Par Clément Letellier

Directeur de Thèse: Houcine Chafouk
Co-Directeur : Ghaleb Hoblos

Diagnostic Robuste des Systèmes Incertains

Application à un système mécatronique pour l'automobile

Université de Rouen

Institut de Recherche en Systèmes Électroniques EMbarqués
(IRSEEM) - EA 4353

Plan

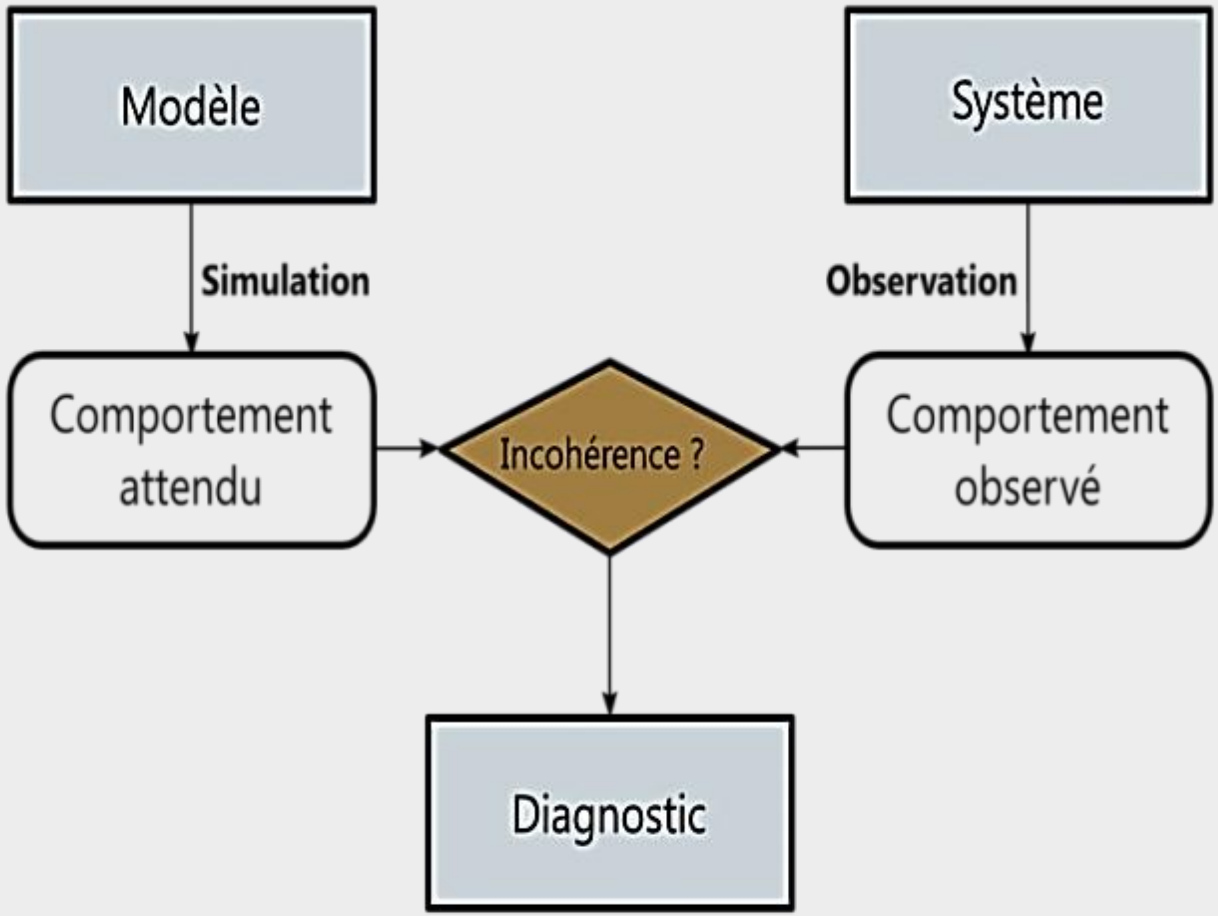
1. Introduction
2. Analyse par intervalles
3. Diagnostic des systèmes incertains
4. Détection robuste des défauts
5. Systèmes multimodèles incertains
6. Application à l'automobile
7. Conclusion & Perspectives

Introduction

Diagnostic des défauts

Pourquoi le diagnostic ?

Diagnostic à base de modèle



Exemple: le vol AF447

Vol AF447

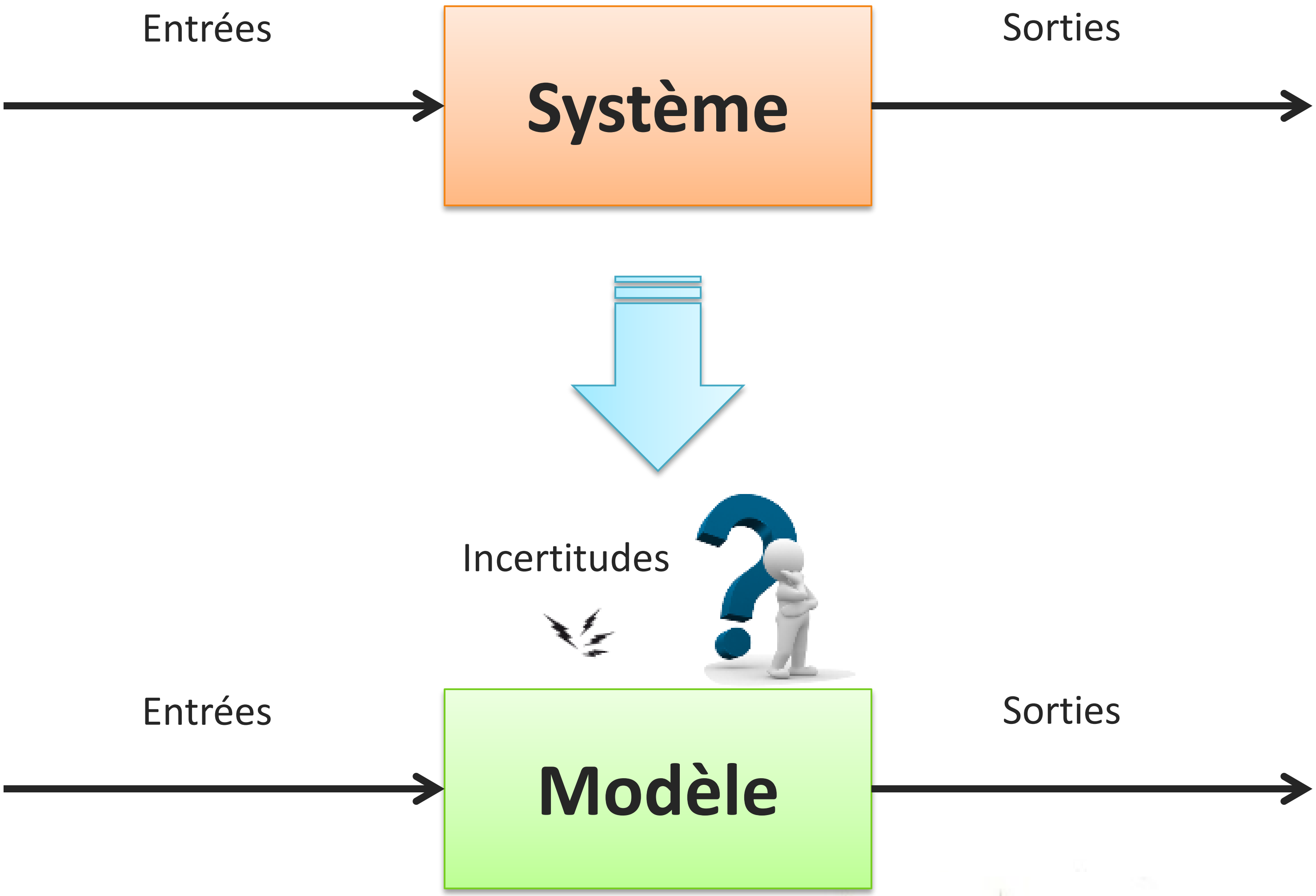
Sondes pitots

Analyse par intervalles

Modéliser les incertitudes

Des intervalles pour quoi faire ?

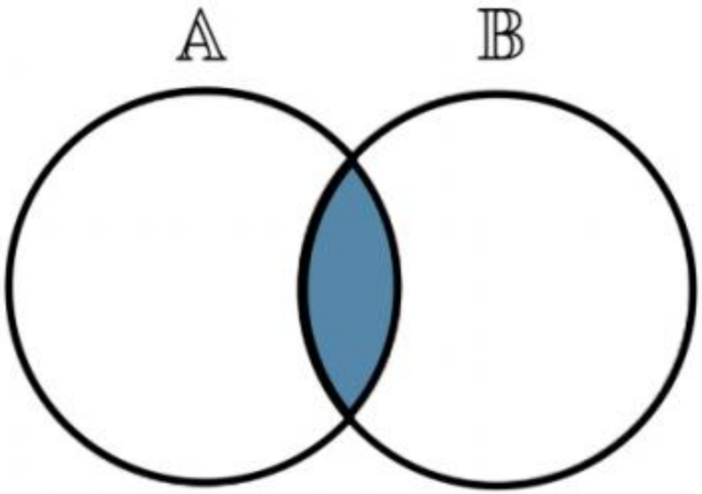
Modélisation: une étape délicate



Analyse par intervalles

- **Un outil du calcul ensembliste**

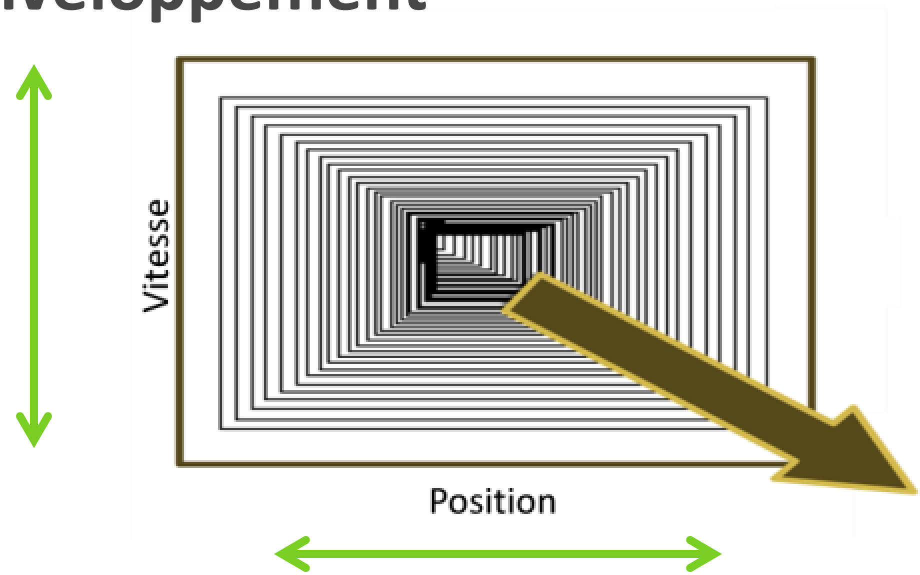
$$\mathbb{A} \cap \mathbb{B} = \mathbb{B} \cap \mathbb{A}$$



- **Prend en compte toute la plage de variation des paramètres**
- **Augmente la robustesse des méthodes de diagnostic**

Inconvénients: Pessimisme

- **Effet d'enveloppement**



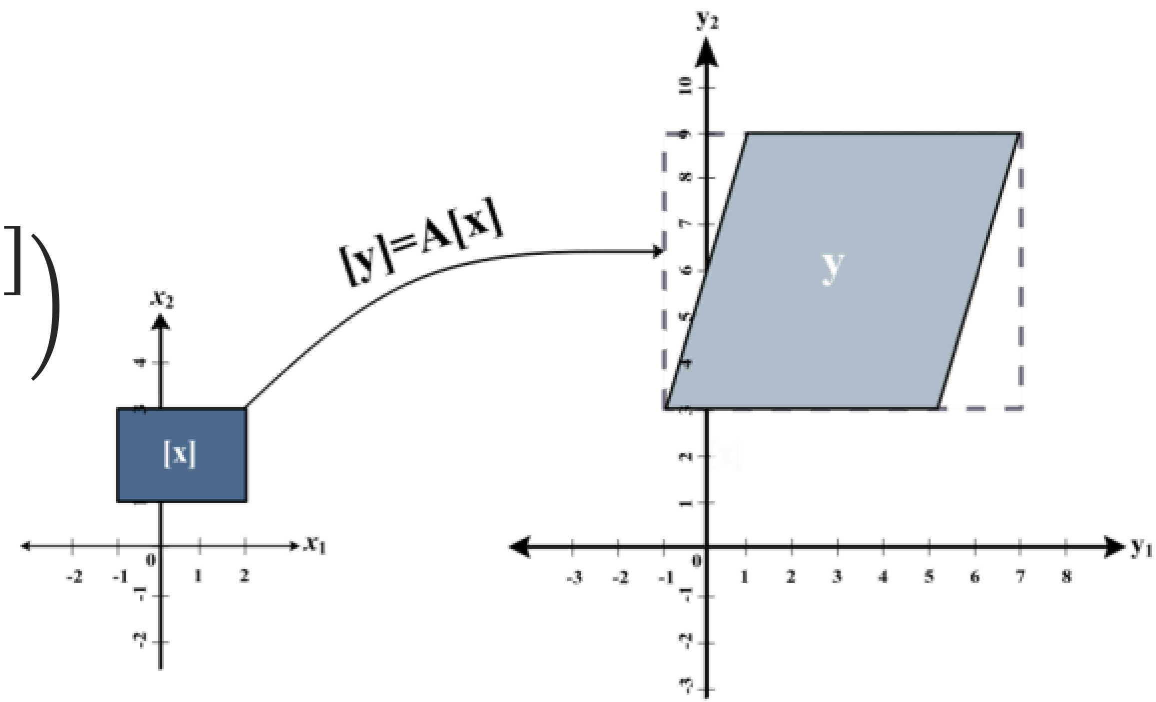
- **Effet de dépendance**
  - **Soit une résistance R variant entre 90 et 110 ohms**

$$[R] - [R] = [90, 110] - [90, 110] = [-20, 20] \neq \{0\}$$

Inconvénients: Pessimisme

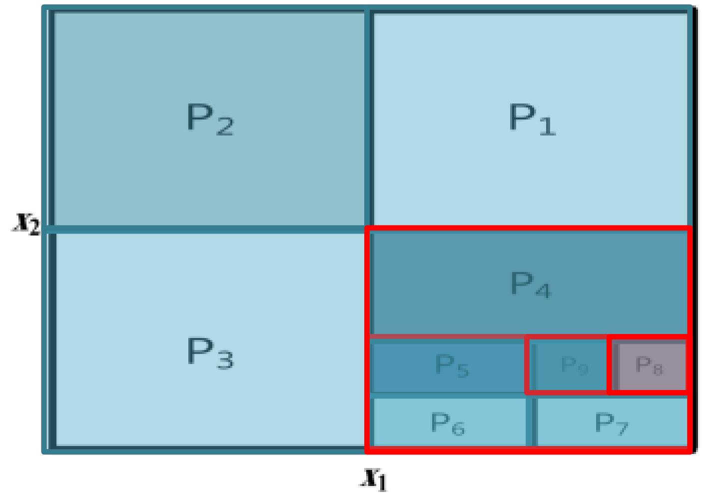
$$A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

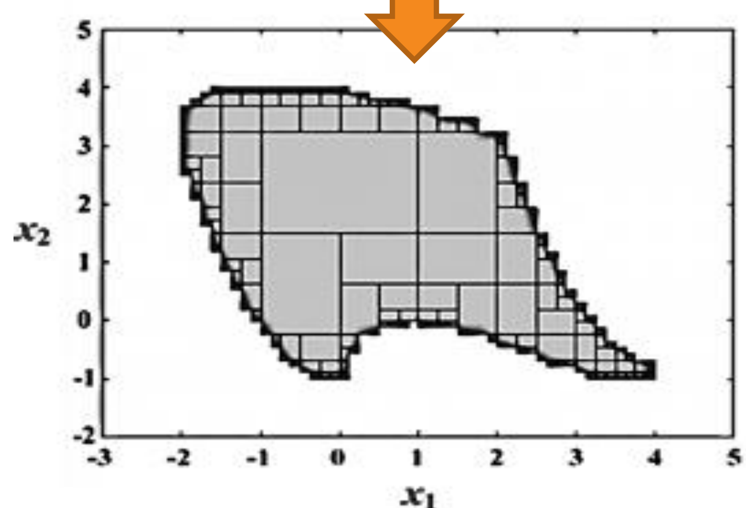
$$[x] = \begin{pmatrix} [-1, 2] \\ [1, 3] \end{pmatrix}$$



$$[y] = A \times [x] = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [-1, 2] \\ [1, 3] \end{pmatrix}$$

Partitionnement en sous pavés





Algorithme de sous-pavage

ImageSp

Calcul de l'image directe

3

Diagnostic des systèmes incertains

L'incertain pour la robustesse

Comment un système incertain permet la robustesse ?

Estimation d'état par prédiction/correction

- **Soit le système d'équations du système à temps discret suivant :**

$$\begin{cases} x_{k+1} = & g(x_k, u_k, \theta_k) + w_k \\ y_k = & h(x_k, u_k, \theta_k) + v_k \end{cases}$$

- **L'estimateur d'état par prédiction/correction est composé des étapes suivantes :**
  - **Prédiction (Ensemble des états prédits)**

$$\mathbb{X}_k^P = \{x_k = g(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) + w_{k-1} | x_{k-1} \in \mathbb{X}_{k-1}^c, \theta_{k-1} \in \Theta, w_{k-1} \in W\}$$

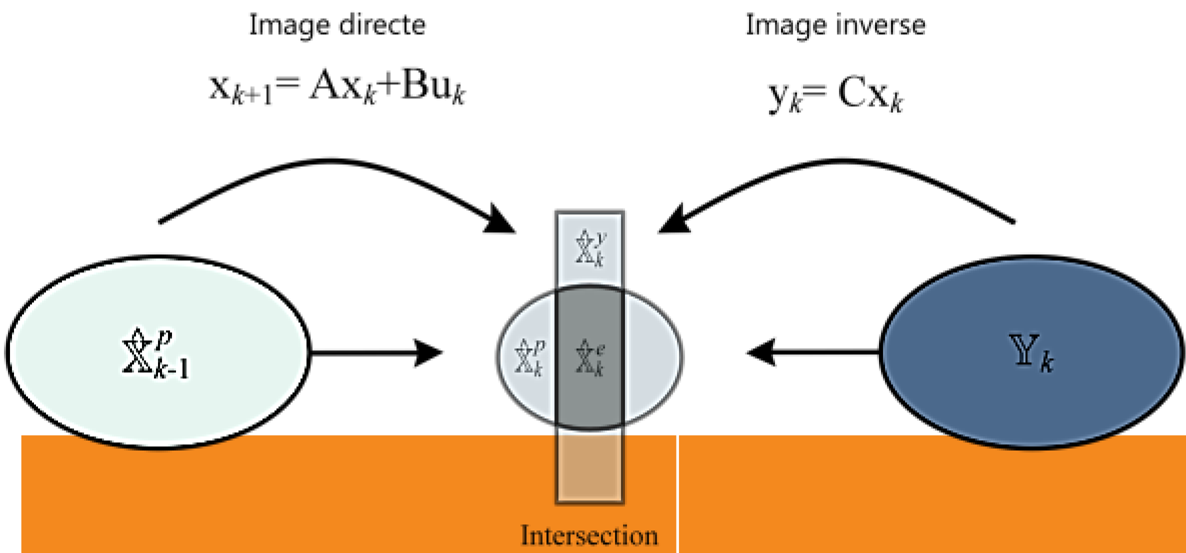
  - **Observation (Ensemble des états consistants)**

$$\mathbb{X}_k^y = \{x_k | \exists \theta_k \in \Theta, v_k \in V, y_k = h(x_k, u_k, \theta_k) + v_k\}$$

  - **Correction (Ensemble des états estimés)**

$$\mathbb{X}_k^c = \mathbb{X}_k^p \cap \mathbb{X}_k^y$$

Observateur par prédiction/correction



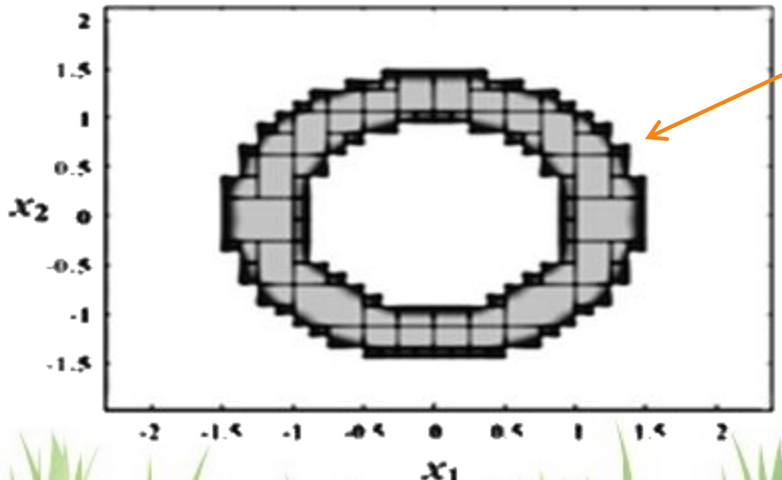
		Observateur d'état par prédiction/correction
	Reconstruction d'état	Non
	Banc d'observateurs	Non
	Effet d'enveloppement	Non
	Inversion ensembliste	Oui

Problème d'inversion

- **Inversion ensembliste**

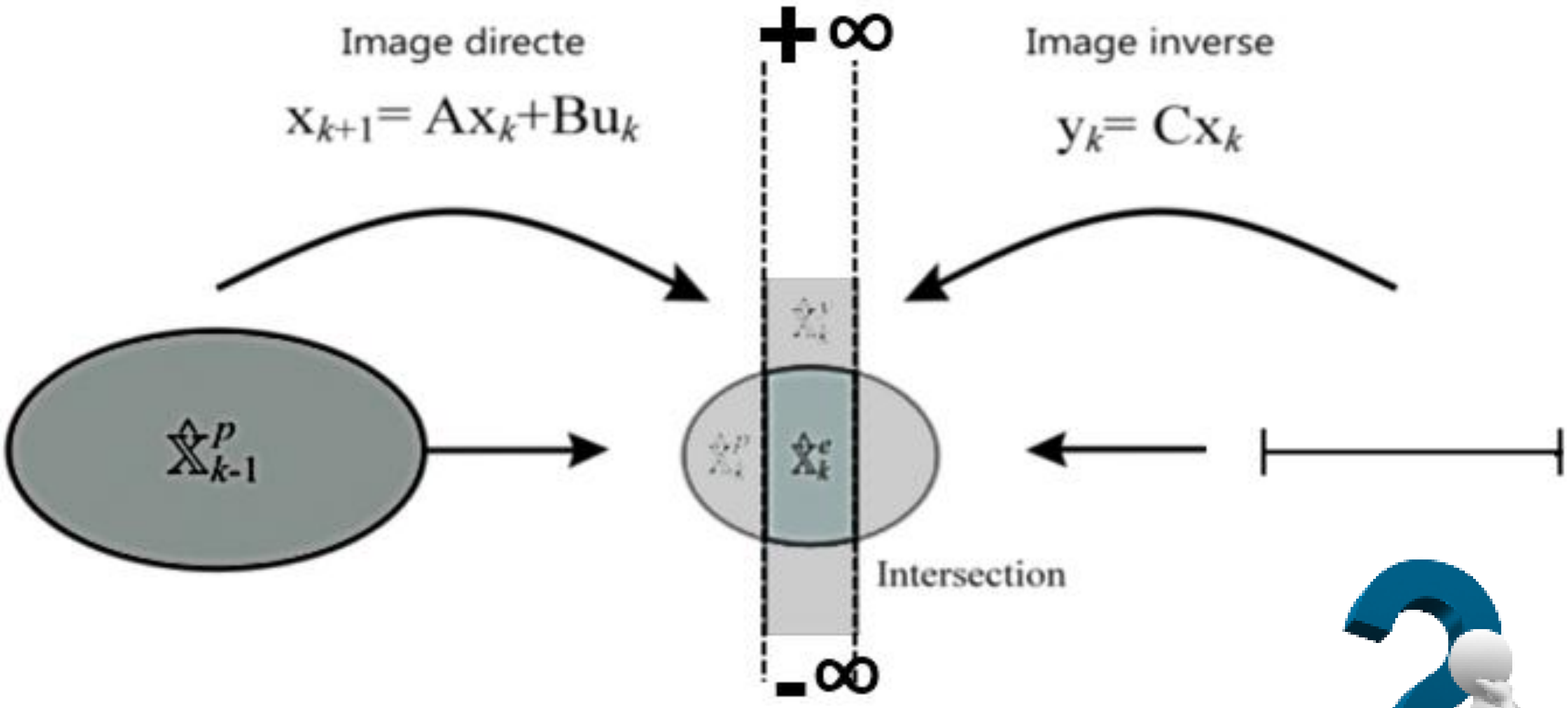
$$\mathbb{X}_k^y = \{x_k | \exists \theta_k \in \Theta, v_k \in V, \quad y_k = h(x_k, u_k, \theta_k) + v_k\}$$

- **Exemple :**
  - $f(x1, x2) = x1^2 + x2^2$ où $x = \{x_1, x_2\}$ et $y \in [1, 2]$



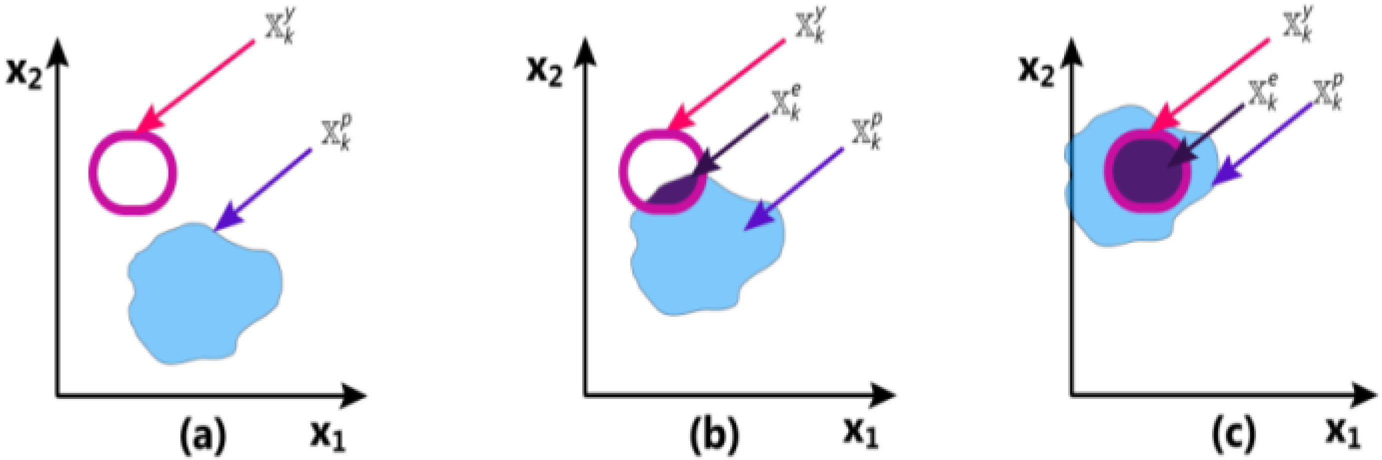
Méthode de sous-pavage
(Temps de calcul important)

Problème de reconstruction d'état



Estimation d'état par prédiction/correction

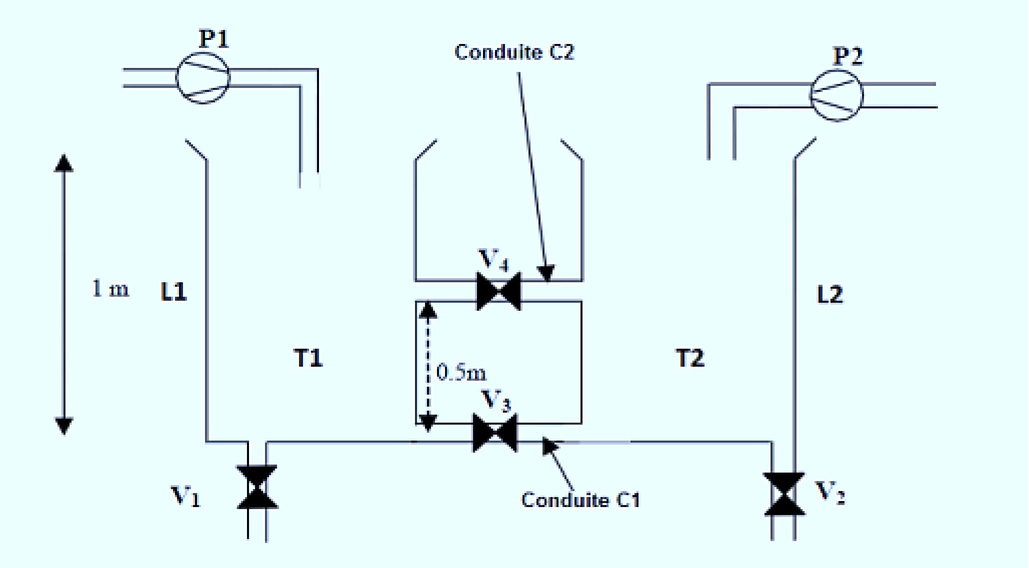
- **Détection de défaut(s)**



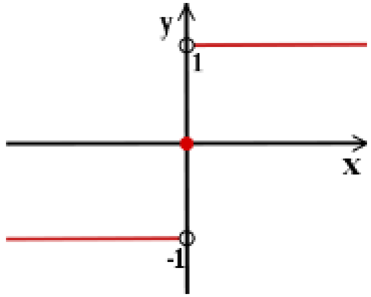
Tests de cohérence sur les variables externes

Défaut détecté $\boxed{\text{si } \mathbb{X}_k^c = \mathbb{X}_k^p \cap \mathbb{X}_k^y = \emptyset}$

Exemple : Système à deux cuves



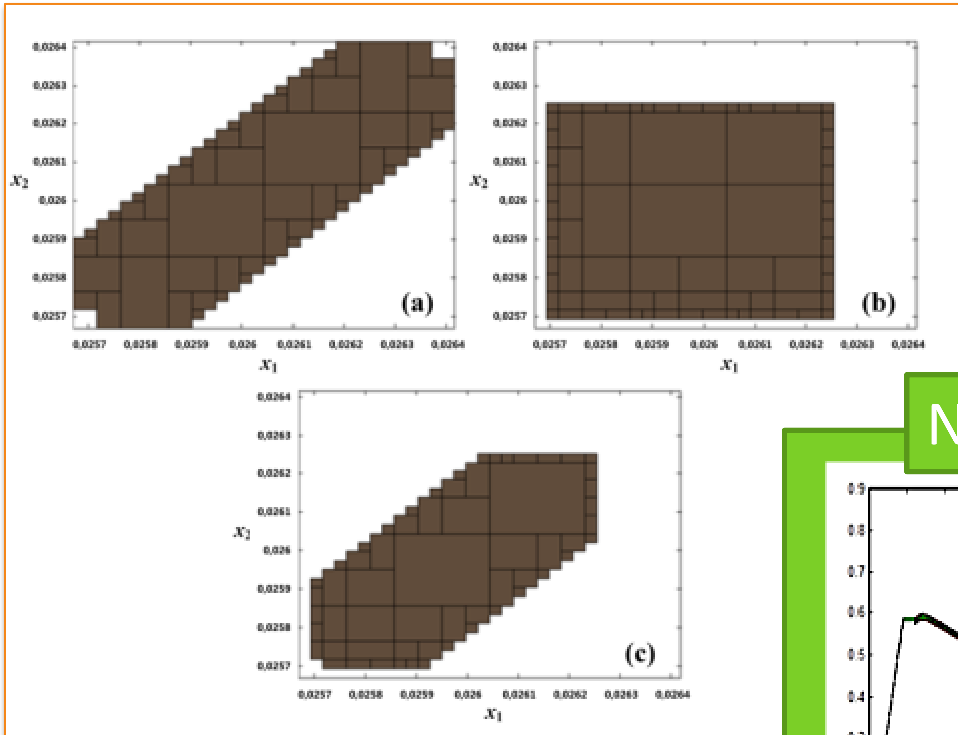
Les fonctions « sign » créent des non-linéarités



$\boldsymbol{S}$: section des réservoirs
$\boldsymbol{D}$: débit des pompes
$\boldsymbol{g}$: accélération gravitationnelle
$\mathbf{A}$: section des conduites
$\boldsymbol{\alpha_i} = \mathrm{A}\sqrt{2\mathrm{g}}$ avec $i \in \{1,2,3,4\}$

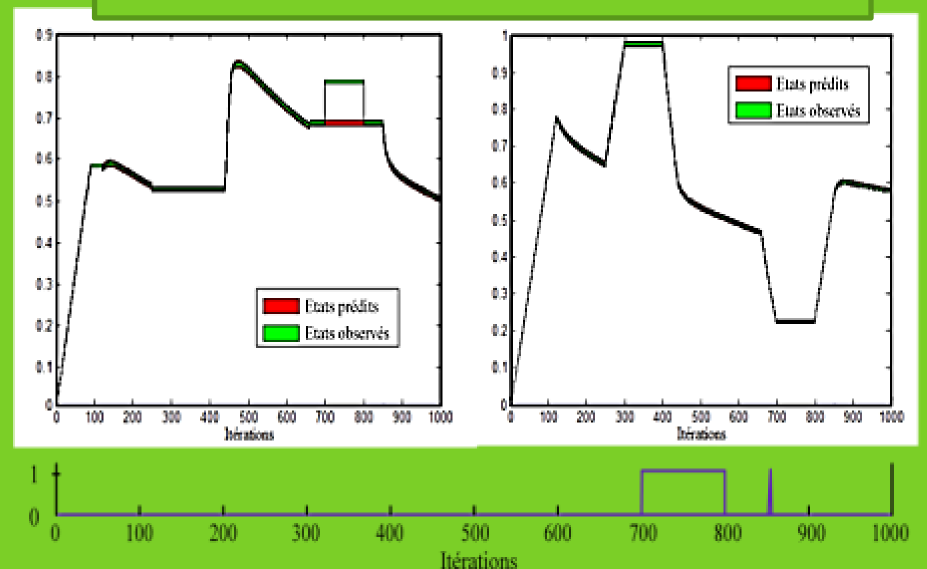
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dfrac{1}{S}\Big(D.P_1 - \alpha_1.V_1\sqrt{x_1} - \alpha_3.V_3.\operatorname{sign}(x_1 - x_2)\sqrt{|x_1 - x_2|} \\ \quad -\alpha_4.V_4.\operatorname{sign}(\max(x_1, 0.5) - \max(x_2, 0.5)). \\ \quad \sqrt{\max(x_1, 0.5) - \max(x_2, 0.5)}\Big) \\ \dot{x}_2 = \dfrac{1}{S}\Big(D.P_2 - \alpha_2.V_2\sqrt{x_2} + \alpha_3.V_3.\operatorname{sign}(x_1 - x_2)\sqrt{|x_1 - x_2|} \\ \quad +\alpha_4.V_4.\operatorname{sign}(\max(x_1, 0.5) - \max(x_2, 0.5)). \\ \quad \sqrt{\max(x_1, 0.5) - \max(x_2, 0.5)}\Big) \end{cases}$$

Résultats de simulation



Incertitudes de modèle de 10%.
Incertitudes de mesure de 2%.
Défaut de type biais de 12%

Niveaux des cuves 1 et 2



Utilisation du sous-pavage pour le système non-linéaire

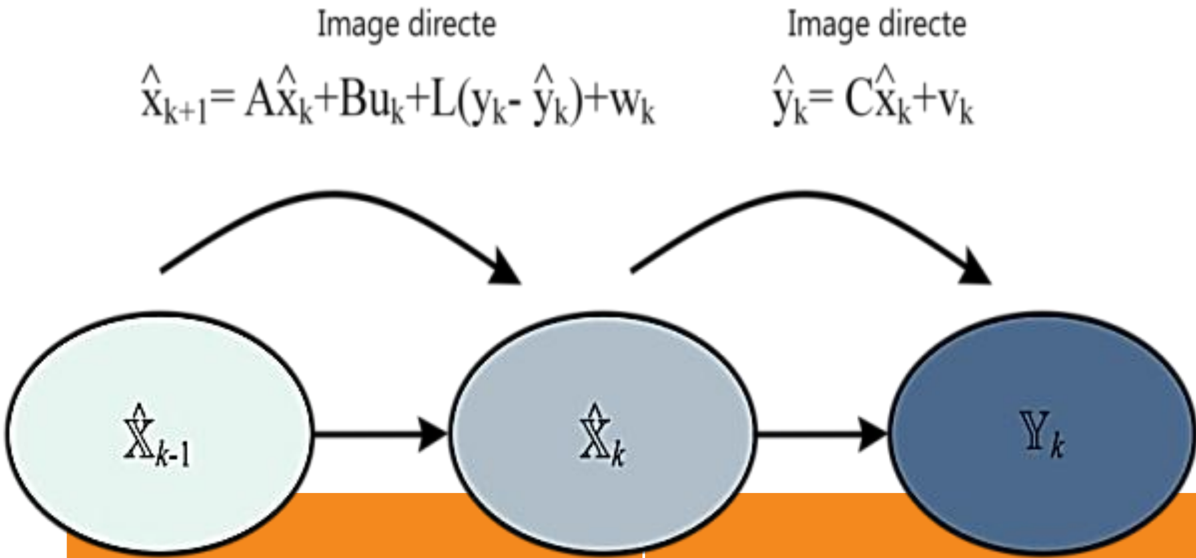
4

Détection robuste des défauts

Observateur de Luenberger Ensembliste

Pourquoi un tel observateur ?

Observateur de Luenberger



		Observateur d’état par retour de sortie
	Reconstruction d’état	Oui
	Banc d’observateurs	Oui
	Effet d’enveloppement	Oui
	Inversion ensembliste	Non

Observateur de Luenberger Ensembliste

- **Soit le système d'équations du système à temps discret suivant :**

$$\begin{cases} x_{k+1} = & g(x_k, u_k, \theta_k) + w_k \\ y_k = & h(x_k, u_k, \theta_k) + v_k \end{cases}$$

- **L'observateur d'état de Luenberger ensembliste est composé des étapes suivantes :**
  - **Prédiction (Ensemble des états prédits)**

$$\mathbb{X}_k^P = \{x_k = g(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) + w_{k-1} | x_{k-1} \in \mathbb{X}_{k-1}^c, \theta_{k-1} \in \Theta, w_{k-1} \in W\}$$

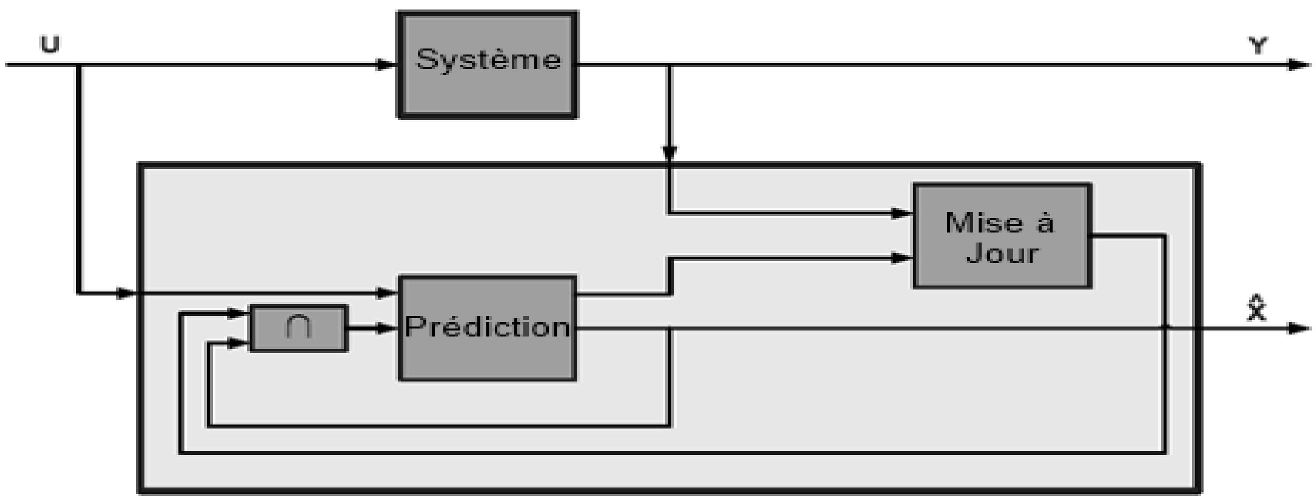
  - **Observation (Ensemble des états consistants)**

$$\mathbb{X}_k^e = \left\{\hat{x}_k : \hat{x}_k(\theta) = x_k^p + L\left(y_k - C(\theta)x_k^p\right) + w_{k-1} \middle| \, x_k^p = \mathrm{mid}\left(\mathbb{X}_k^P\right), \theta \in \Theta, w_{k-1} \in \mathbb{W}_{k-1}\right\}$$

Observateur de Luenberger Ensembliste

– **Correction (Ensemble des états estimés)**

$$\mathbb{X}_k = \mathbb{X}_k^p \cap \mathbb{X}_k^e$$

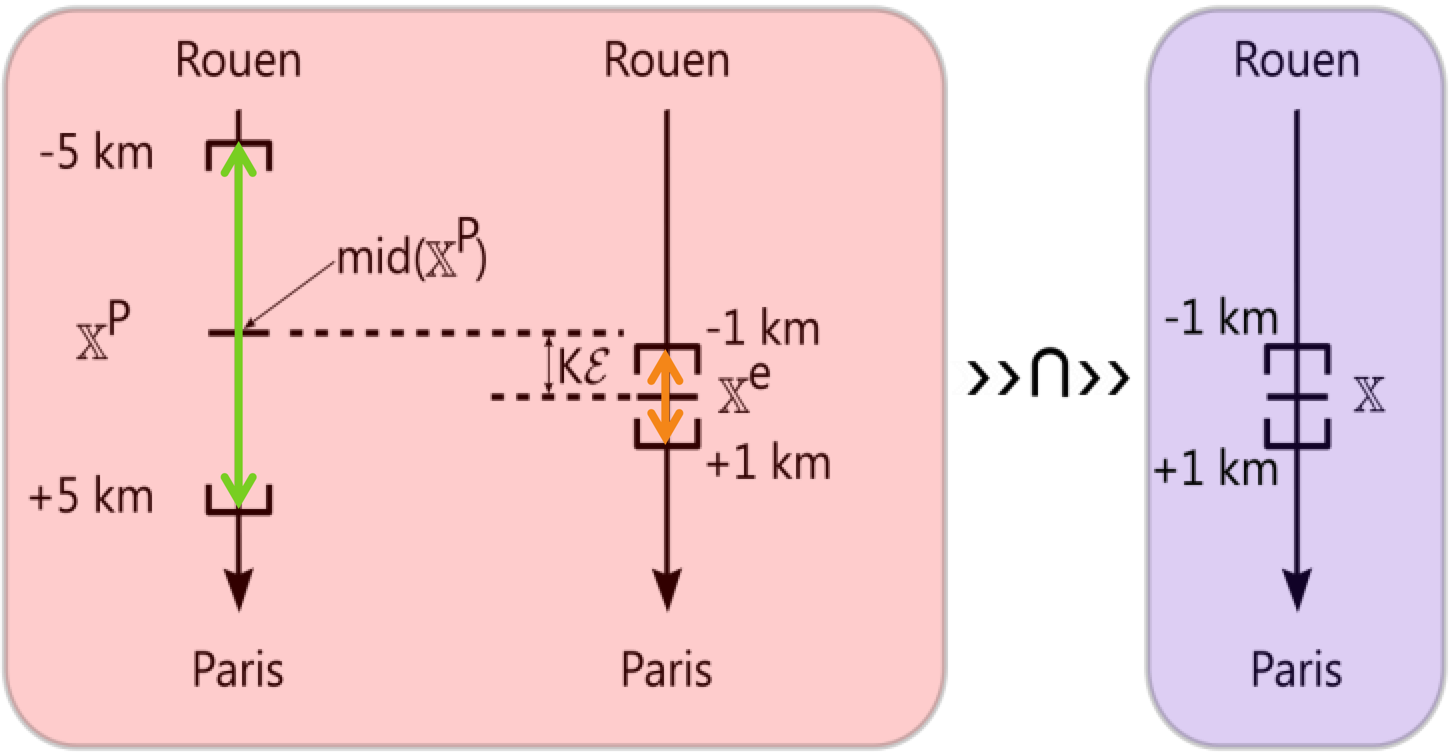


Observateur de Luenberger Ensembliste

- **Détection de défaut**

Défaut détecté $\text{si} \;\; \mathbb{Y}_k^p \cap \mathbb{Y}_k^m = \emptyset$

Principe de Fonctionnement



Prédiction **Observation** **Correction**

Algorithme de détection de défauts

Algorithme

1. $\mathbb{X}_k \Leftarrow \mathbb{X}_0$

Pour $k = 1$ à N faire

2. *Calculer* $\mathbb{Y}_k^m$

3. *Calculer* $\mathbb{X}_k^p$

4. *Calculer* $\mathbb{X}_k^e$

Si $\mathbb{X}_k^p \cap \mathbb{X}_k^e \neq \emptyset$ **alors**

5. $\mathbb{X}_k \Leftarrow \mathbb{X}_k^p \cap \mathbb{X}_k^e$

Sinon

6. $\mathbb{X}_k \Leftarrow mid\,(\mathbb{X}_k^p)$

Fin si

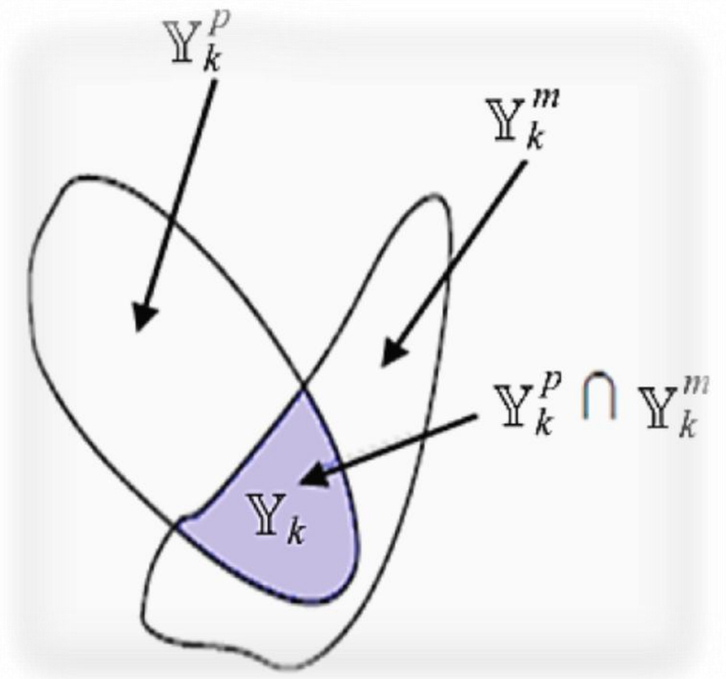
7. *Calculer* $\mathbb{Y}_k^p = C\mathbb{X}_k^p$

Si $\mathbb{Y}_k^p \cap \mathbb{Y}_k^m = \emptyset$ **alors**

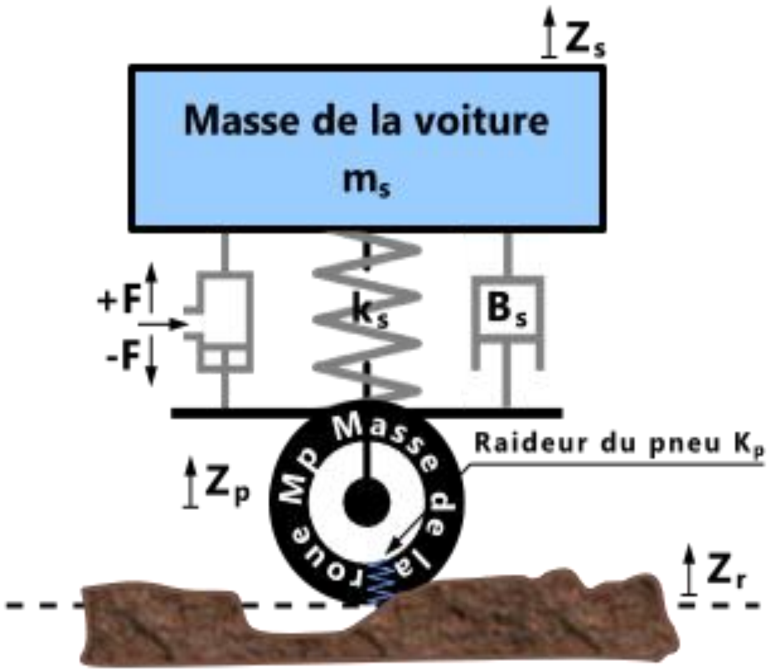
8. $D\acute{e}faut \Leftarrow VRAI$

Fin si

Fin pour



Application à un système de suspension active



$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = & x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = & -\dfrac{K_s}{m_s} x_1(t) - \dfrac{B_s}{m_s} x_2(t) + \dfrac{1}{m_s} u(t) \\ y(t) = & x_1(t) + w(t) \end{cases}$$

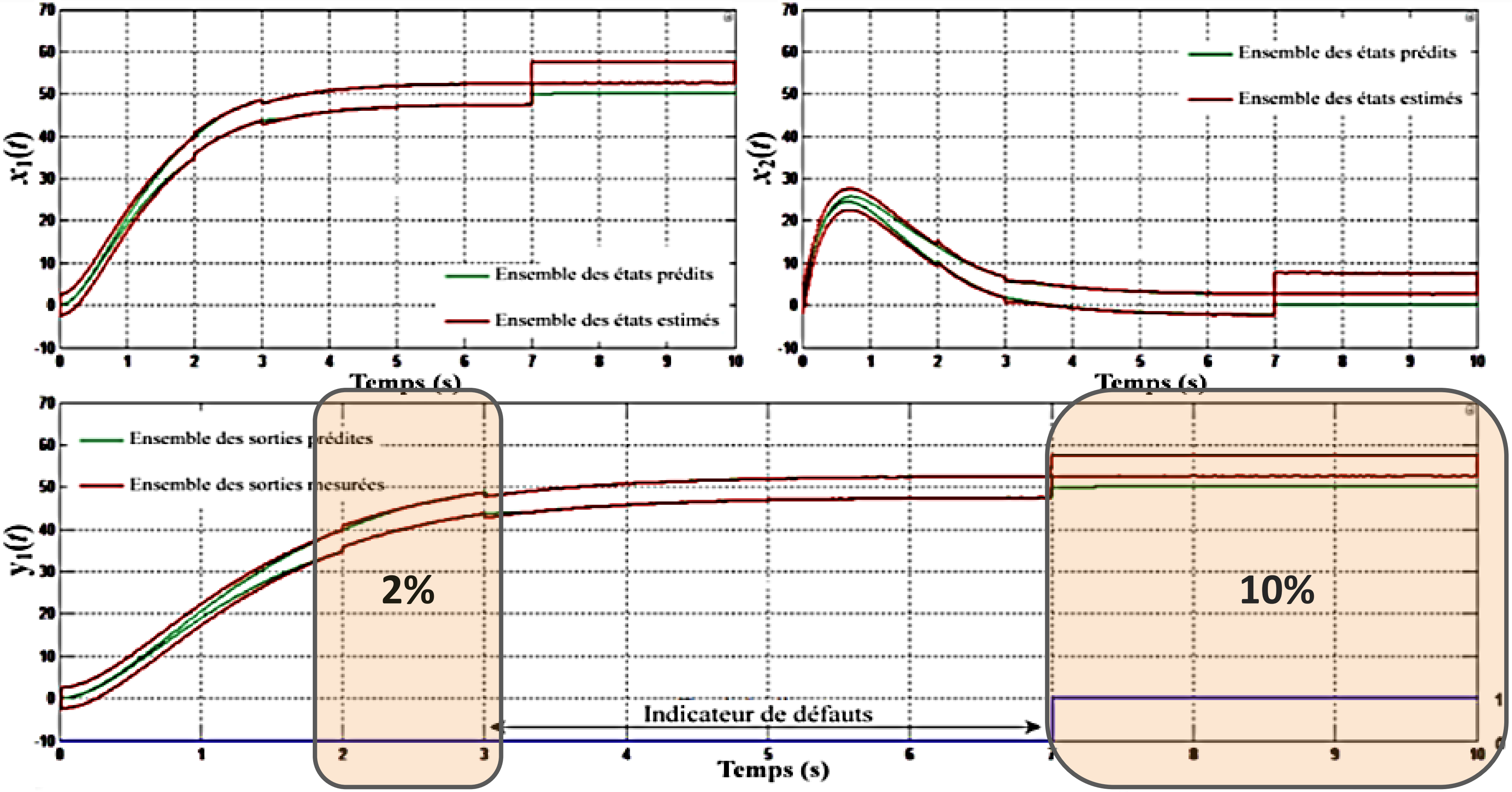
avec $\mathrm{x} = (\mathrm{x}_1 \quad \mathrm{x}_2)^{\mathrm{T}} = (\mathrm{p} \quad \mathrm{v})^{\mathrm{T}}$

Deuxième loi de Newton

$$m_s.\dot{v} = -K_s.p - B_s.v + F \implies \dot{v} = -\frac{K_s}{m_s} \cdot p - \frac{B_s}{m_s} \cdot v + \frac{1}{m_s} \cdot F$$

Résultats de simulation

Incertitudes de modèle de 2%. Incertitudes de mesure de 5%.



Détection de défauts de type biais du système de suspension active

5

Systèmes multimodèles incertains

Plusieurs modèles linéaires incertains

Comment gérer un modèle non-linéaire incertain ?

Multimodèle découplé

- **Considérons les modèles locaux d'un multimodèle M définis par le système d'équations suivant :**

$$\begin{cases} \dot{\mathrm{x}}_i(t) = & \mathrm{A}_i \mathrm{x}_i(t) + \mathrm{B}_i \mathrm{u}(t) \\ \mathrm{y}_i(t) = & \mathrm{C}_i \mathrm{x}_i(t) \end{cases}$$

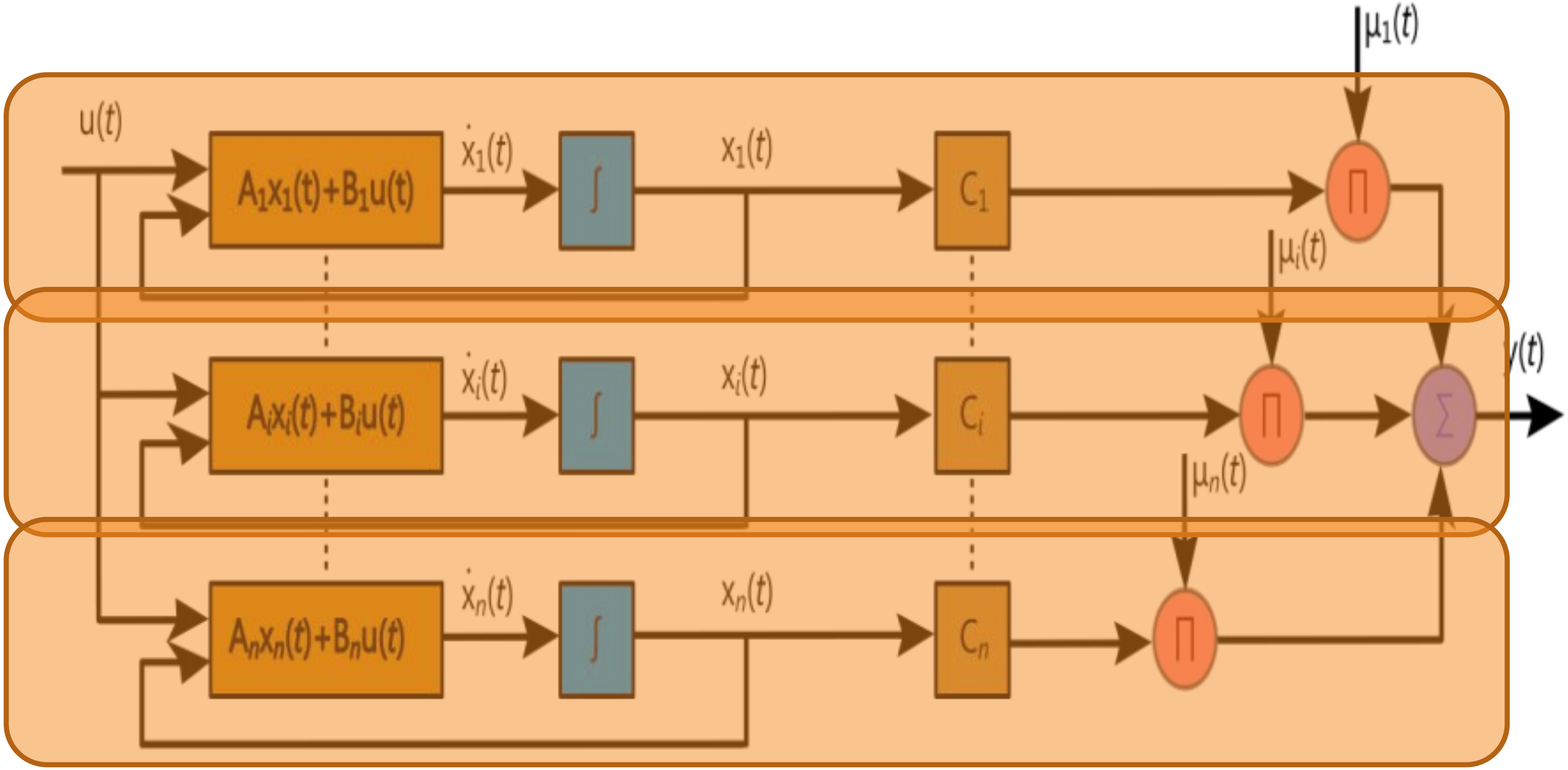
- **La sortie globale du multimodèle est définie de la manière suivante :**

$$\mathrm{y}_m(t) = \sum_{i=1}^{n} \mu_i\big(\xi(t)\big)\mathrm{y}_i(t)$$

- **Le multimodèle (ou modèle global) est donné par :**

$$\begin{cases} \dot{\mathrm{x}}_i(t) = & \mathrm{A}_i \mathrm{x}_i(t) + \mathrm{B}_i \mathrm{u}(t) \\ \mathrm{y}_m(t) = & \displaystyle\sum_{i=1}^{M} \mu_i\big(\xi(t)\big)\big(\mathrm{C}_i \mathrm{x}_i(t)\big) \end{cases}$$

Multimodèle découplé

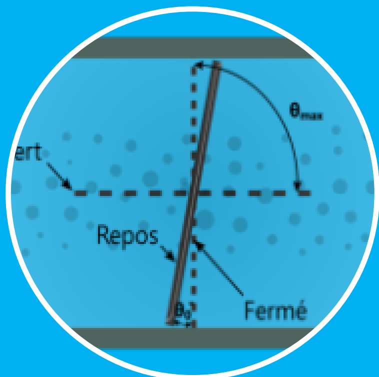


Multimodèle à modèles locaux découplés

Application à un papillon motorisé

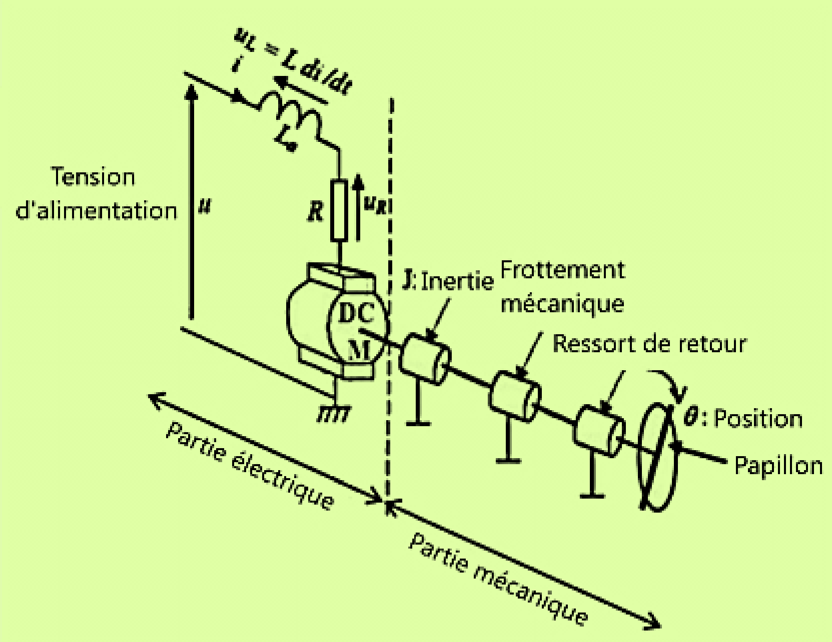
Moteur essence

Papillon motorisé



Positions

Modèle du papillon motorisé



Structure physique du papillon motorisé

$\boldsymbol{\alpha} = -\frac{D}{nJ}$ et $\boldsymbol{\mu} = -\frac{f_c}{nJ}$

$\boldsymbol{n}$: rapport de vitesse entre le moteur et le papillon ;

$\boldsymbol{k_r}$: raideur du ressort ;

$\boldsymbol{J}$: inertie ;

$\boldsymbol{f_v}$ et $\boldsymbol{f_c}$: coefficients de frottements constants ;

$\boldsymbol{K}$: constante ;

$\boldsymbol{D}$: constante ;

$\boldsymbol{L}$: inductance de l'induit ;

$\boldsymbol{R}$: résistance de l'induit ;

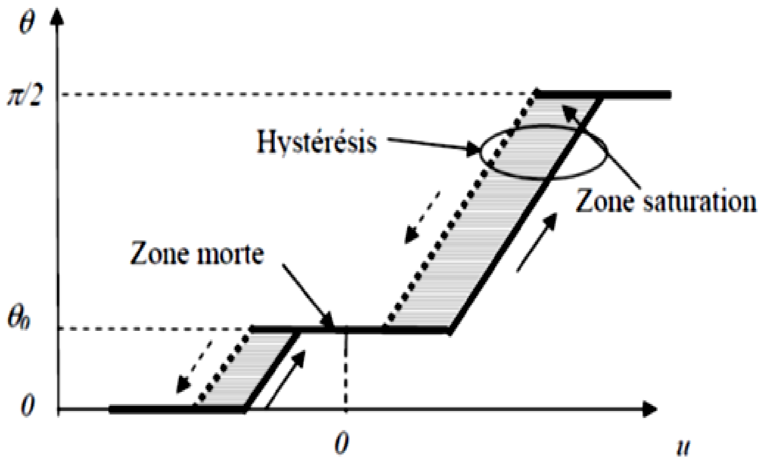
$\boldsymbol{k}$: force électromotrice *f.é.m.*

Papillon motorisé :

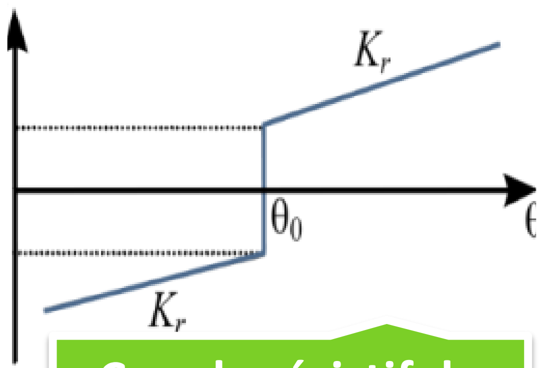
$$\begin{cases} \dot{\theta} = nw \\ \dot{w} = -\frac{k_r}{nJ}\theta - \frac{f_v}{J}w + \frac{K}{nJ}i + \alpha.\,\mathrm{sign}(\theta) + \mu.\,\mathrm{sign}(w) \\ i = -\frac{k}{L}w - \frac{R}{L}i + \frac{1}{L}u \\ y = \theta \end{cases}$$

Problème des non-linéarités

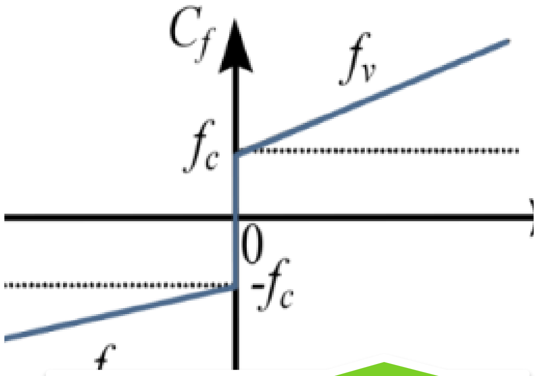
- **Non-linéarités structurelles :**



- **Non-linéarités des paramètres :**



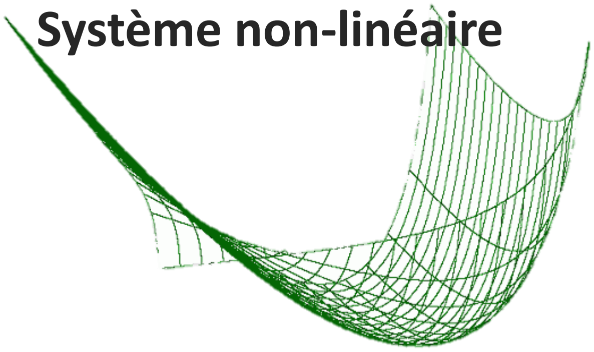
Couple résistif du ressort

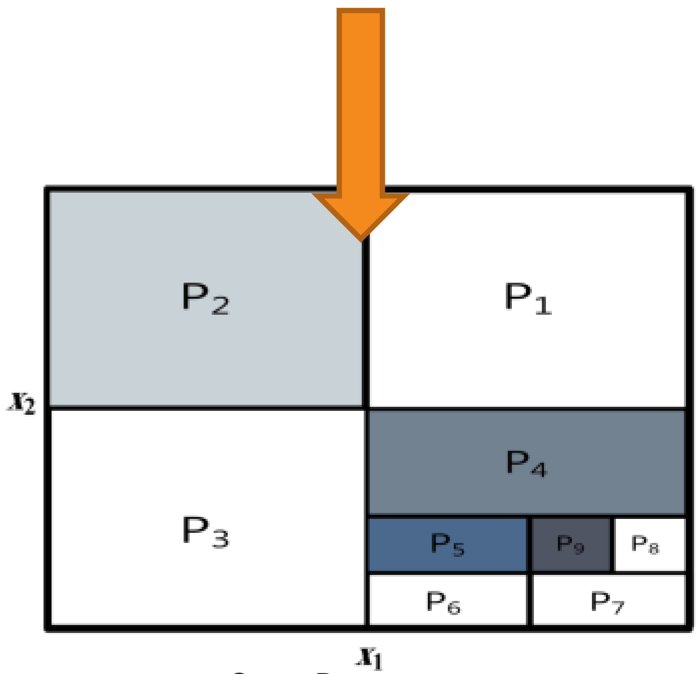


Couple de frottement

Intérêt des multimodèles incertains

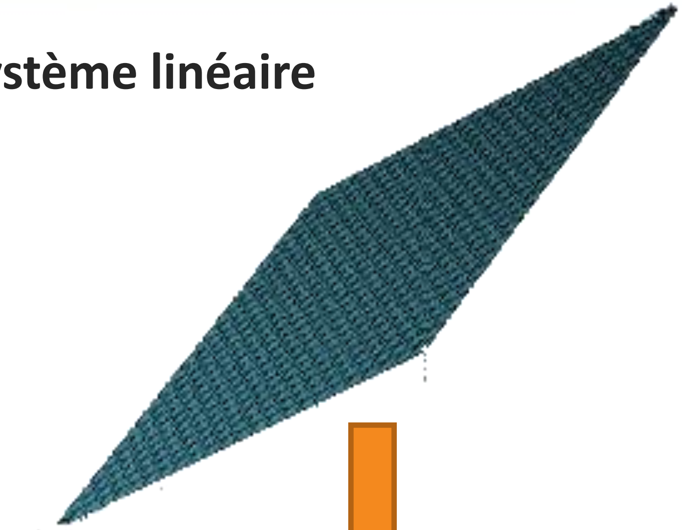
Système non-linéaire

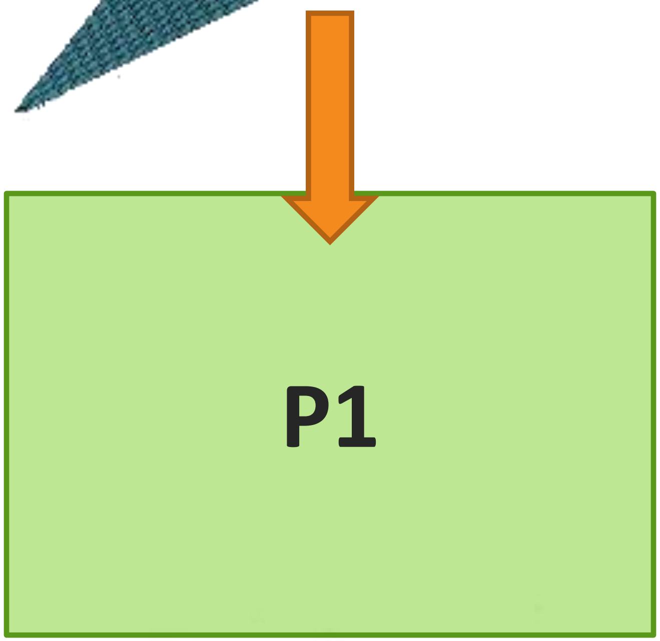




Sous-Pavage

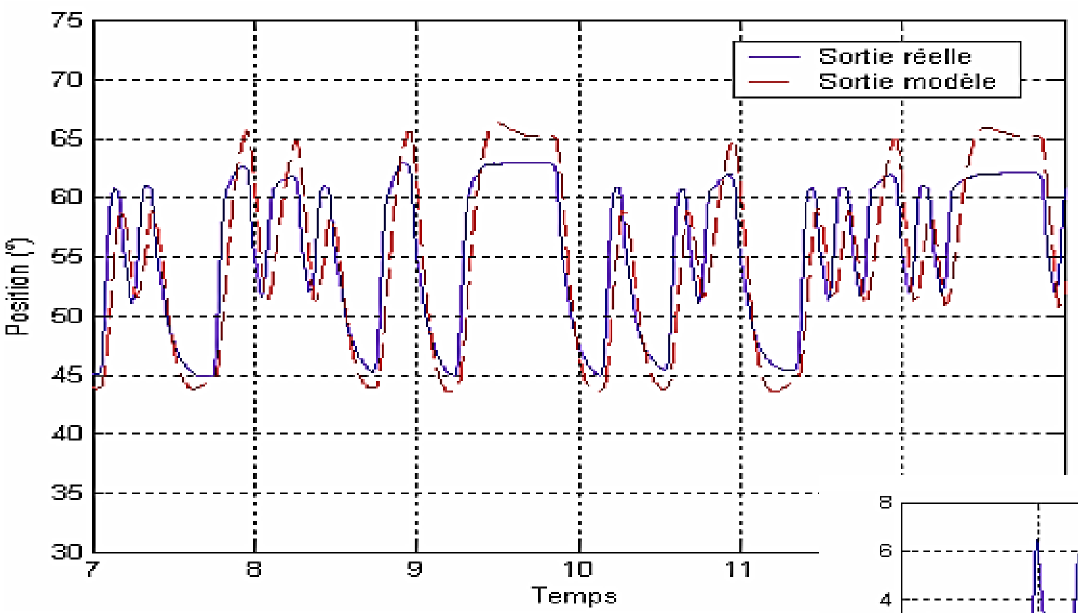
Système linéaire



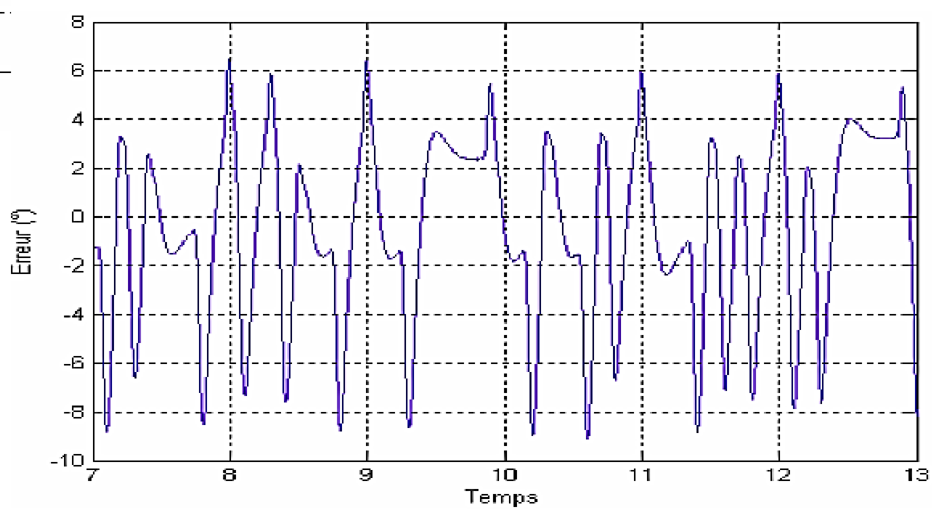


Pavé unique

Travaux précédents



Identification paramétrique [LEBBAL 2006]



Erreur entre la sortie réelle et celle du multimodèle [LEBBAL 2006]

Diagramme de phase de sortie

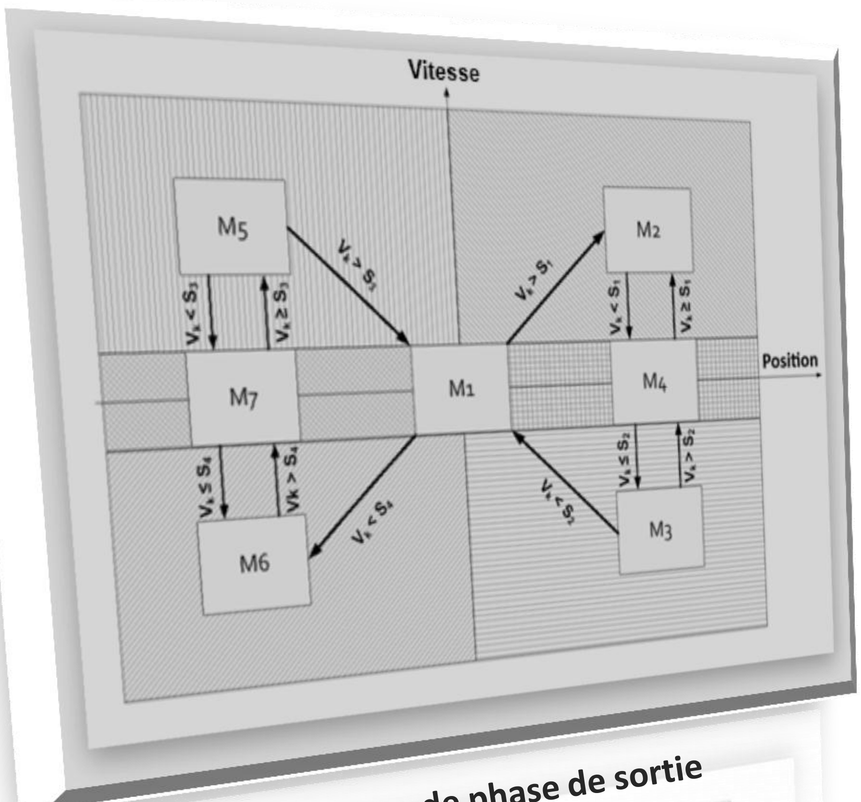
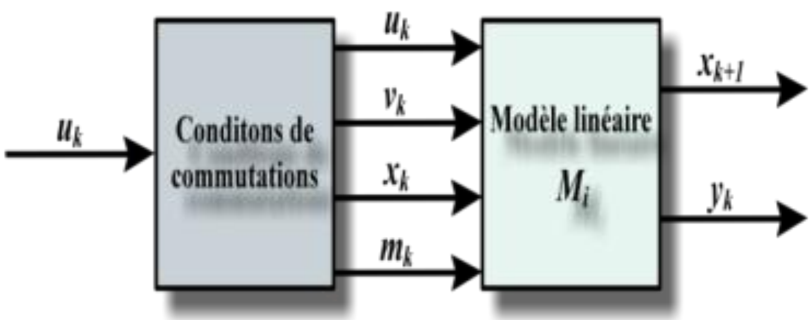


Diagramme de phase de sortie

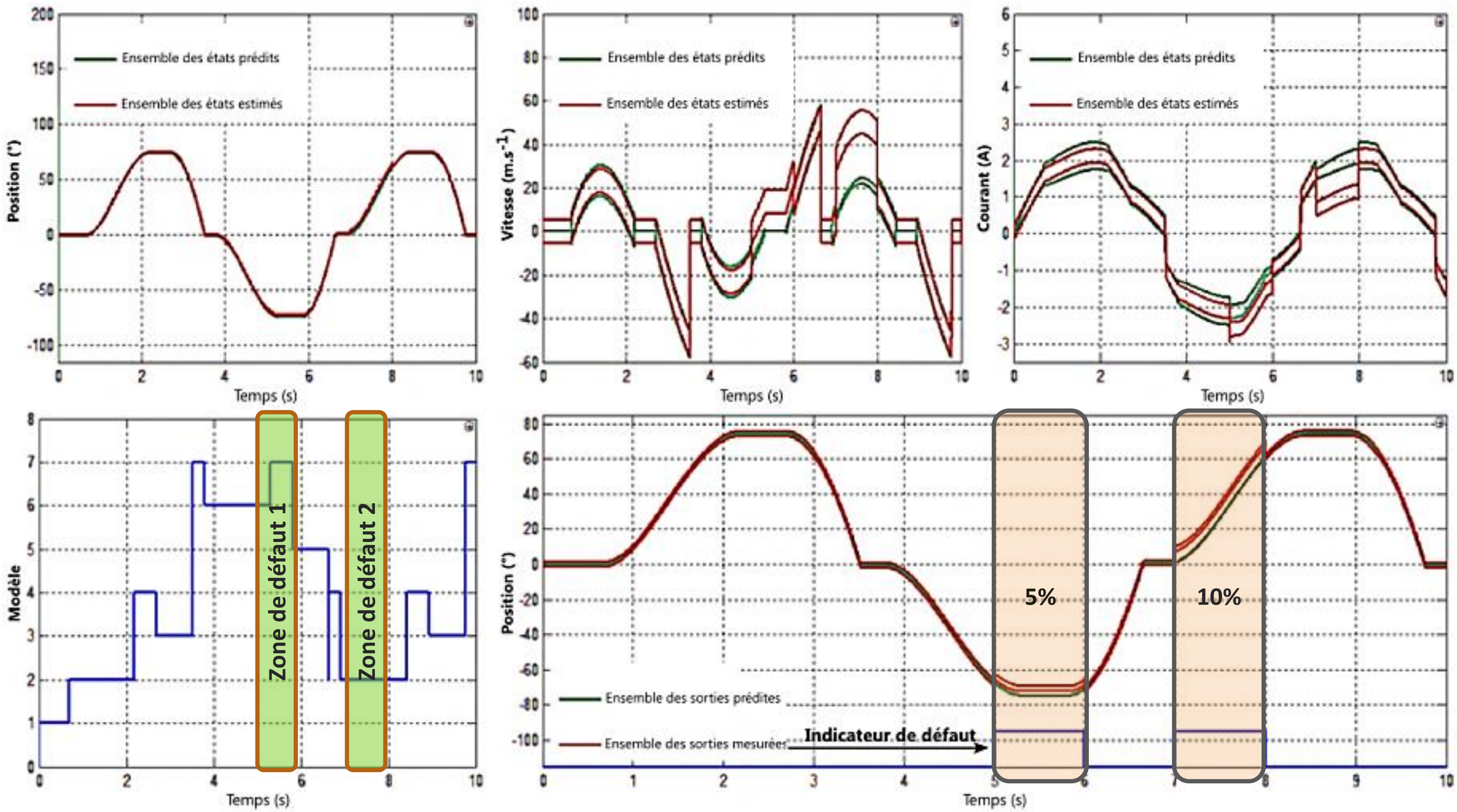


Conditions de commutations

$$S_1 = -\alpha - \mu\,;\; S_2 = -\alpha + \mu$$
$$S_3 = \alpha - \mu\,;\; S_4 = \alpha + \mu$$

$$v(k) = \frac{ad_{21}x_1(k) + ad_{22}x_2(k) + ad_{23}x_3(k) + \ bd_{21}u(k)}{-bd_{22}}$$

Résultats de simulation



Estimation et détection de défaut du papillon motorisé

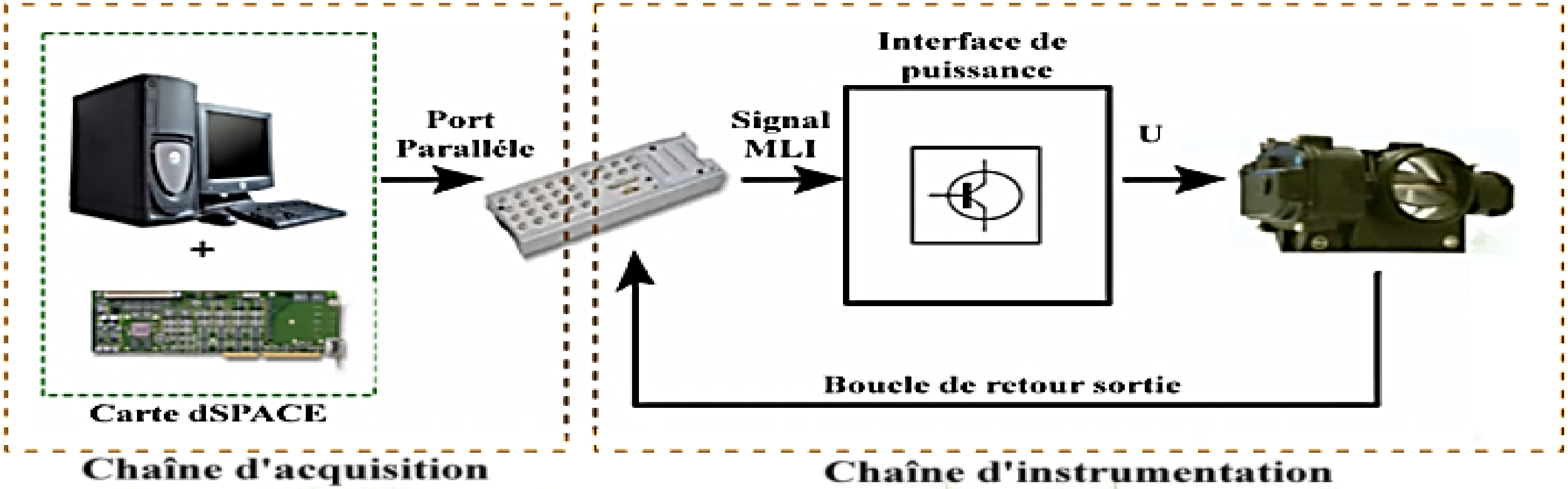
6

Application à l’automobile

Simulation temps-réel

Comment les approches proposées se comportent en temps-réel ?

Le banc d'essais

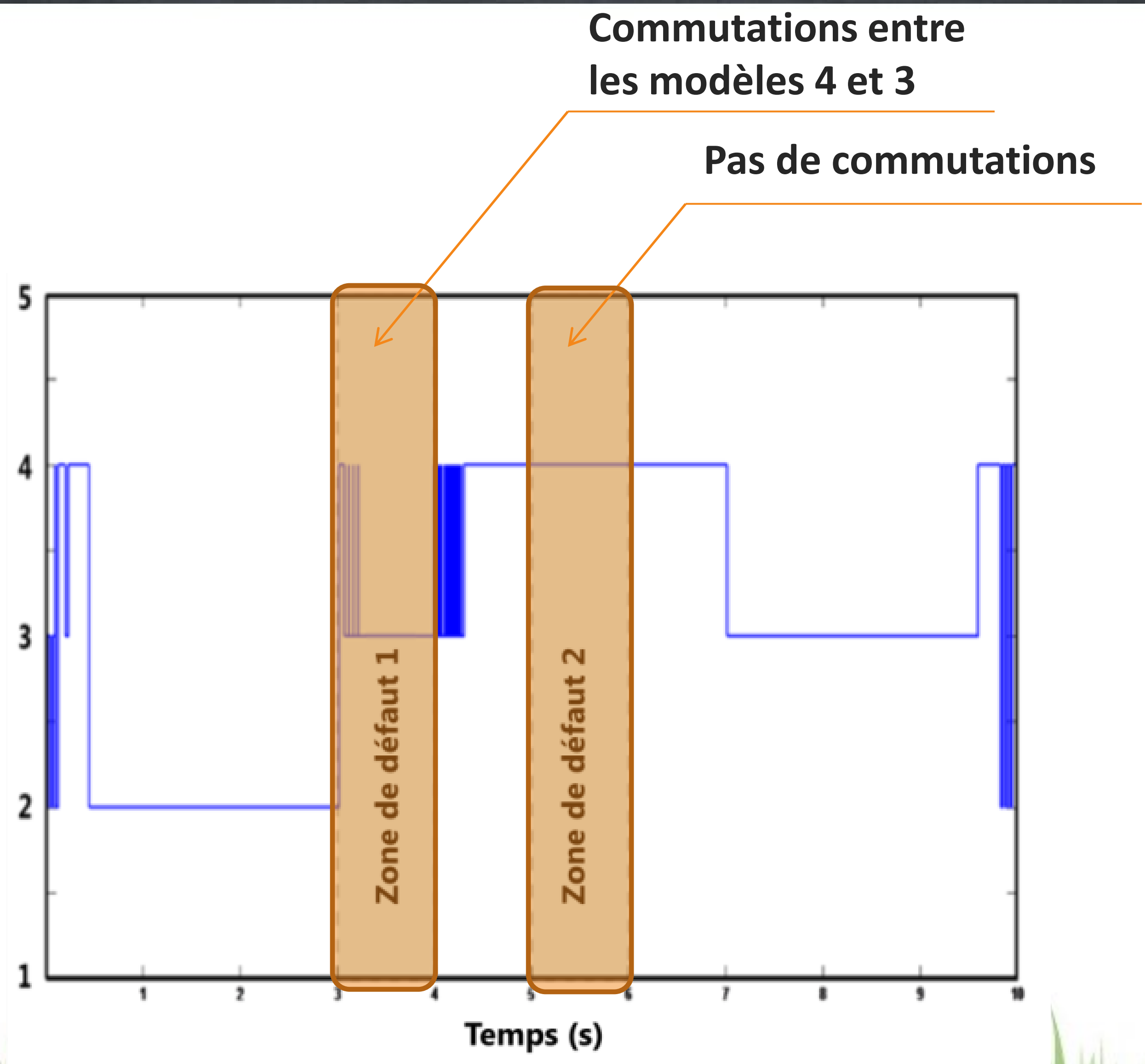


Scénarios de défauts

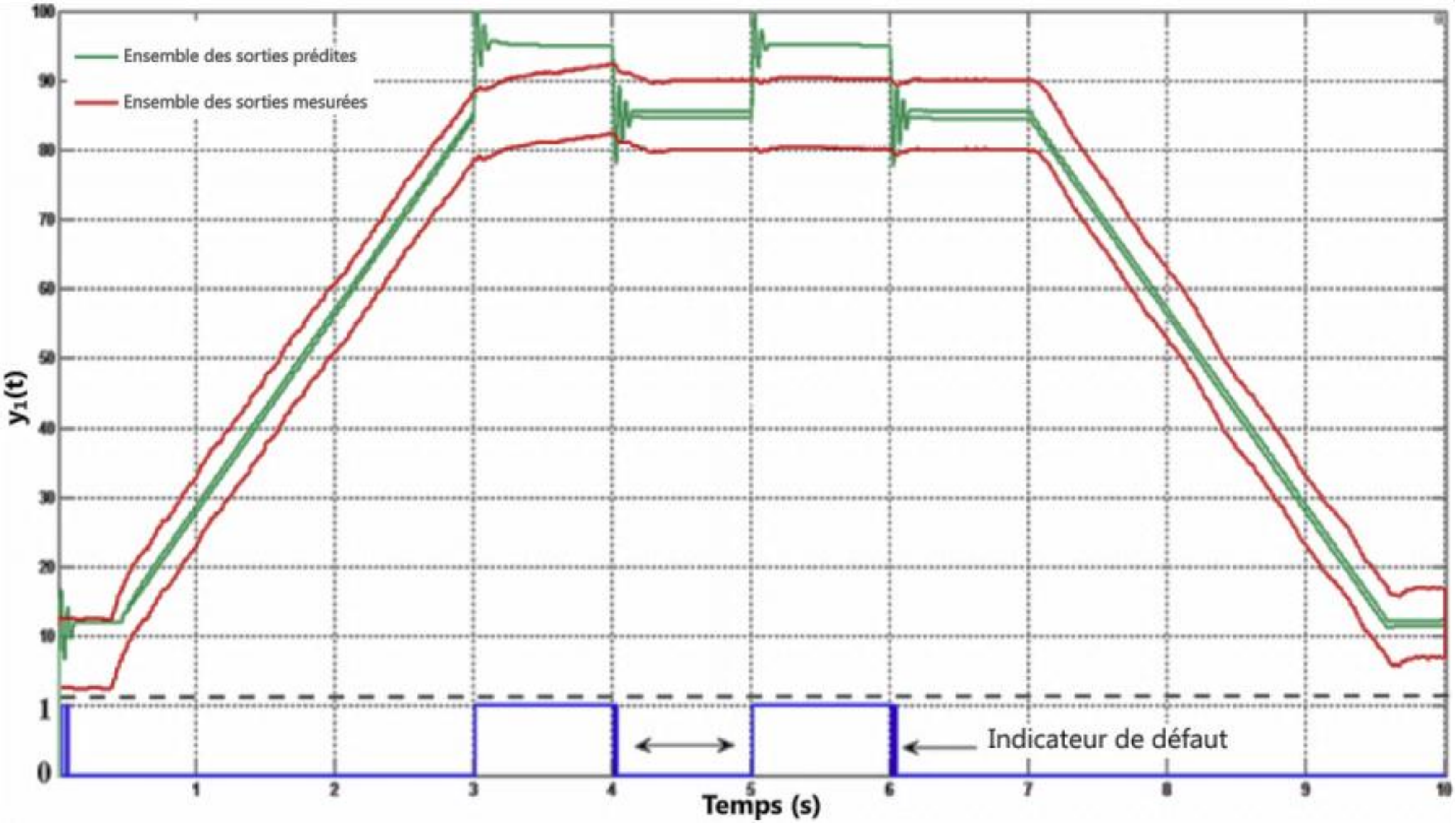
- **Défaut actionneur**
  – Défaut de type biais de $+10\%$ sur l'actionneur
- **Défaut système**
  – Le papillon se bloque pendant la séquence d'ouverture
- **Défaut capteur**
  – Défaut de type biais de $+10\%$ sur la sortie mesurée

- **Incertitudes**
  – $\pm 5\%$ sur tous les paramètres de la matrice A et B
  – $\pm 5\%$ sur la sortie mesurée

Zones de défauts

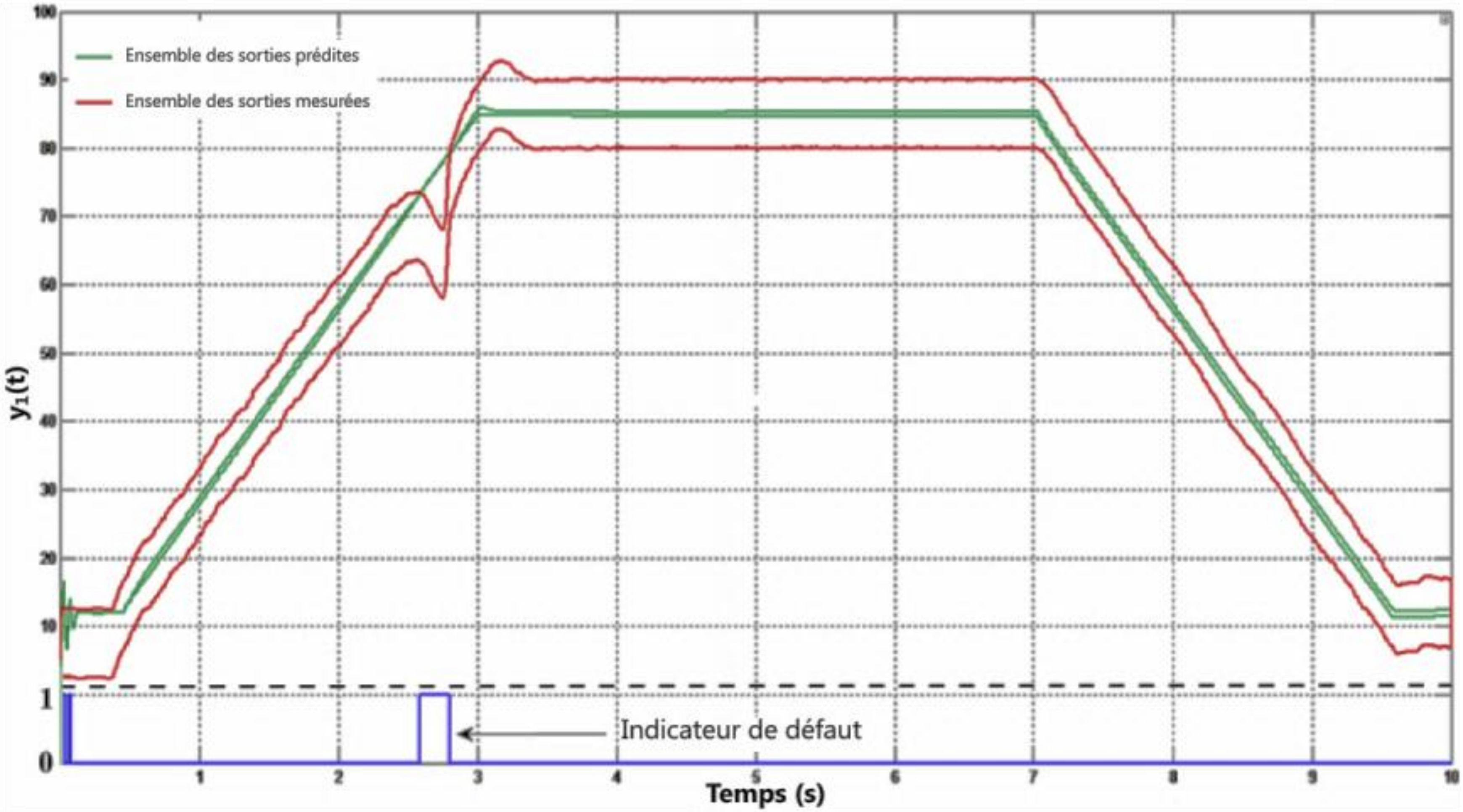


Résultats de simulation temps-réel



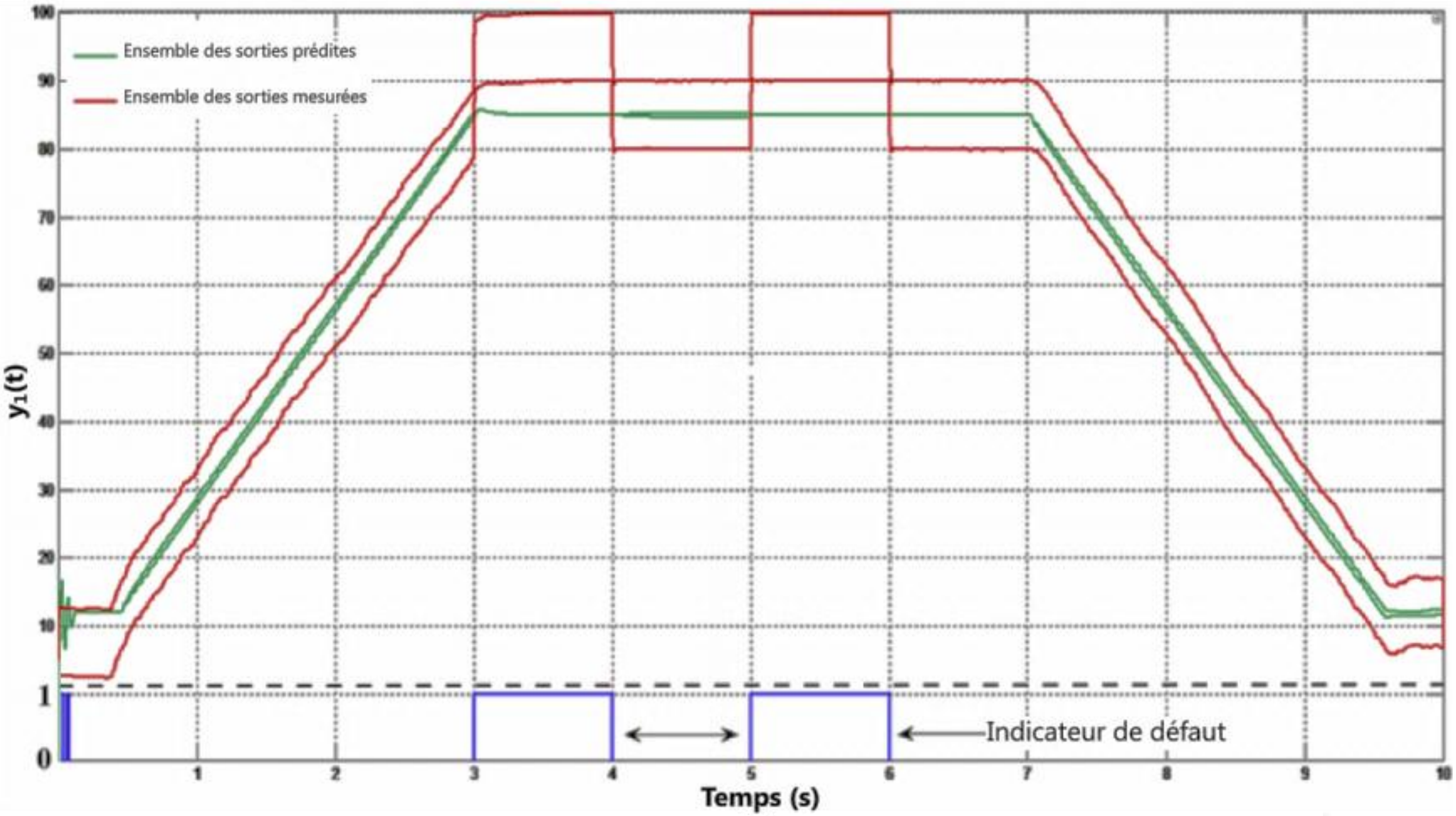
Détection de défauts d'actionneur en temps-réel

Résultats de simulation temps-réel



Détection de défauts de système en temps-réel

Résultats de simulation temps-réel



Détection de défauts de capteur en temps-réel

Conclusion &
Perspectives

Conclusion & Perspectives

Quels est l'apport et le devenir de ces approches ?

Conclusion & Perspectives

Conclusion

- **Observateur de Luenberger Ensembliste**
  - Prend en compte les incertitudes du modèle et de mesure
  - Évite l’effet d’enveloppement
  - Permet de reconstruire les états en cas de capteurs manquants
- **Approche multimodèle des systèmes incertains**
  - Décompose un modèle non-linéaire en plusieurs modèles linéaires qui commutent
  - Évite l’utilisation de sous-pavage (nécessaire dans le cas non-linéaire)
  - Prend en compte la méconnaissance des valeurs exactes des paramètres sous forme de tolérances

Perspectives

- **Détection de défauts simultanés**
- **Isolation des défauts**
  - Banc d’Observateurs de Luenberger Ensembliste

THE END

Merci de votre attention