

# Détection de l'encrassement

## Echangeurs thermiques et multi-fonctionnels : enjeux, applications et axes de recherche.

Sylvain LALOT  
sylvain.lalot@univ-valenciennes.fr

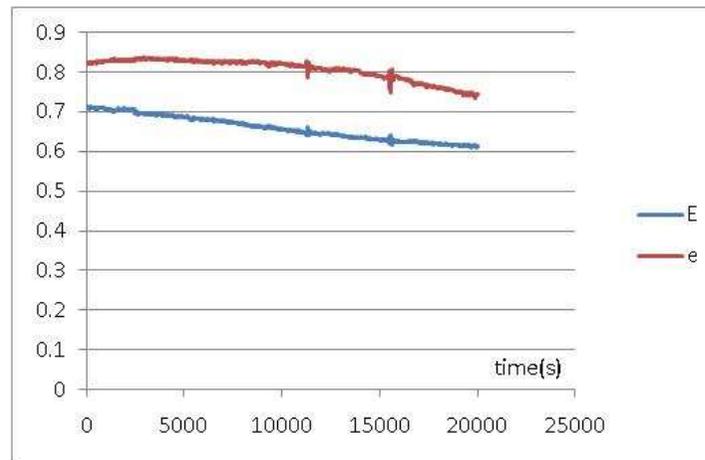


**Société Française de Thermique**

16 mars 2011

# Introduction

- En régime permanent, l'encrassement peut être détecté par la simple analyse de la variation de l'efficacité.



Données issues d'essais menés par l'INRA (centre de Villeneuve d'Ascq)

# Introduction

- Le test qui sera utilisé quasiment systématiquement est le test du Cusum.

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc323.htm>

The following quantities are calculated:

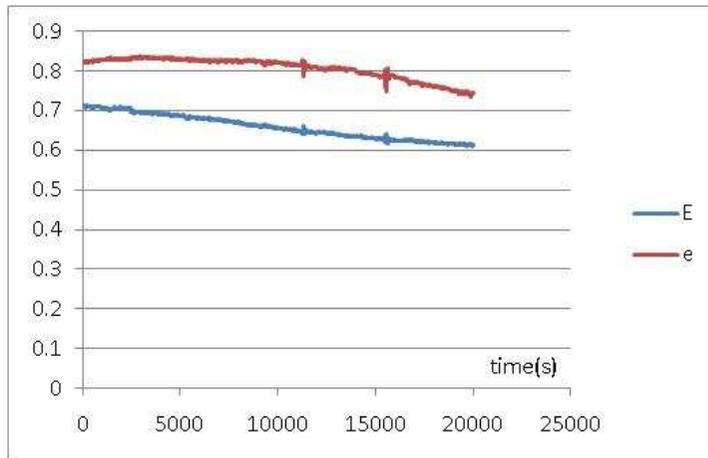
$$S_{hi}(i) = \max(0, S_{hi}(i-1) + x_i - \hat{\mu}_0 - k)$$

$$S_{lo}(i) = \max(0, S_{lo}(i-1) + \hat{\mu}_0 - k - x_i)$$

where  $S_{hi}(0)$  and  $S_{lo}(0)$  are 0. When either  $S_{hi}(i)$  or  $S_{lo}(i)$  exceeds  $h$ , the process is out of control.

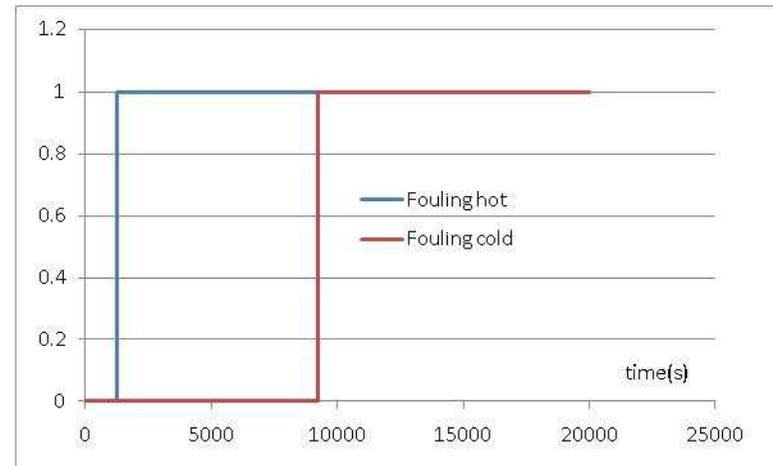
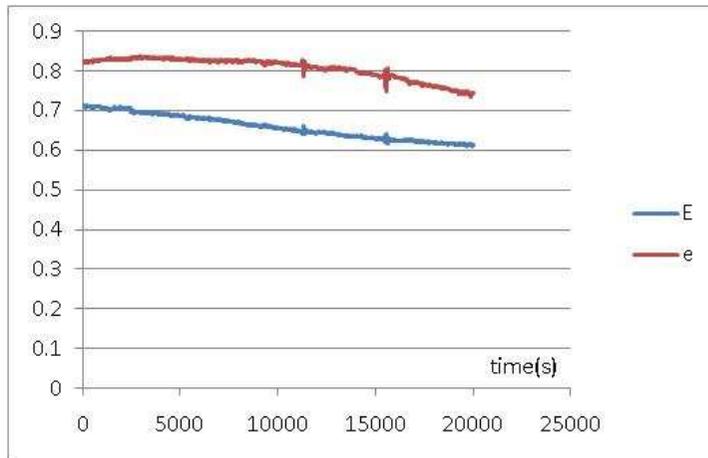
# Introduction

- L'application aux courbes d'efficacité mène à une détection rapide.



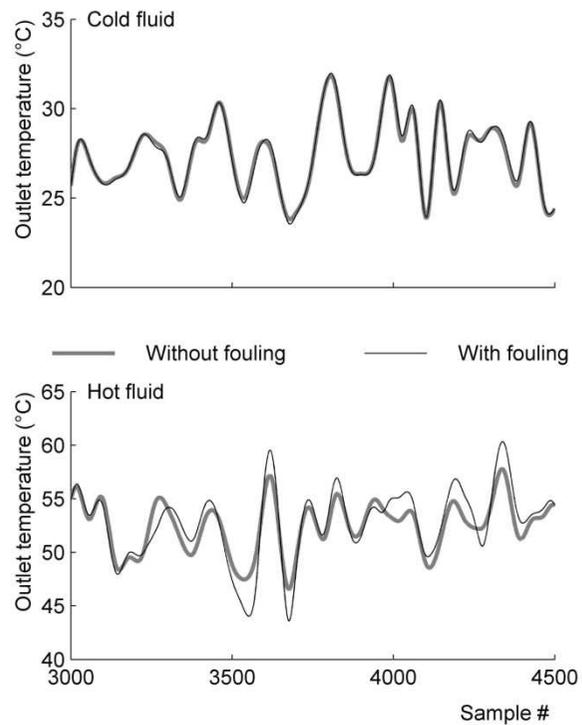
# Introduction

- L'application aux courbes d'efficacité mène à une détection rapide.



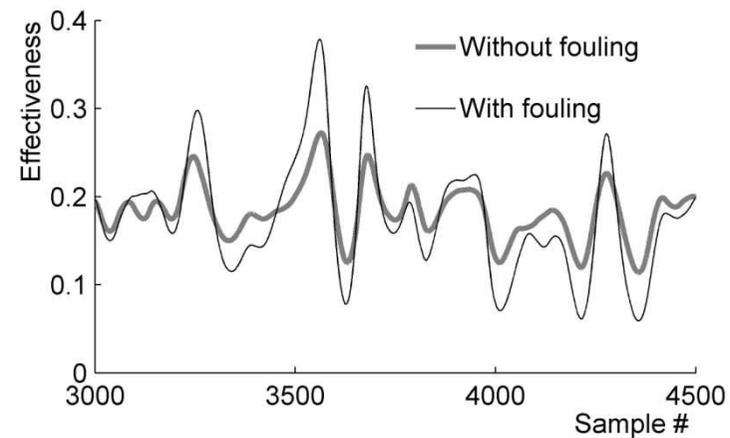
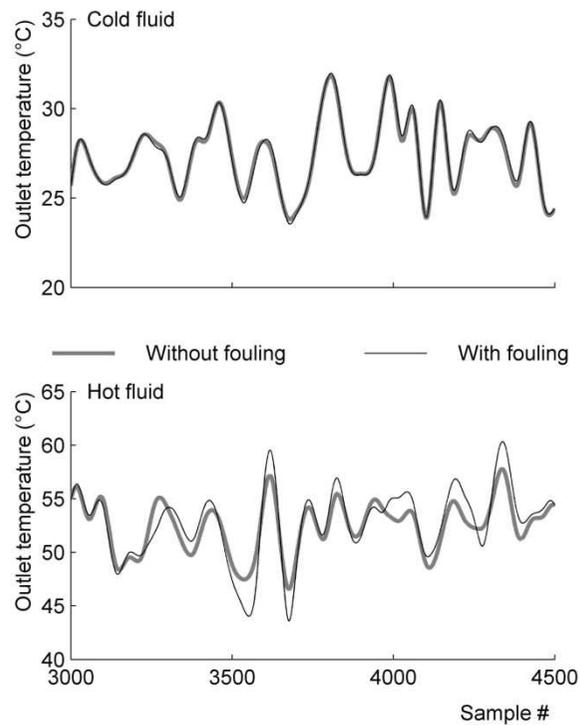
# Introduction

- Le problème est bien plus complexe en régime transitoire.



# Introduction

- Le problème est bien plus complexe en régime transitoire.

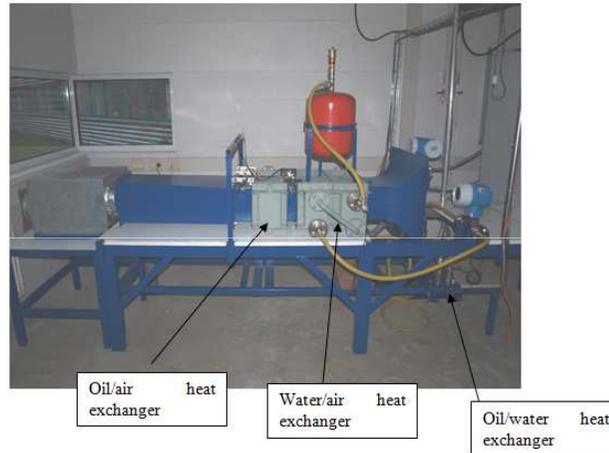


# Les différents outils d'analyse

- Les techniques suivantes ont été testées:
  - Réseaux de neurones
  - Filtres de Kalman étendus
  - Observateurs flous
  - Méthode des sous-espaces récursive

# Les données analysées

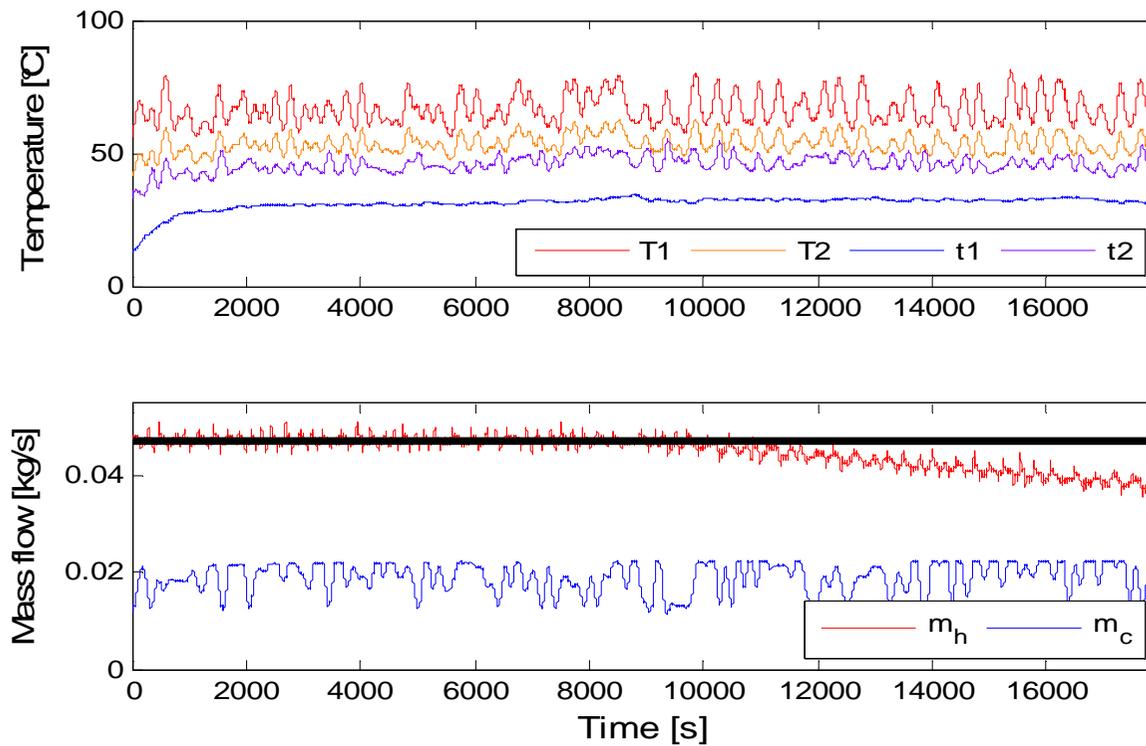
- Une boucle d'essais a été construite.



- Des simulateurs ont été développés

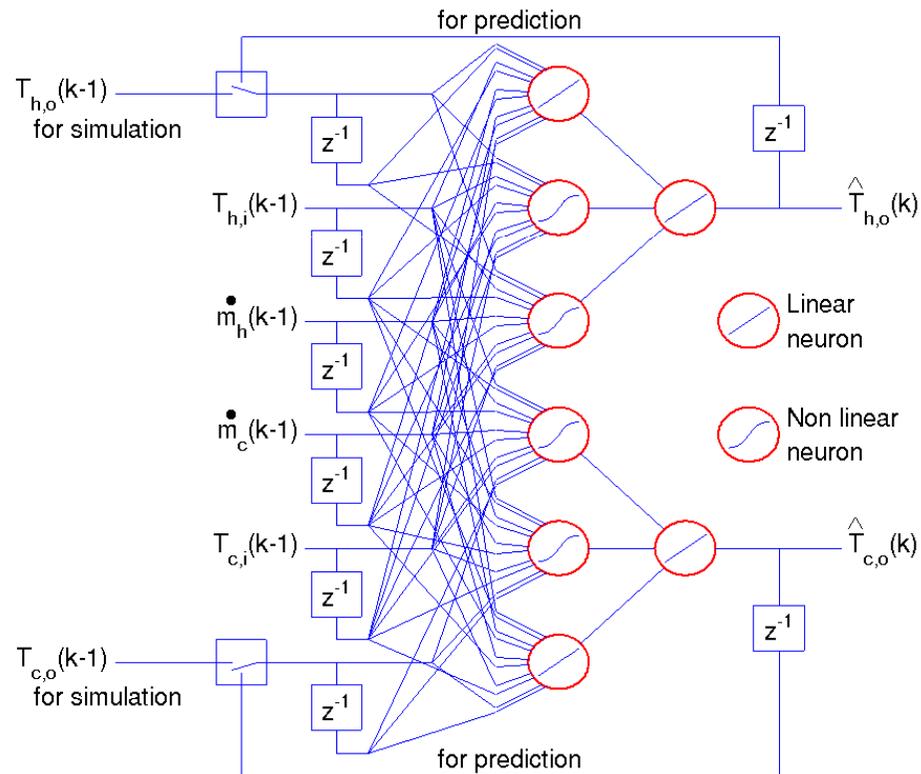
# Les réseaux de neurones

- Les données traitées:



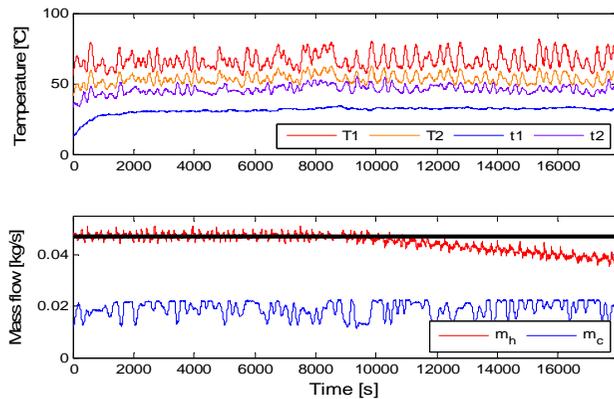
# Les réseaux de neurones

- Un exemple d'architecture:



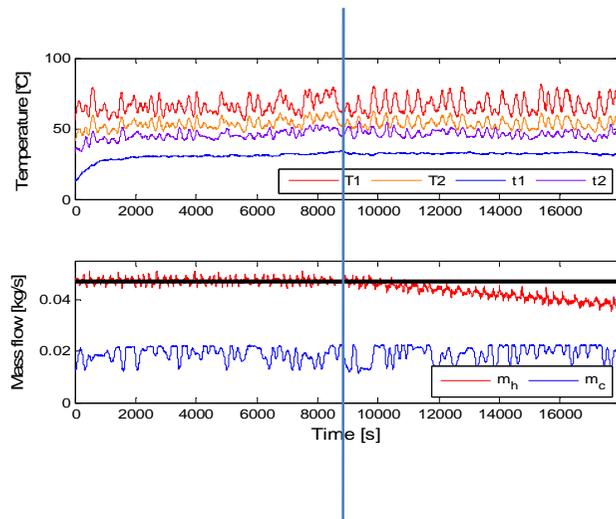
# Les réseaux de neurones

- La différence entre une sortie estimée et la valeur du procédé est analysée par le test du Cusum.



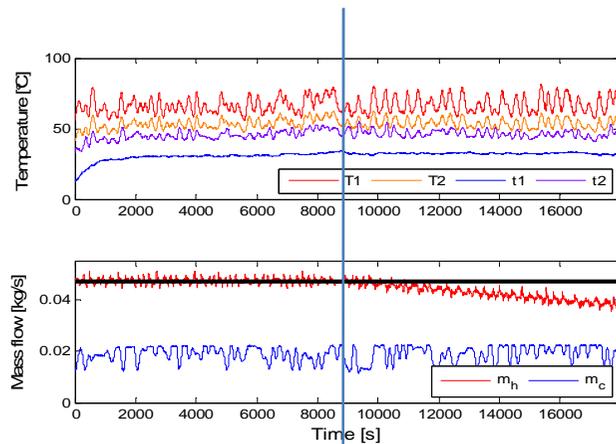
# Les réseaux de neurones

- La différence entre une sortie estimée et la valeur du procédé est analysée par le test du Cusum.



# Les réseaux de neurones

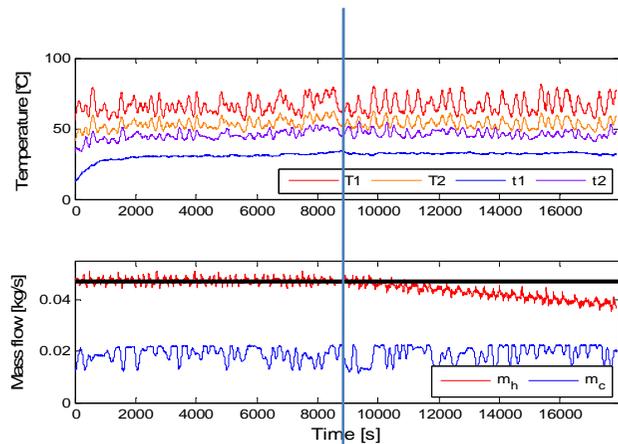
- La différence entre une sortie estimée et la valeur du procédé est analysée par le test du Cusum.



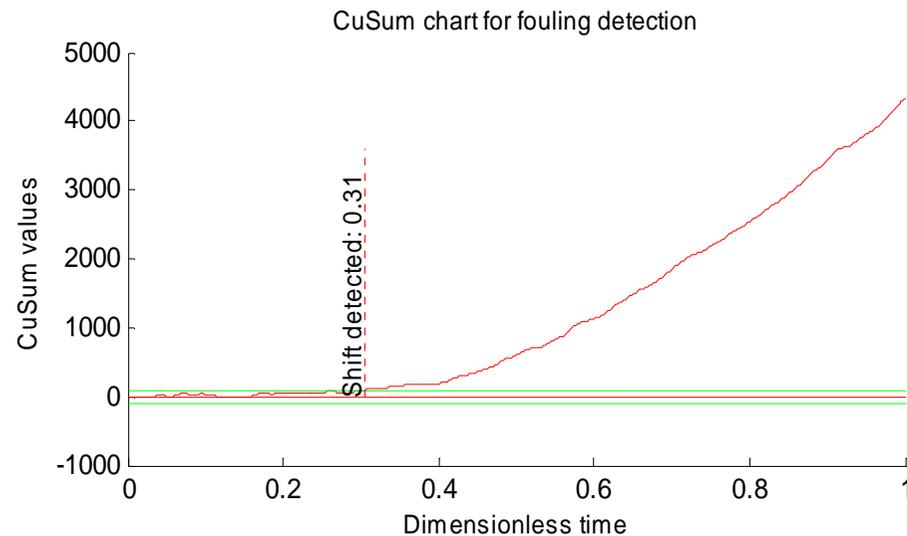
←  
Période propre utilisée  
pour calculer l'écart-type  
de la différence

# Les réseaux de neurones

- La différence entre une sortie estimée et la valeur du procédé est analysée par le test du Cusum.

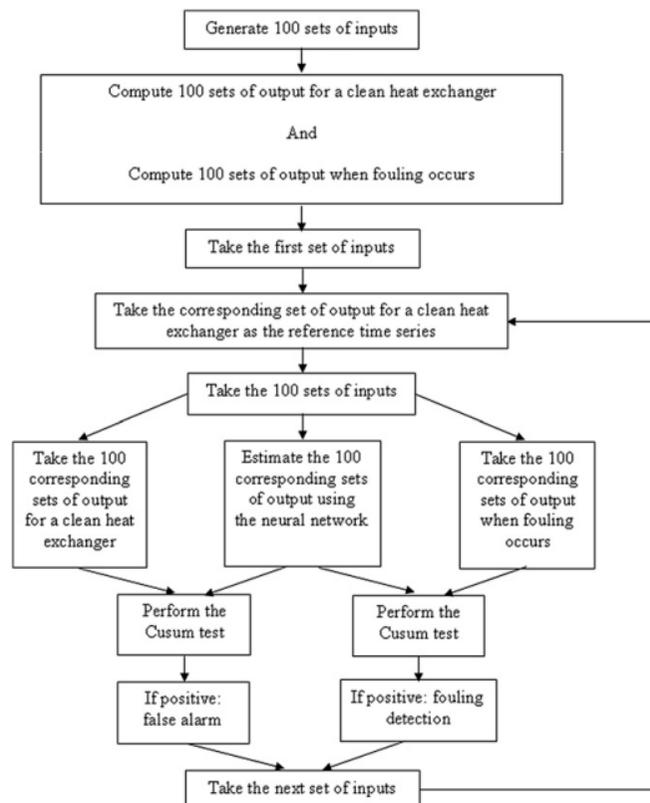


← Période propre utilisée pour calculer l'écart-type de la différence



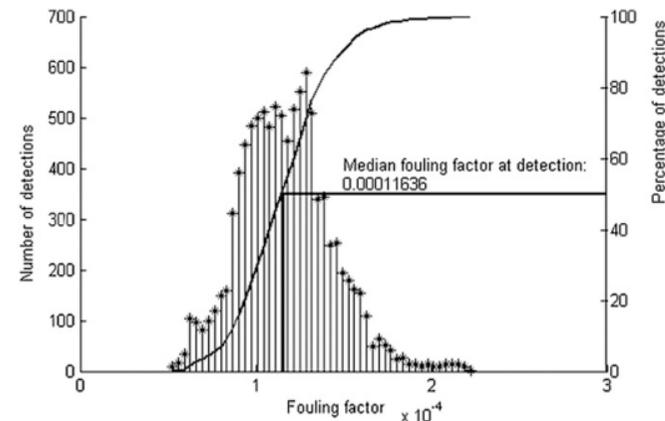
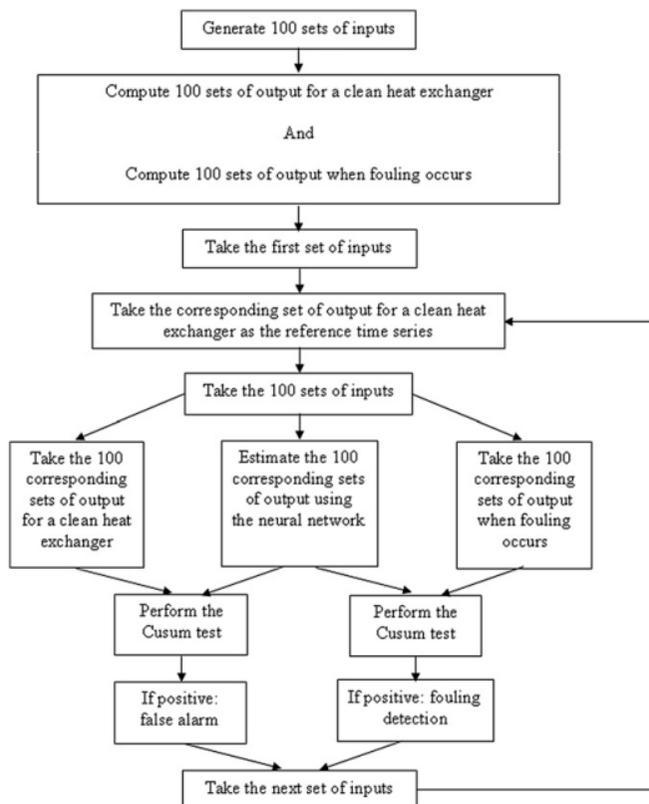
# Les réseaux de neurones

- A partir de données simulées, les résultats sont également bons.



# Les réseaux de neurones

- A partir de données simulées, les résultats sont également bons.



Detection of fouling in a cross-flow heat exchanger using a neural network based technique  
International Journal of Thermal Sciences, Volume 49, Issue 4, April 2010, Pages 675-679  
Sylvain Lalot, Halldór Pálsson

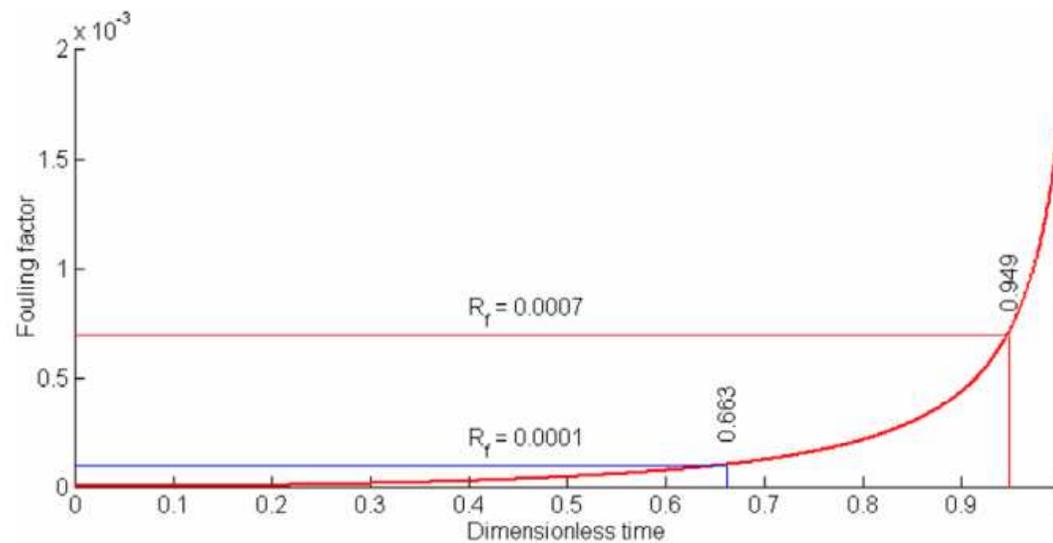
# Les filtres de Kalman

- Les équations régissant le régime transitoire d'un échangeur peuvent être représentées sous la forme (ici pour deux « sections »):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{h,1} \\ T_{h,2} \\ T_{c,1} \\ T_{c,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1 + \frac{\alpha}{2})/\tau_h & 0 & \frac{\alpha}{2\tau_h} & \frac{\alpha}{2\tau_h} \\ (1 - \frac{\alpha}{2})/\tau_h & -(1 + \frac{\alpha}{2})/\tau_h & \frac{\alpha}{2\tau_h} & 0 \\ \frac{\beta}{2\tau_c} & \frac{\beta}{2\tau_c} & -(1 + \frac{\beta}{2})/\tau_c & 0 \\ \frac{\beta}{2\tau_c} & 0 & (1 - \frac{\beta}{2})/\tau_c & -(1 + \frac{\beta}{2})/\tau_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{h,1} \\ T_{h,2} \\ T_{c,1} \\ T_{c,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1 - \frac{\alpha}{2})/\tau_h & 0 \\ 0 & \frac{\alpha}{2\tau_h} \\ 0 & (1 - \frac{\beta}{2})/\tau_c \\ \frac{\beta}{2\tau_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{h,in} \\ T_{c,in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

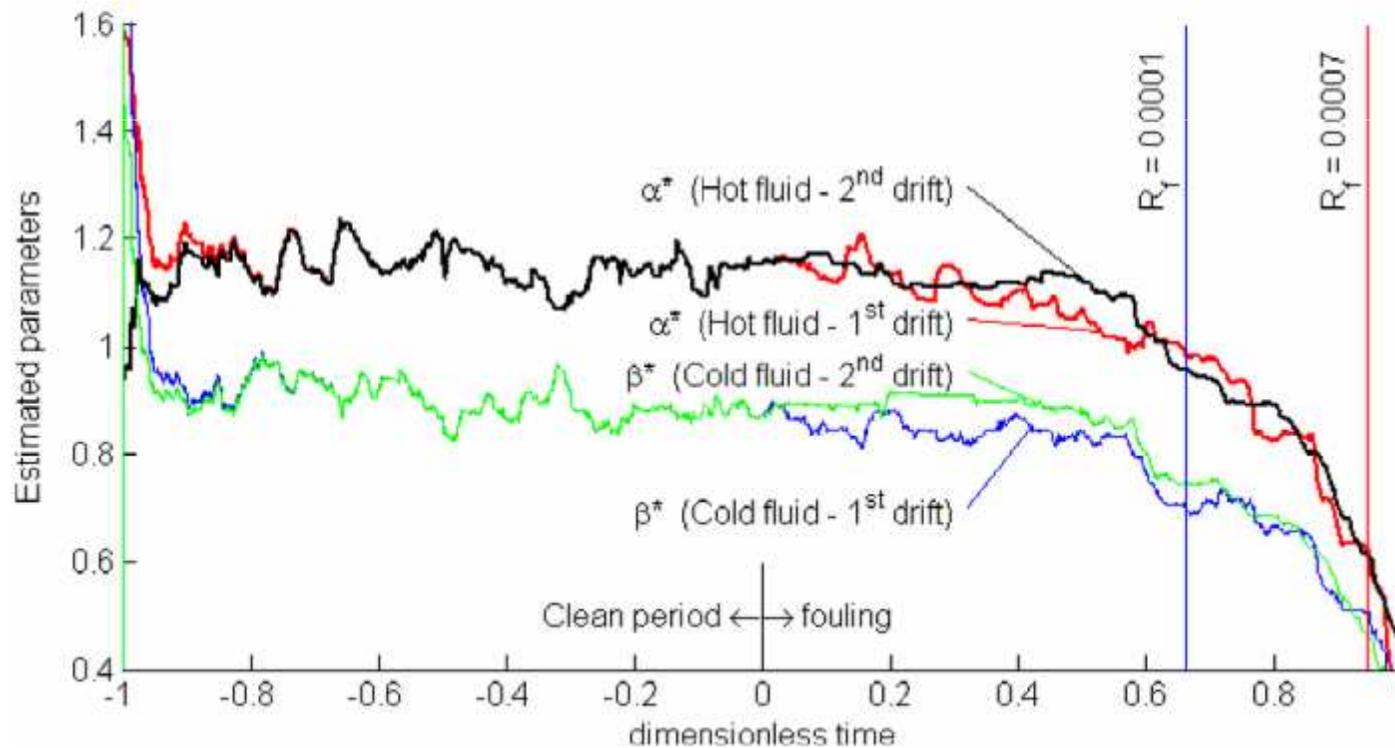
# Les filtres de Kalman

- L'encrassement est simulé par une variation de la conductibilité thermique de la paroi séparatrice.



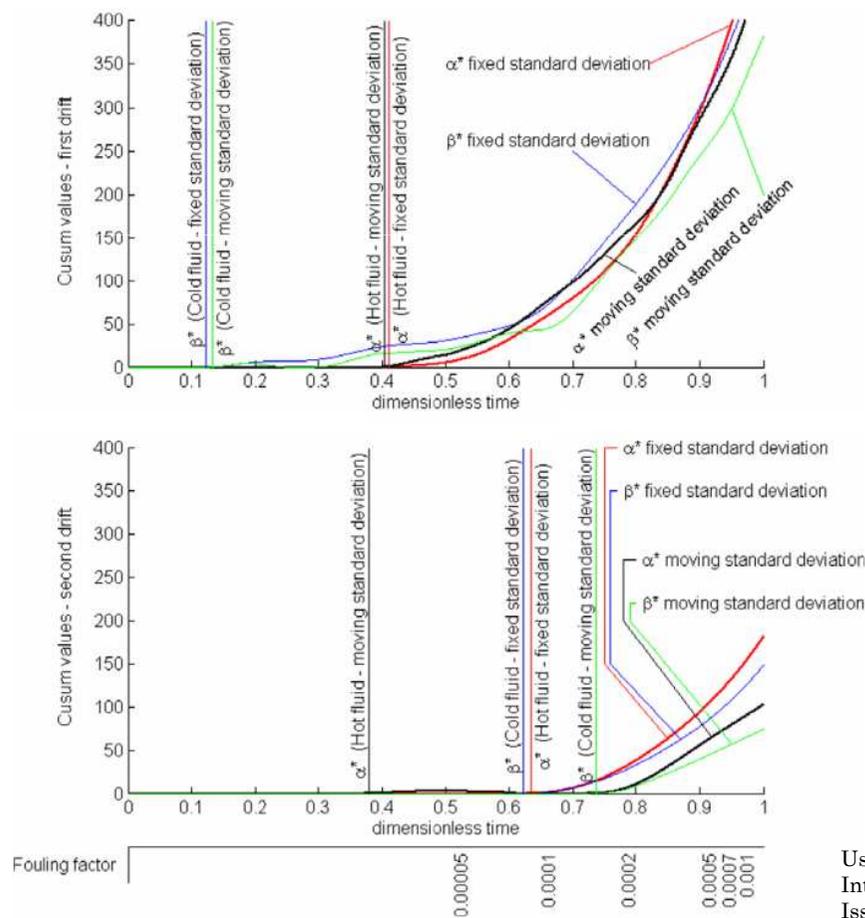
# Les filtres de Kalman

- L'analyse s'effectue sur les valeurs des coefficients d'échange estimés.



# Les filtres de Kalman

- Le test du Cusum mène à une détection claire.



Use of extended Kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers  
 International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 50,  
 Issues 13-14, July 2007, Pages 2643-2655  
 Gudmundur R. Jonsson, Sylvain Lalot, Olafur P. Palsson, Bernard Desmet

# Les observateurs flous

- D'une façon plus générale, les équations peuvent s'écrire

$$\begin{cases} \dot{x} = A_z x + B_z u \\ y = C_z x \end{cases}$$

# Les observateurs flous

- D'une façon plus générale, les équations peuvent s'écrire

$$\begin{cases} \dot{x} = A_z x + B_z u \\ y = C_z x \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{h,1} \\ T_{h,2} \\ T_{c,1} \\ T_{c,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_h - c_\alpha & 0 & c_\alpha & c_\alpha \\ c_h - c_\alpha & -c_h - c_\alpha & c_\alpha & 0 \\ c_\beta & c_\beta & -c_c - c_\beta & 0 \\ c_\beta & 0 & c_c - c_\beta & -c_c - c_\beta \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} c_h - c_\alpha & 0 \\ 0 & c_\alpha \\ 0 & c_c - c_\beta \\ c_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{h,in} \\ T_{c,in} \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} T_{h,2} \\ T_{c,2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_{h,1} \\ T_{h,2} \\ T_{c,1} \\ T_{c,2} \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

# Les observateurs flous

- Les grandeurs utiles sont:

$$c_h = \frac{\dot{m}_h}{\tau_h^* \dot{m}_h^*} \quad c_\alpha = \frac{\alpha^*}{2\tau_h^*} \gamma_U \quad c_c = \frac{\dot{m}_c}{\tau_c^* \dot{m}_c^*} \quad c_\beta = \frac{\beta^*}{2\tau_c^*} \gamma_U$$

# Les observateurs flous

- Les grandeurs utiles sont:

$$c_h = \frac{\dot{m}_h}{\tau_h^* \dot{m}_h^*} \quad c_\alpha = \frac{\alpha^*}{2\tau_h^*} \gamma_U \quad c_c = \frac{\dot{m}_c}{\tau_c^* \dot{m}_c^*} \quad c_\beta = \frac{\beta^*}{2\tau_c^*} \gamma_U$$

- Les limites connues sont:

$$\dot{m}_h \longrightarrow [0.4, 1]$$

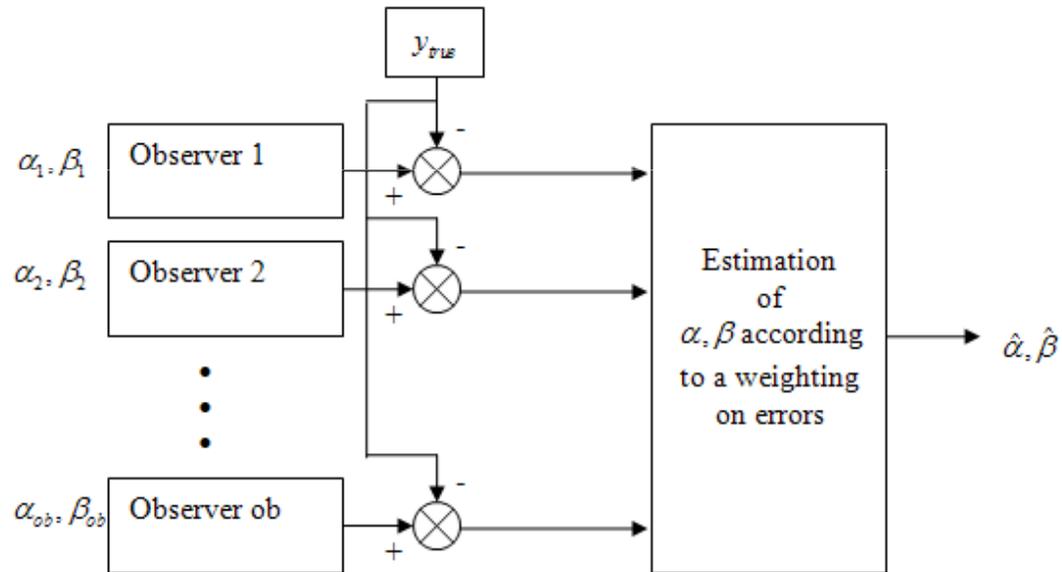
$$\alpha^* \longrightarrow [0.1, 2]$$

$$\dot{m}_c \longrightarrow [0.4, 1]$$

$$\beta^* \longrightarrow [0.1, 2]$$

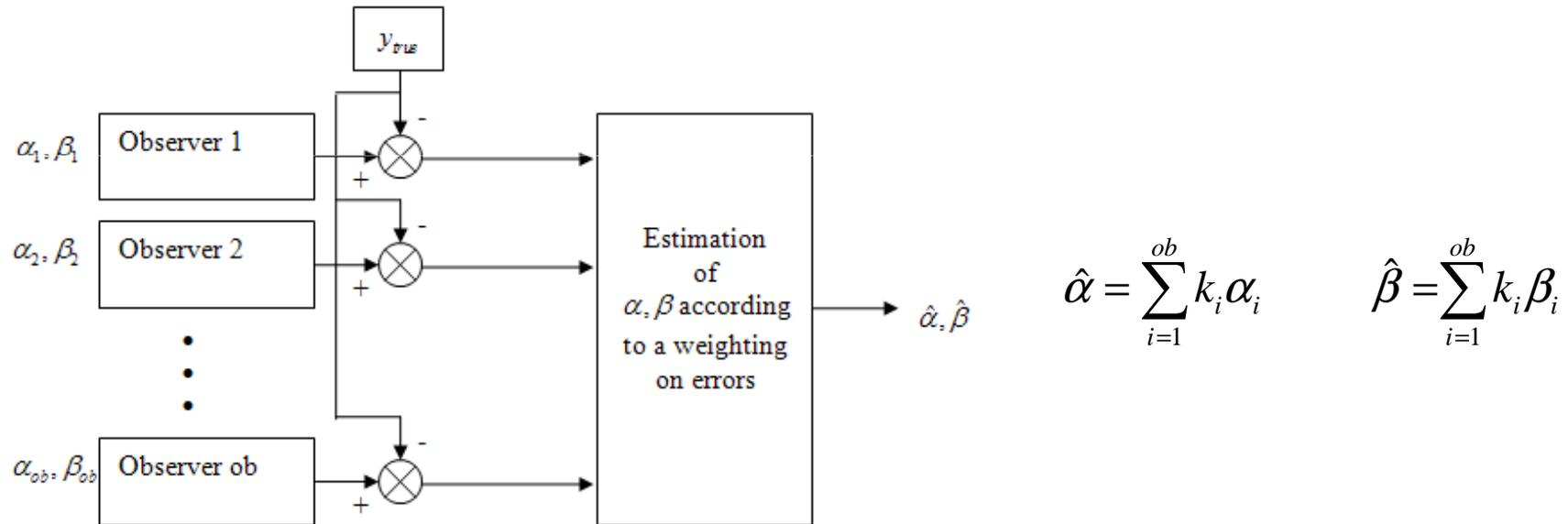
# Les observateurs flous

- La procédure est la suivante



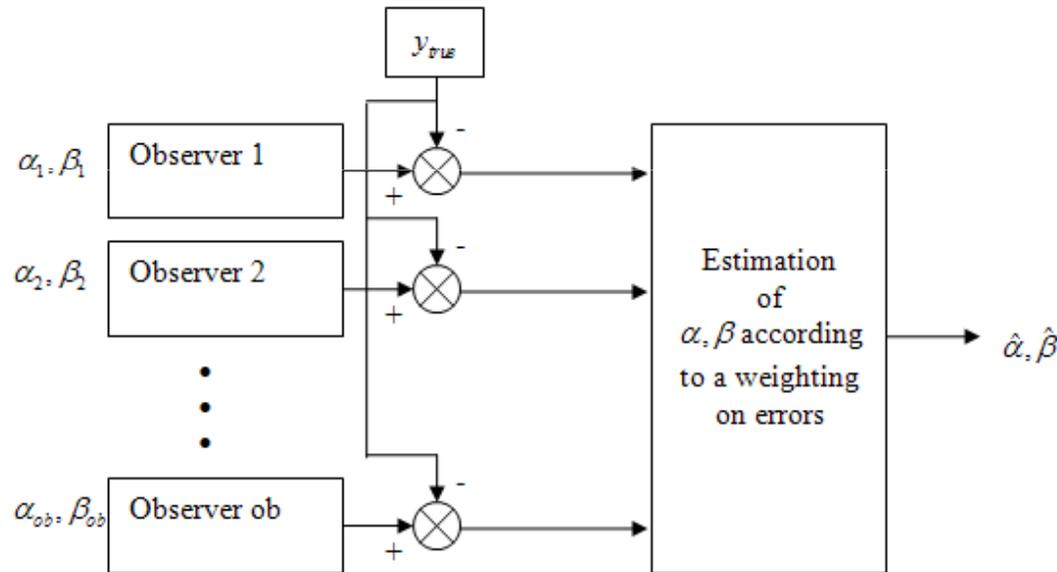
# Les observateurs flous

- La procédure est la suivante



# Les observateurs flous

- La procédure est la suivante

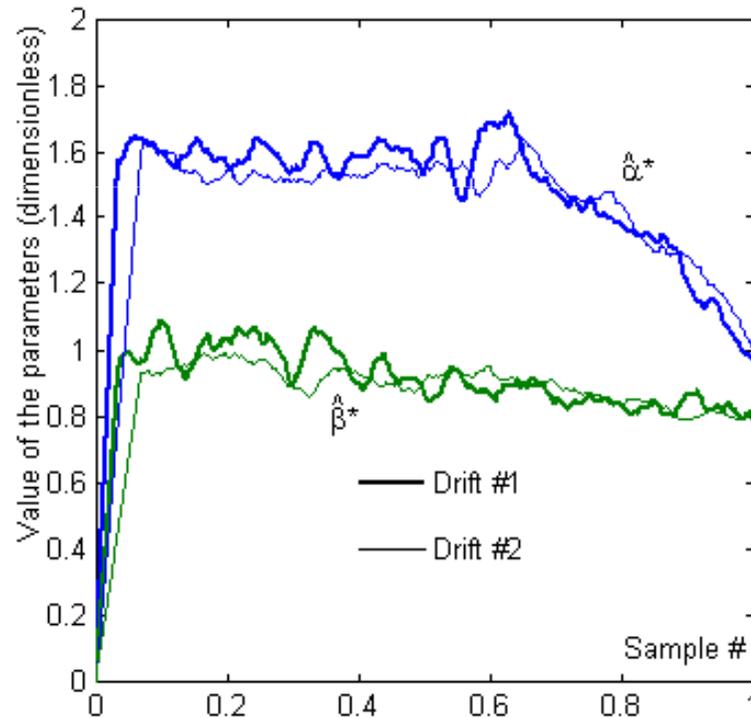


$$\hat{\alpha} = \sum_{i=1}^{ob} k_i \alpha_i \quad \hat{\beta} = \sum_{i=1}^{ob} k_i \beta_i$$

$$k_i = 1 / \left( \epsilon_i \sum_{j=1}^{ob} \frac{1}{\epsilon_j} \right)$$

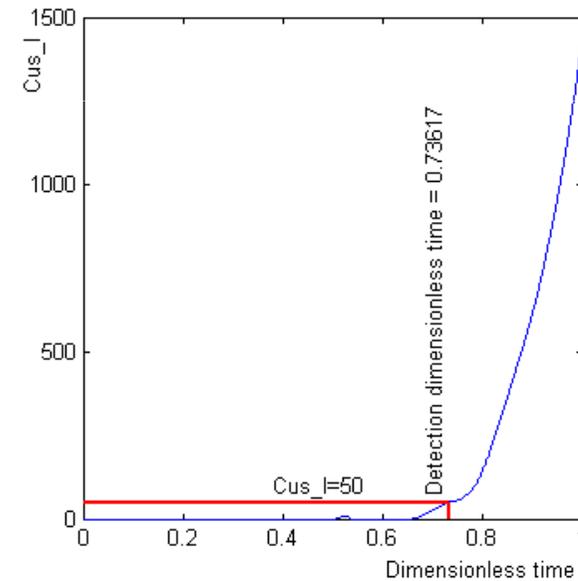
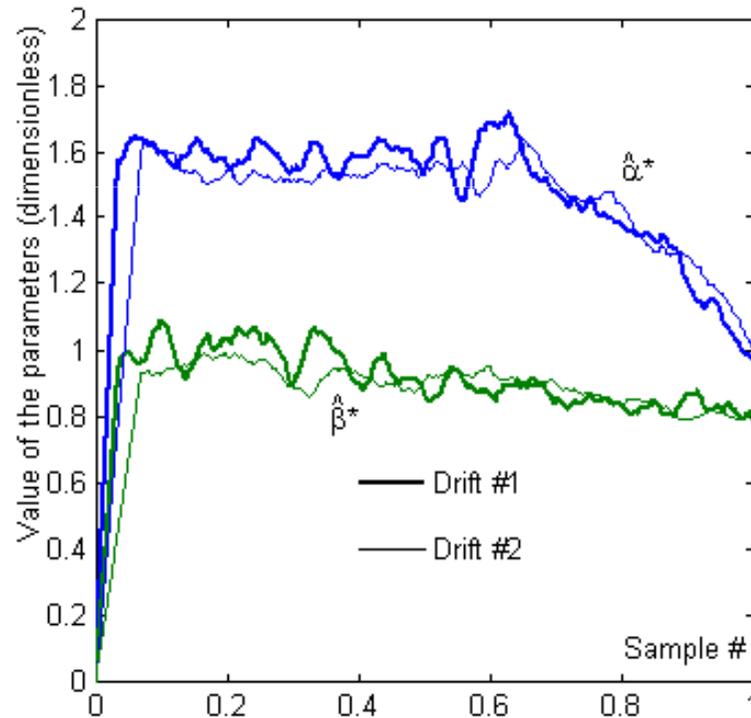
# Les observateurs flous

- Les résultats sont corrects (après filtrage):



# Les observateurs flous

- Les résultats sont corrects (après filtrage):



# La méthode des sous-espaces

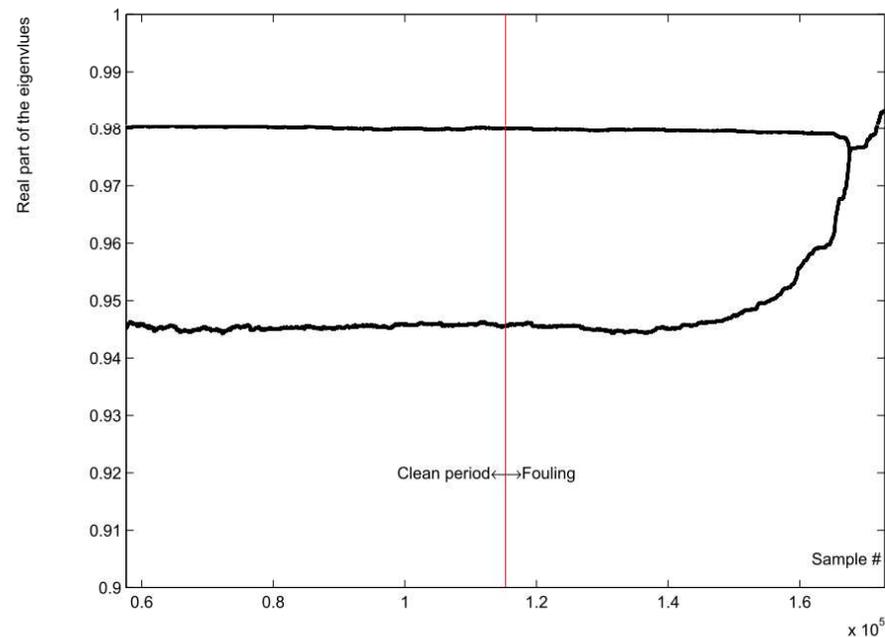
- On étudie la variation des valeurs propres de la matrice  $A$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_z x + B_z u \\ y = C_z x \end{cases}$$

# La méthode des sous-espaces

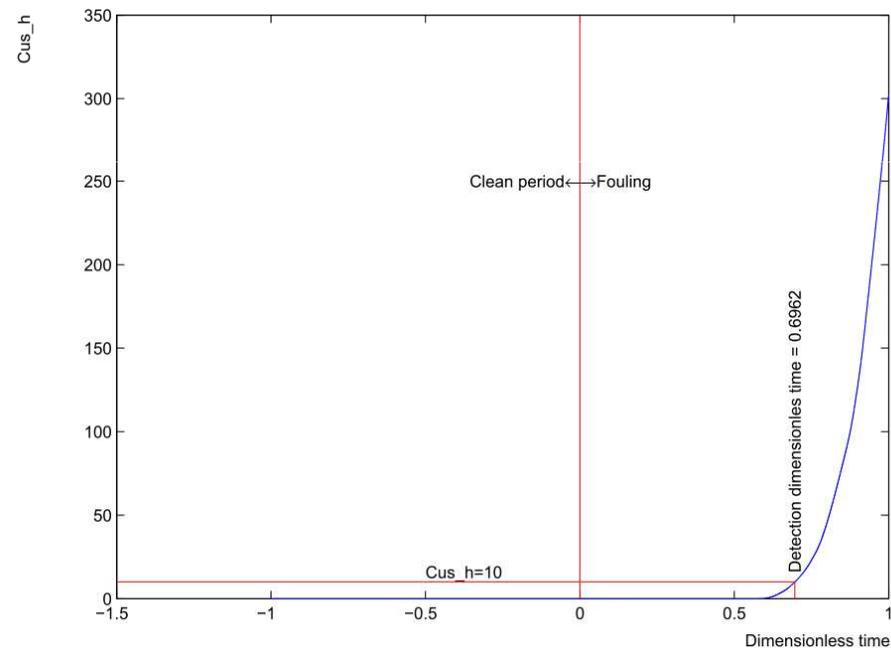
- On étudie la variation des valeurs propres de la matrice  $A$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_z x + B_z u \\ y = C_z x \end{cases}$$



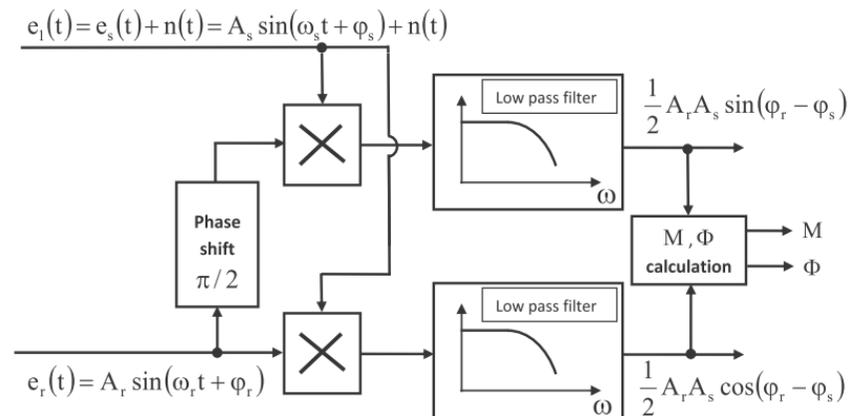
# La méthode des sous-espaces

- On obtient également de bons résultats



# La suite

- La détection d'une dérive par une technique synchrone



# La suite

- La détection d'une dérive par une technique synchrone

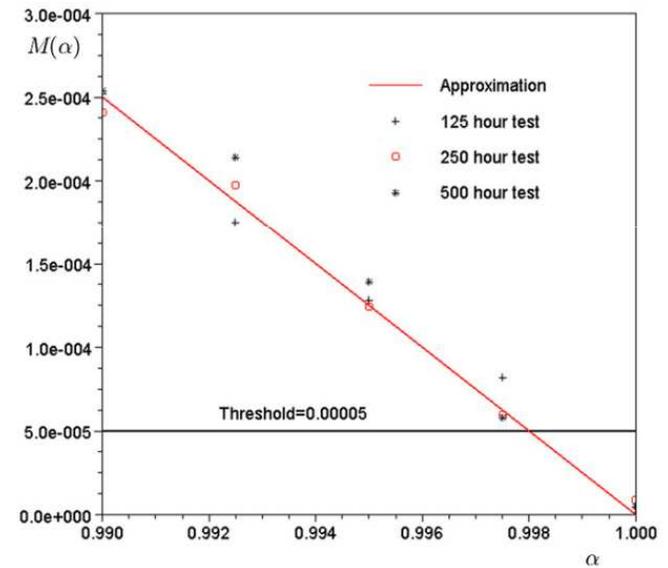
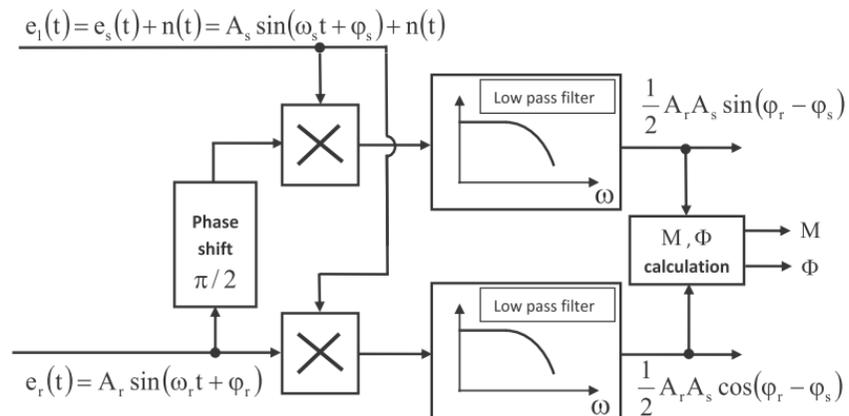


Fig. 6. Modulus obtained by a two-channel lock-in amplifier for a lumped system considering a 0.5 °C noise and  $500 \times 10^6$  samples.

# La suite

- La détection d'une dérive par une technique synchrone

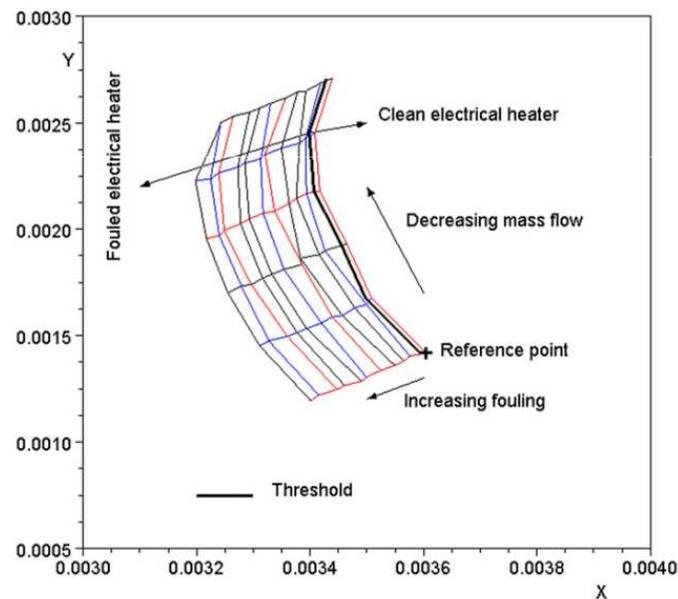


Fig. 9. Representation of the complex numbers obtained for an electrical heater (averaged values).

# Pour information

- The NTU-Effectiveness Method

**Authors:** Sylvain Lalot

[https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=21974](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=21974)

- Open Access item.
- Click below PDF icon for free download.