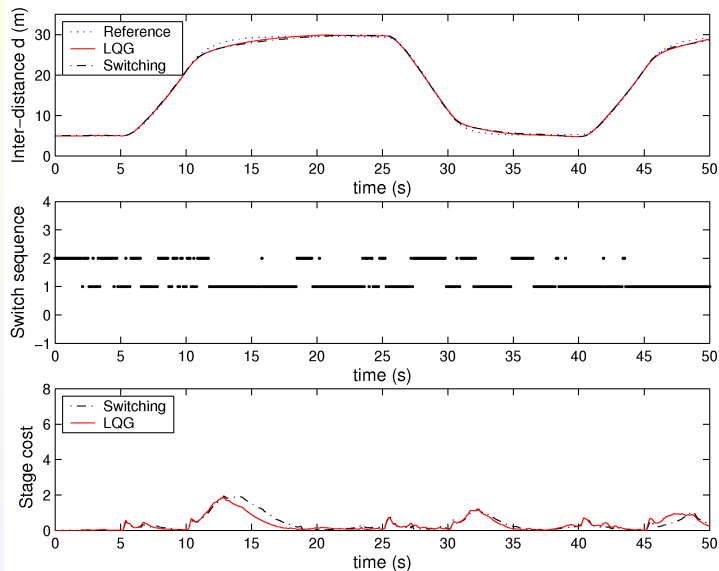


Multisensor switching stability conditions under sensor faults.

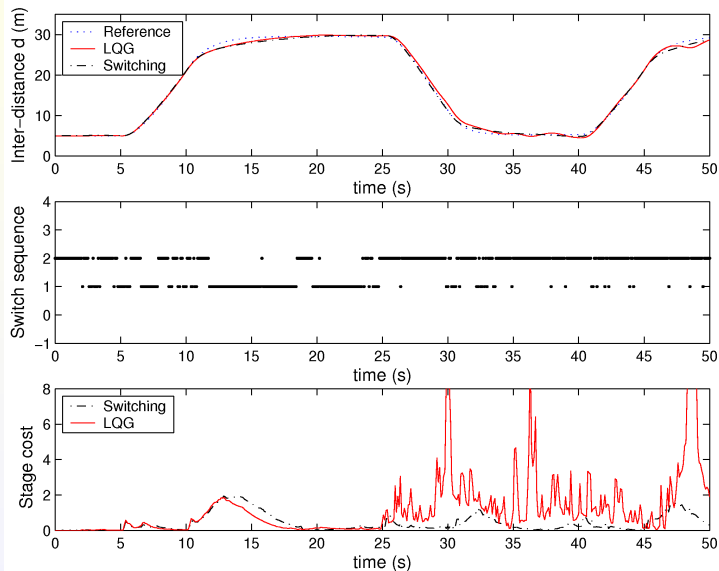
## Aspects which increase Fault-Tolerant Margins :

- Increase quality of the chosen sensors, e.g. less noisy sensors.
- Design suitable reference signals. In particular, increasing its minimal values.
- Chose an optimal  $P$  matrix to increase the Fault-Tolerant Margin (Distance between  $J_i^{max}$  and  $J_j^{min}$ )

# Simulation example (Nominal operation)

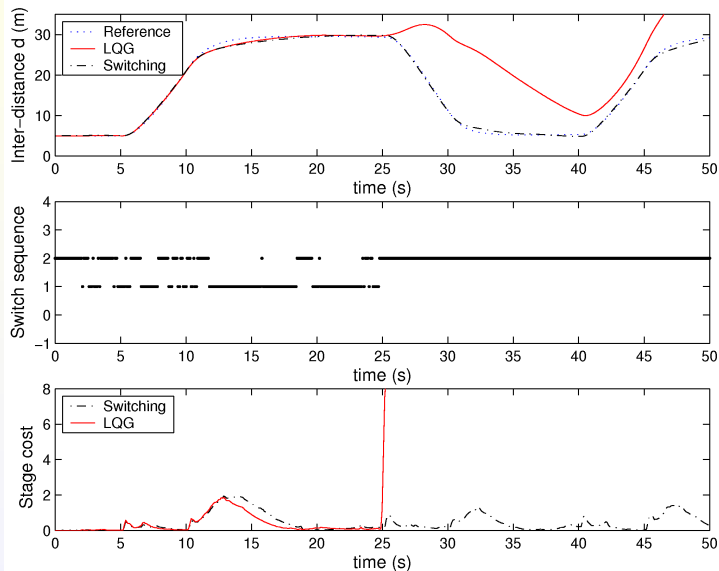


# Simulation example (A noisy sensor at 25s)





# Simulation example (Outage of a sensor at 25s)



## Perspectives

# Invariant-sets for Event-based control

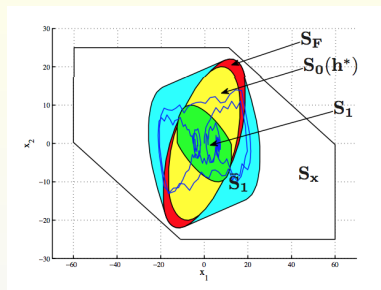
- The proposed control strategy could be seen as a state-dependent switching control which is intended for reducing the **actuation load**.
- it is possible to *a priori* verify if the event-based strategy respects the system's states constraints and avoid the control saturation.



Figure : Entomoptère Volant Autonome.

**Other application** : Driver assistance systems design.

# Event-based control strategy (geometric interpretation)

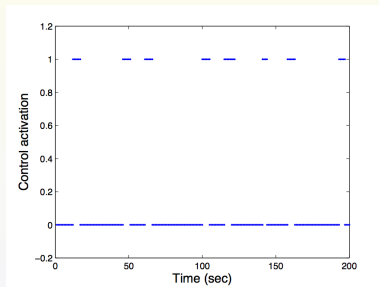
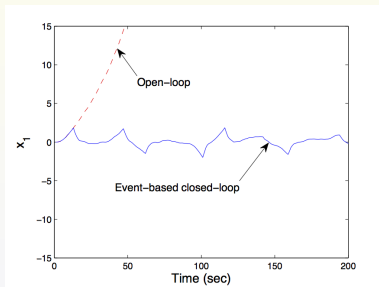


where :

- $S_1$  is the RPI set of 100% actuation (nominal performance).
- $S_0(h^*)$  characterizes the open-loop trajectories.
- $S_F \triangleq S_0(h^* + 1)$  is the set where  $u_1 = -Kx$  is applied.
- $\bar{S}_1$  is the RPI set of the event-based controlled system.

# Simulation example (a double integrator system)

States trajectories (left) and control activation sequence (right).



- Continuer l'application des techniques proposées en contrôle robuste et tolérante aux fautes sur des  **systèmes réels** .
- De point de vue méthodologique : explorer et améliorer les techniques de calcul des **mRPI pour des systèmes sous contraintes**. Approche par LPV polytopique par exemple.
- Adapter la technique **Event-based** sur des systèmes LPV. Application aux **systèmes d'aide à la conduite**
- Un futur **Benchmark en FTC** pourra servir comme élément de comparaison. La voiture INOVE pourra faire l'affaire.
- De côté de grands systèmes : exploration des techniques de **coordination sous contraintes** et de tolérance aux fautes.
- Des nouvelles **collaborations industrielles et scientifiques** sont en cours de développement (EDF, Total, Alstom). La recherche de financement fera "encore plus" partie des mes activités.

- Continuer l'application des techniques proposées en contrôle robuste et tolérante aux fautes sur des  **systèmes réels** .
- De point de vue méthodologique : explorer et améliorer les techniques de calcul des  **mRPI pour des systèmes sous contraintes** . Approche par LPV polytopique par exemple.
- Adapter la technique  **Event-based**  sur des systèmes LPV. Application aux  **systèmes d'aide à la conduite**
- Un futur  **Benchmark en FTC**  pourra servir comme élément de comparaison. La voiture INOVE pourra faire l'affaire.
- De côté de grands systèmes : exploration des techniques de  **coordination sous contraintes**  et de tolérance aux fautes.
- Des nouvelles  **collaborations industrielles et scientifiques**  sont en cours de développement (EDF, Total, Alstom). La recherche de financement fera "encore plus" partie des mes activités.

- Continuer l'application des techniques proposées en contrôle robuste et tolérante aux fautes sur des  **systèmes réels** .
- De point de vue méthodologique : explorer et améliorer les techniques de calcul des **mRPI pour des systèmes sous contraintes**. Approche par LPV polytopique par exemple.
- Adapter la technique **Event-based** sur des systèmes LPV. Application aux **systèmes d'aide à la conduite**
- Un futur **Benchmark en FTC** pourra servir comme élément de comparaison. La voiture INOVE pourra faire l'affaire.
- De côté de grands systèmes : exploration des techniques de **coordination sous contraintes** et de tolérance aux fautes.
- Des nouvelles **collaborations industrielles et scientifiques** sont en cours de développement (EDF, Total, Alstom). La recherche de financement fera "encore plus" partie des mes activités.



- Continuer l'application des techniques proposées en contrôle robuste et tolérante aux fautes sur des **systèmes réels**.
- De point de vue méthodologique : explorer et améliorer les techniques de calcul des **mRPI pour des systèmes sous contraintes**. Approche par LPV polytopique par exemple.
- Adapter la technique **Event-based** sur des systèmes LPV. Application aux **systèmes d'aide à la conduite**
- Un futur **Benchmark en FTC** pourra servir comme élément de comparaison. La voiture INOVE pourra faire l'affaire.
- De côté de grands systèmes : exploration des techniques de **coordination sous contraintes** et de tolérance aux fautes.
- Des nouvelles **collaborations industrielles et scientifiques** sont en cours de développement (EDF, Total, Alstom). La recherche de financement fera "encore plus" partie des mes activités.

- Continuer l'application des techniques proposées en contrôle robuste et tolérante aux fautes sur des **systèmes réels**.
- De point de vue méthodologique : explorer et améliorer les techniques de calcul des **mRPI pour des systèmes sous contraintes**. Approche par LPV polytopique par exemple.
- Adapter la technique **Event-based** sur des systèmes LPV. Application aux **systèmes d'aide à la conduite**
- Un futur **Benchmark en FTC** pourra servir comme élément de comparaison. La voiture INOVE pourra faire l'affaire.
- De côté de grands systèmes : exploration des techniques de **coordination sous contraintes** et de tolérance aux fautes.
- Des nouvelles **collaborations industrielles et scientifiques** sont en cours de développement (EDF, Total, Alstom). La recherche de financement fera "encore plus" partie des mes activités.

- Continuer l'application des techniques proposées en contrôle robuste et tolérante aux fautes sur des **systèmes réels**.
- De point de vue méthodologique : explorer et améliorer les techniques de calcul des **mRPI pour des systèmes sous contraintes**. Approche par LPV polytopique par exemple.
- Adapter la technique **Event-based** sur des systèmes LPV. Application aux **systèmes d'aide à la conduite**
- Un futur **Benchmark en FTC** pourra servir comme élément de comparaison. La voiture INOVE pourra faire l'affaire.
- De côté de grands systèmes : exploration des techniques de **coordination sous contraintes** et de tolérance aux fautes.
- Des nouvelles **collaborations industrielles et scientifiques** sont en cours de développement (EDF, Total, Alstom). La recherche de financement fera "encore plus" partie des mes activités.

Merci pour votre attention !