

Event-Based Control, Circuits and Processing towards Ultra-Low Power Consumption (e-BaCCuSS)

B. Bidégaray-Fesquet⁽¹⁾, B. Brogliato⁽²⁾, L. Fesquet⁽³⁾
et C. Prieur⁽⁴⁾

(1) Laboratoire Jean Kuntzmann (2) INRIA
(3) TIMA et (4) Gipsa-lab



LABORATOIRE
JEAN KUNTZMANN
MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES - INFORMATIQUE

inria
informatiques mathématiques



gipsa-lab
GIPSA-LAB

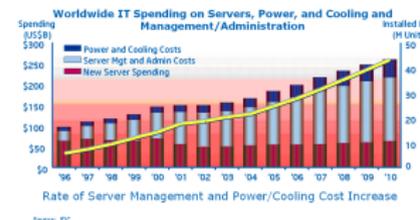
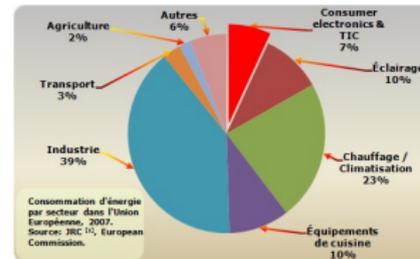


Actions *Pervasive Computing Systems (PCS)*
du Labex *Persyval-lab*
Septembre 2019

Contexte de l'équipe-action

Consommation ultra-faible de circuits électroniques par une approche événementielle.
Nécessité de revoir toute la chaîne d'acquisition et traitements

- Capteurs basés sur des événements
- Conception et utilisation d'*event-driven circuits* pour la minimisation de l'énergie
- Commande et observation basés sur des événements



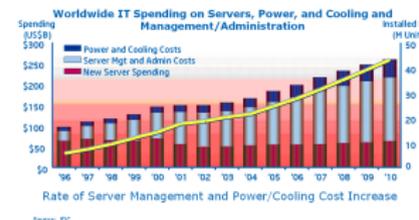
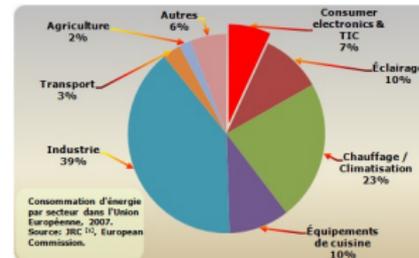
Projet de recherche structuré en 3 axes :

e-BaCCuSS

Mitigating the data-deluge by adequate sampling

Consommation ultra-faible de circuits électroniques par une approche événementielle.
Nécessité de revoir toute la chaîne d'acquisition et traitements

- Capteurs basés sur des événements
- Conception et utilisation d'*event-driven circuits* pour la minimisation de l'énergie
- Commande et observation basés sur des événements



Projet de recherche structuré en 3 axes :

e-BaCCuSS

Mitigating the data-deluge by adequate sampling

- Axe 1 : Circuits électroniques et imageurs
- Axe 2 : Convertisseurs de puissance : observation, feedback et commande optimale
- Axe 3 : Echantillonnage, commande et observation événementiels
- Démonstrateurs numérique et matériel

- 1 Quelques faits marquants
- 2 Les résultats scientifiques
 - Axe 2 : Convertisseurs de puissance : observation, feedback et commande optimale (CP)
 - Axe 1 : Circuits électroniques et imageurs (LF)
 - Axe 3 : Echantillonnage, commande et observation événementiels (BB)
- 3 Perspectives

Paysage avant e-BaCCuSS



Un paysage dispersé, et des compétences séparées

- **GIPSA** : commande, observation et traitement de signal parcimonieux
- **CEA** : conception de capteurs basés sur des événements
- **LJK** : compétences en échantillonnage non-régulier et en statistiques.
- **INRIA** : synthèse d'observateurs pour les systèmes non-lisses, et simulation
- **TIMA** : circuits électroniques asynchrones et événementiels

Equipe action e-BaCCuSS



- équipe resserrée avec compétences clairement identifiées
- reconnaissance internationale individuelle
- nouvelles collaborations
- nécessité de fédérer tout le monde sur un objet commun
- complémentarité des équipes

Le labex a été une très grande opportunité pour cette nouvelle équipe

- Une **thèse** financée par Persyval co-dirigée par **GIPSA** et **LJK**
Soutenance, publications, poursuite en post-doc à l'ULB
- Une **thèse** financée par ED EEATS co-dirigée par **INRIA** et **GIPSA**
Soutenance, publications, poursuite dans une start-up
- Un **post-doc** financé par Persyval dirigé par TIMA (avec **CEA**)
Soutenance, publications, poursuite chez Atos
- **Publications** (HAL+signature), réunions régulières,
- **Site web** <https://persyval-lab.org/en/sites/e-baccuss>
mis à jour (publis, slides, conf...)
- On avait annoncé une conférence : EBCCSP 2020 à Grenoble
**6th International Conference on
Event-Based Control, Communication and Signal Processing**
- **Valorisation**
Projet Carnot-LSI : E-BIS "Event-Based Image Sensor"
avec un ingénieur depuis un mois

- Une **thèse** financée par Persyval co-dirigée par **GIPSA** et **LJK**
Soutenance, publications, poursuite en post-doc à l'ULB
- Une **thèse** financée par ED EEATS co-dirigée par **INRIA** et **GIPSA**
Soutenance, publications, poursuite dans une start-up
- Un **post-doc** financé par Persyval dirigé par TIMA (avec **CEA**)
Soutenance, publications, poursuite chez Atos
- **Publications** (HAL+signature), réunions régulières,
- **Site web** <https://persyval-lab.org/en/sites/e-baccuss>
mis à jour (publis, slides, conf...)
- On avait annoncé une conférence : EBCCSP 2020 à Grenoble
**6th International Conference on
Event-Based Control, Communication and Signal Processing**
- **Valorisation**
Projet Carnot-LSI : E-BIS "Event-Based Image Sensor"
avec un ingénieur depuis un mois

- Une **thèse** financée par Persyval co-dirigée par **GIPSA** et **LJK**
Soutenance, publications, poursuite en post-doc à l'ULB
- Une **thèse** financée par ED EEATS co-dirigée par **INRIA** et **GIPSA**
Soutenance, publications, poursuite dans une start-up
- Un **post-doc** financé par Persyval dirigé par TIMA (avec **CEA**)
Soutenance, publications, poursuite chez Atos
- **Publications** (HAL+signature), réunions régulières,
- **Site web** <https://persyval-lab.org/en/sites/e-baccuss>
mis à jour (publis, slides, conf...)
- On avait annoncé une conférence : EBCCSP 2020 à Grenoble
**6th International Conference on
Event-Based Control, Communication and Signal Processing**
- **Valorisation**
Projet Carnot-LSI : E-BIS "Event-Based Image Sensor"
avec un ingénieur depuis un mois

Commande optimale de systèmes non-linéaires de complémentarité

avec Alexandre Vieira, Bernard Brogliato et CP

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le [problème de commande suivant](#)

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le [problème de commande suivant](#)

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ \end{array} \right.$$

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le **problème de commande suivant**

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \end{array} \right.$$

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le [problème de commande suivant](#)

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \\ h(x(t), u(t)) = 0, \end{array} \right.$$

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le **problème de commande suivant**

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \\ h(x(t), u(t)) = 0, \\ 0 \leq G(x(t), u(t)) \perp H(x(t), u(t)) \geq 0, \end{array} \right.$$

où $0 \leq x_1 \perp x_2 \geq 0$ signifie $x_1 \geq 0$ et $x_2 \leq 0$ composante par composante, et $\langle x_1, x_2 \rangle = 0$

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le **problème de commande suivant**

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \\ h(x(t), u(t)) = 0, \\ 0 \leq G(x(t), u(t)) \perp H(x(t), u(t)) \geq 0, \\ u(t) \in \mathcal{U} \end{array} \right.$$

où $0 \leq x_1 \perp x_2 \geq 0$ signifie $x_1 \geq 0$ et $x_2 \leq 0$ composante par composante, et $\langle x_1, x_2 \rangle = 0$

Motivé par

- des circuits mécaniques (avec impacts, friction de Coulomb...),
- circuits électriques (diodes idéales, Zener diodes...)
- commande par mode glissant, sweeping processes

on a étudié (avec Alexandre Vieira) le **problème de commande suivant**

Calculer u sur $[0, T(x, u)]$ t.q.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \\ h(x(t), u(t)) = 0, \\ 0 \leq G(x(t), u(t)) \perp H(x(t), u(t)) \geq 0, \\ u(t) \in \mathcal{U} \\ (x(0), x(T(x, u))) = (x_0, x_f), \end{array} \right.$$

où $0 \leq x_1 \perp x_2 \geq 0$ signifie $x_1 \geq 0$ et $x_2 \leq 0$ composante par composante, et $\langle x_1, x_2 \rangle = 0$

et plus précisément on a étudié le problème de commande optimale :

$$T^* = \min T(x, u) \quad (1)$$

$$\text{t.q.} \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \\ h(x(t), u(t)) = 0, \text{ a.e. on } [0, T(x, u)] \\ 0 \leq G(x(t), u(t)) \perp H(x(t), u(t)) \geq 0, \\ u(t) \in \mathcal{U} \\ (x(0), x(T(x, u))) = (x_0, x_f), \end{cases} \quad (2)$$

Résultats de l'axe 2 : [Article IEEE accepté il y a 9 jours !]

Calcul de conditions nécessaires et suffisantes pour ce problème de commande en temps minimal

et plus précisément on a étudié le problème de commande optimale :

$$T^* = \min T(x, u) \quad (1)$$

$$\text{t.q.} \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = \phi(x(t), u(t)), \\ g(x(t), u(t)) \leq 0, \\ h(x(t), u(t)) = 0, \quad \text{a.e. on } [0, T(x, u)] \\ 0 \leq G(x(t), u(t)) \perp H(x(t), u(t)) \geq 0, \\ u(t) \in \mathcal{U} \\ (x(0), x(T(x, u))) = (x_0, x_f), \end{cases} \quad (2)$$

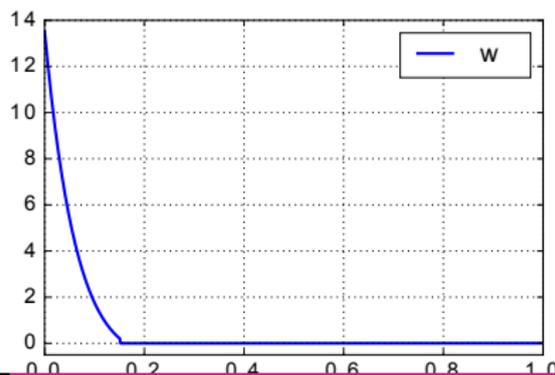
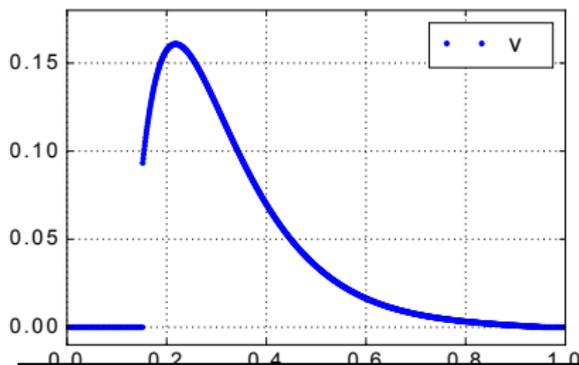
Résultats de l'axe 2 : [Article IEEE accepté il y a 9 jours !]

Calcul de conditions nécessaires et suffisantes pour ce problème de commande en temps minimal

Résultats numériques

Comme exemple, soit le problème de commande optimale (discontinue, sans a priori sur la discontinuité) :

$$\begin{aligned} \min \quad & \int_0^1 (\|x(t)\|_2^2 + u(t)^2) dt, \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ -8 & 10 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} -3 \\ -1 \end{pmatrix} v(t) + \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \end{pmatrix} u(t), \\ 0 \leq v(t) \perp w(t) = (1 \quad -3) x(t) + 5v(t) + 3u(t) \geq 0, \\ x(0) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -1 \end{pmatrix}^\top, \quad x(T) \text{ libre} \end{cases} \end{aligned}$$



Laurent

Brigitte

Filtre donné en représentation d'état, par un système d'équations différentielles ordinaires :

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bi(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Di(t),\end{aligned}$$

Pas d'hypothèse *a priori* sur la discrétisation en temps.

Le schéma peut être Euler, Euler rétrograde, Crank-Nicolson (bilinéaire), Runge-Kutta...

Forme intégrale :

$$x(t) = e^{At}x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bi(\tau)d\tau.$$

Autres schémas qui proviennent des formules de quadrature standard.

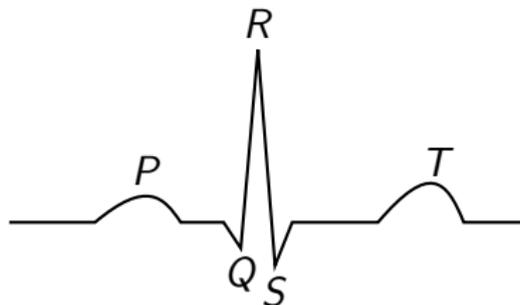
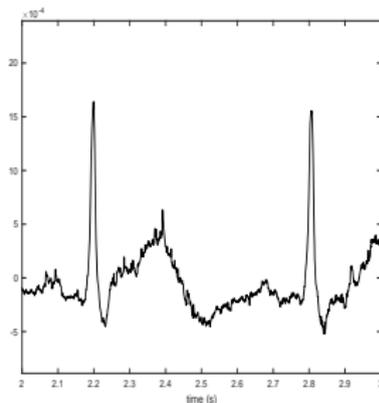
Une grande variété de schémas d'échantillonnage

- par traversée de niveau
- par détection de pics
- par traversée de niveau et détection de pics
- par traversée de pente
- par décimation linéaire
- et de nombreux autres, provenant de sources extérieures, orientés application, . . .

BBF et L. Fesquet, *Levels, peaks, slopes... which sampling for which purpose ?*, EBCSP 16, Cracovie, juin 2016.

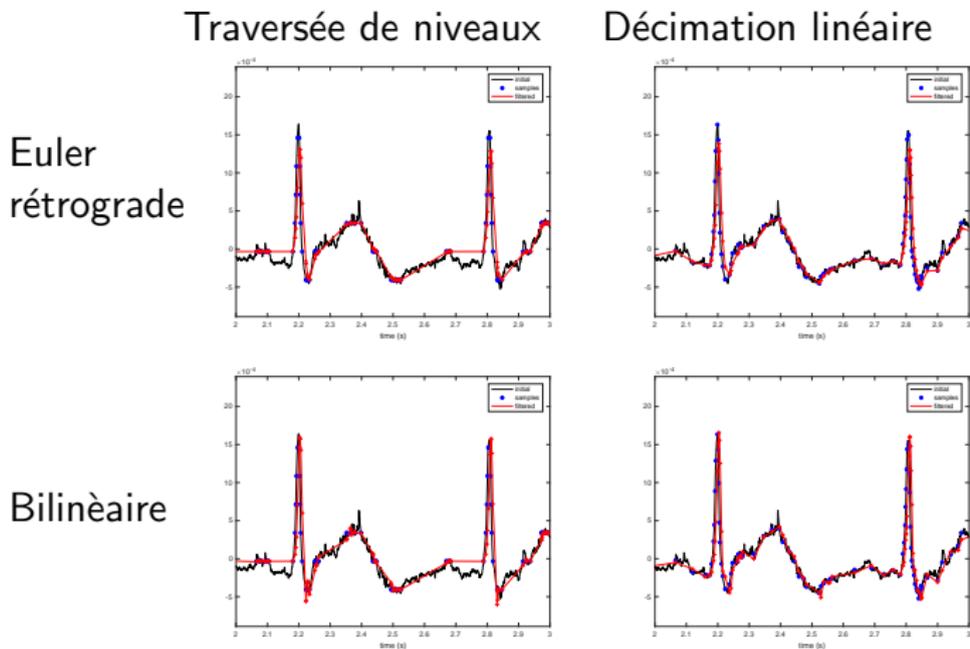
M. Greitans, R. Shavelis, L. Fesquet et T. Beyrouthy, *Combined peak and level-crossing sampling scheme*, SAMPTA 2011, Singapour, mai 2011.

Signal d'électrocardiogramme et patterns d'un rythme cardiaque "normal" :



Filtrage d'électrocardiogramme

Traversée de niveaux (gauche) décimation linéaire (droite) :



$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$y = Cx.$$

x : vecteur d'état du système,

u : contrôle appliqué au système,

y : sortie du système.

Objectifs possibles : trouver u pour

- stabiliser le système, i.e. x ou $y \rightarrow 0$ quand $t \rightarrow \infty$.
- suivre une trajectoire r : $y - r$ reste petit et/ou tend vers 0.

Stabilisation : on trouve K tel que $A - BK$ est une matrice de Hurwitz, et on pose $u = -Kx$.

Suivi de trajectoire : on utilise $u = -Kx + Gr$.

Problèmes annexes : sensibilité aux perturbations...

Ne changer le contrôle qu'à des temps t_k discrets.

Garder le contrôle constant entre deux changements :

$$u(t) = u_k \text{ pour } t \in [t_k, t_{k+1}[.$$

Deux contextes :

event-triggered : t_k est "déclenché" quand un seuil est dépassé (par x , y , $y - r \dots$);

self-triggered : en fonction de la valeur de x (y , ...) on choisit au temps t_k quand aura lieu t_{k+1} .

But :

- les mêmes qu'en contrôle continu,
- assurer un temps inter-échantillon minimal \Rightarrow diminution drastique du nombre d'échantillons, de la consommation, des communications. . .

Quand est-on petit ?

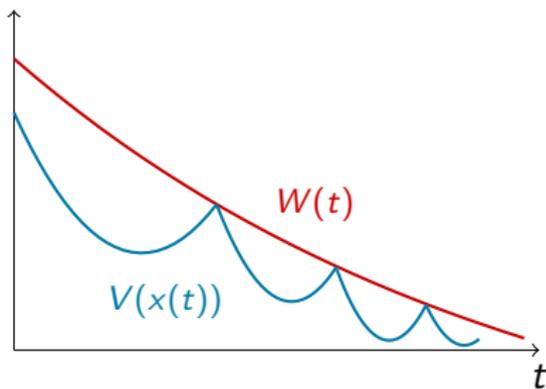
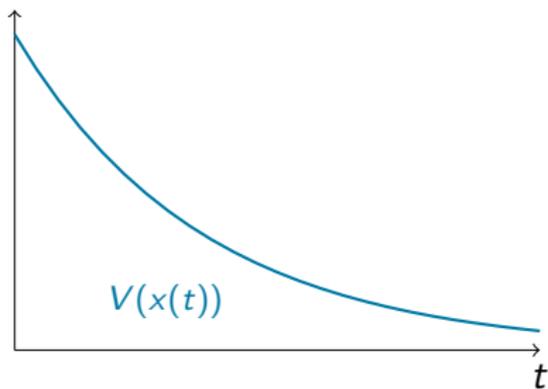
À une matrice P définie positive, on associe la fonction de type Lyapunov

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t).$$

être petit, c'est rendre la fonction de Lyapunov petite.

Habituellement, on demande à V d'être décroissante

Mais on peut simplement avoir $V(x(t)) \leq W(t)$



Point commun de tous les travaux

En pratique, on choisit un couple (P, Q) de matrices définies positives telles que

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -Q.$$

Au temps t_k où on met à jour la commande (ou pour tout temps si on fait du contrôle continu), on a

$$\left. \frac{d}{dt} V(x(t)) \right|_{t=t_k} = -x^T(t_k) Q x(t_k).$$

- **Stabilité** Au temps t_k , on sait que $-x^T(t_k) Q x(t_k) < 0$ et donc $V(x(t))$ est repoussé vers le bas (à préciser au cas par cas)
- **Temps minimum entre échantillons** Quand $t_k < t < t_k + \tau$,

$$\frac{d}{dt} V(x(t)) = -x(t)^T Q x(t) - 2(x(t) - x(t_k))^T K^T B^T P x(t).$$

Il existe β et $\text{bleu} \leq -\beta$ et $\|\text{rouge}\| \leq \beta/2$.

F. Zobiri, N. Meslem, *BBF Event-Triggered Stabilizing Controllers Based on an Exponentially Decreasing Threshold*, EBCSP 17, Funchal, mai 2017.

On se débarrasse de Q . On cherche λ solution de

$$\lambda_{\max}(-Q, P) \equiv \inf\{\lambda \in \mathbb{R} \mid \lambda P - Q > 0\} = -\lambda_{\min}(P^{-1/2}QP^{-1/2}),$$

ce qui assure que

$$\left. \frac{d}{dt} V(x(t)) \right|_{t=t_k} \leq \lambda_{\max}(-Q, P) V(x(t_k)).$$

On extrapole pour tout temps et on choisit $0 < \alpha < -\lambda_{\max}(Q, P)$.

$$V(x(t)) \leq V(x_0)e^{-\alpha t} \equiv W(t).$$

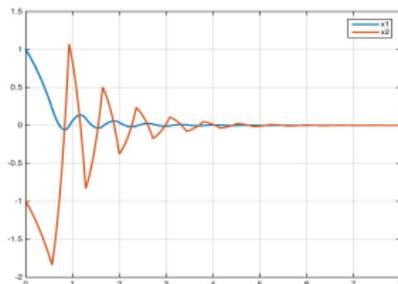
Stabilisation : simulation

$$\frac{dx}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 3 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t),$$

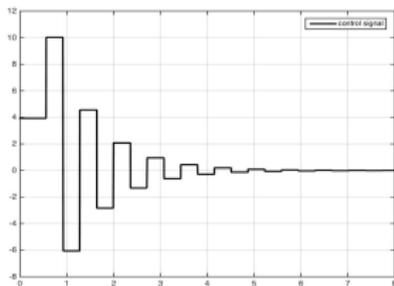
$$u(t) = (-1.7329 \quad -5.6667) x(t).$$

$$\alpha = 2.2, \lambda_{\max} = 2.6653,$$

$$\delta = 0.0027.$$

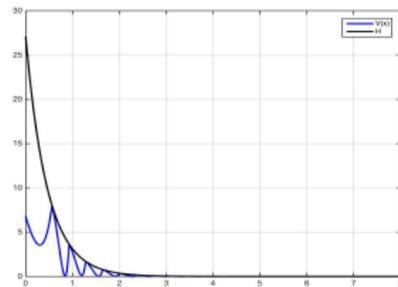


États $x_i(t)$



Contrôle $u(t)$

(16 parmi $8 \cdot 10^4$ échantillons)



$V(x(t))$ et $W(t)$

F. Zobiri, N. Meslem, *BBF Event-Based Sampling Algorithm for State Feedback Tracking Controllers*, EBCASP 16, Cracovie, juin 2016.

- On veut que y suive la trajectoire donnée $r(t)$.
Le contrôle continu est de la forme

$$u_c(t) = -Kx(t) + Gr(t),$$

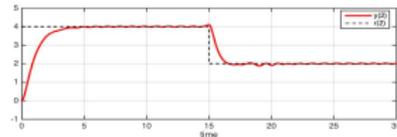
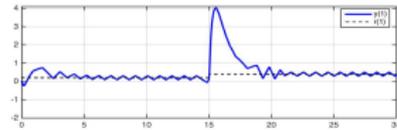
$G = (-C(A - BK)^{-1}B)^{-1}$ (matrice de calibration).

- La solution continue est calculée sur une machine distante, qui envoie quand c'est nécessaire le nouveau contrôle à appliquer au système réel.
Téléguidage : le système réel n'a pas à connaître r .
- Pour que cela marche il suffit d'amener à zéro $e(t) = x(t) - x_c(t)$.
On introduit un couple (P, Q) , et on choisit $W(t) = \delta$, une constante.

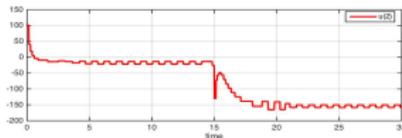
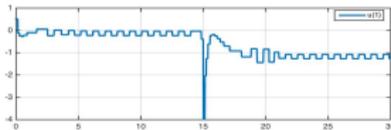
$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k, V(e(t)) = \delta\}.$$

Suivi de trajectoire : simulation

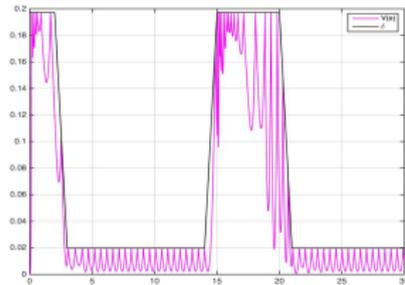
Système 4×4 , avec deux sorties.
Trajectoire à suivre avec des sauts.
Adaptation de la borne δ lors des sauts.



États $x_i(t)$



Contrôles $u_i(t)$
(74 parmi 3.10^5 échantillons)



$V(x(t))$ et $W(t)$

Rejet de perturbation :

F. Zobiri, N. Meslem, BBF. *Event-Based Integral Control for Output Disturbance Rejection*, EBCCSP 19, Vienne, mai 2019.

Version self-triggered des algorithmes :

F. Zobiri, N. Meslem, BBF. *Self-triggered stabilizing controllers for linear continuous-time systems*, soumis.

Systèmes switchés :

F. Zobiri, N. Meslem, BBF. *Event-Triggered Stabilizing Controllers for Switched Linear Systems*, à paraître.

Systèmes non linéaires :

F. Zobiri, N. Meslem, BBF. *Design of Event-triggered Controllers for Nonlinear Systems Using Contraction Analysis*, en préparation.

Contrôle évènementiel du diabète insulino-dépendant

Le traitement du diabète insulino-dépendant met en jeu le contrôle artificiel du taux de glucose dans le sang du patient *via* une injection d'insuline.

Les mesures de glycémie et les injections d'insuline ne sont pas continues en temps mais effectuées à des temps discrets.

→ **contrôle discret**, **contrôle event-** et **self-triggered**.

Approche mathématique : un patient est modélisé par un grand système s'équations différentielles ordinaires :

$$\dot{Y} = f(Y, P, U)$$

qui mettent en jeu de nombreuses **variables** Y , des **paramètres** P dépendant du patient et une **procédure de contrôle** U complexe.

Une unique variable est observée, la glycémie :

$$y = CY.$$

Paramétrisation du modèle en plusieurs étapes.

- **Modèle direct** : Définition d'un premier modèle avec des paramètres moyens :

$$\dot{Y} = f(Y, P, U).$$

Trois types de patients : sains, diabétique insulino-dépendant, diabétique non insulino-dépendant.

- Sensibilité aux paramètres : Étude de la sensibilité aux paramètres du modèle au voisinage de ces paramètres moyens.
- Estimation de paramètres : Identification des paramètres d'un vrai patient à partir de ses mesures de glycémie, les entrées et le contrôle étant connus (repas, activité, injections d'insuline) :

$$\dot{Y} = f(Y, P, U).$$

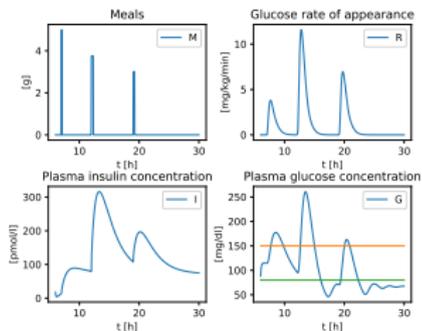
- Contrôle : Adaptation des procédures de contrôle à ce patient spécifique :

$$\dot{Y} = f(Y, P, U).$$

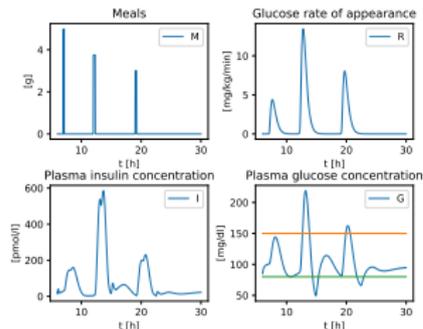
Schéma numérique :

- simple schéma d'Euler
- temps de discrétisation : 1 min
= temps d'échantillonnage des capteurs de glycémie sous-cutanés usuels.

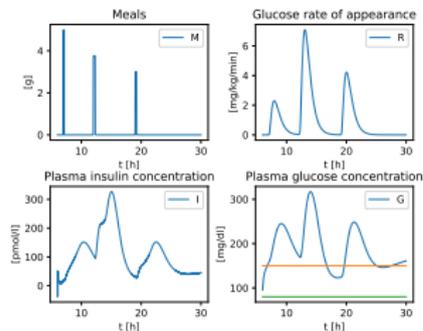
Patient insulino-dépendant



Patient sain



Patient non insulino-dépendant



- Equipe resserrée.
Compétence de chaque membre est clairement identifiée
- Volonté de continuer à travailler ensemble
- Valorisation à poursuivre
- Structurer la recherche sur l'*event-based* au niveau Grenoblois et mondial

Le labex était une excellente opportunité. Nous souhaitons poursuivre.

e-BaCCuSS

B. Bidégaray-Fesquet⁽¹⁾, B. Brogliato⁽²⁾, L. Condat⁽⁴⁾,
L. Fesquet⁽³⁾, J-E. Gomes-Baldera⁽⁴⁾, F. Leblanc⁽¹⁾, S. Lesecq⁽⁵⁾,
N. Marchand⁽⁴⁾, N. Meslem⁽⁴⁾, J. Poujaud⁽³⁾,
R. Possamai Bastos⁽³⁾, C. Prieur⁽⁴⁾, G. Sicard⁽⁵⁾

(1) LJK (2) INRIA (3) TIMA (4) GIPSA (5) CEA