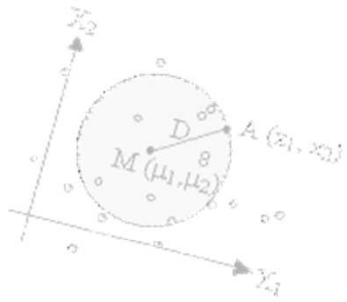


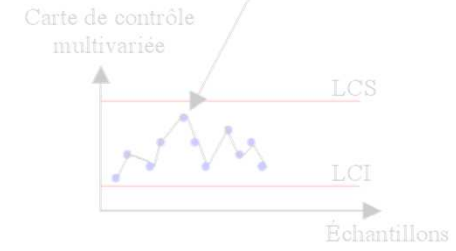
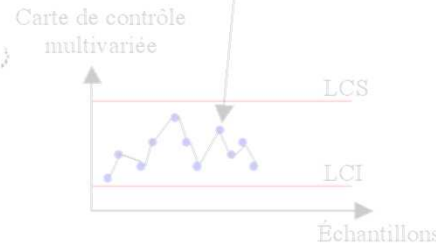


# Plan

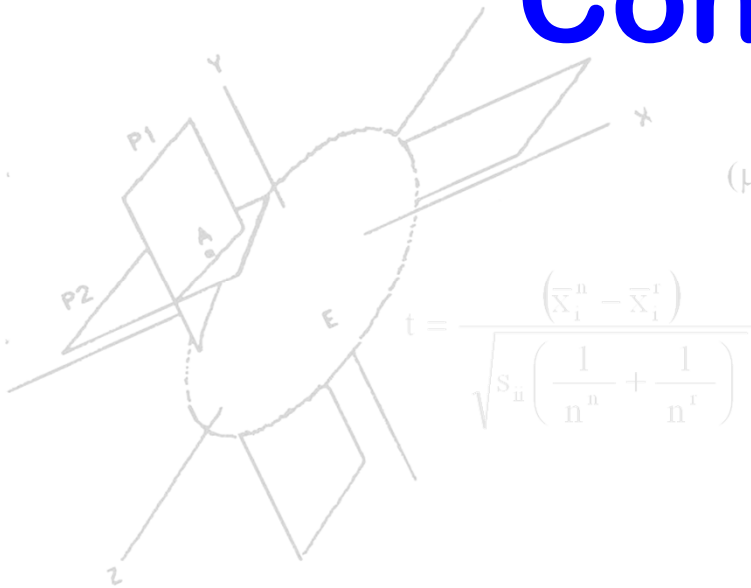
- **Contexte**
- **Carte de Contrôle Spectrale**
- **Problématique multivariée**
- **Méthodologie FNAD**
- **Conclusions et Perspectives**



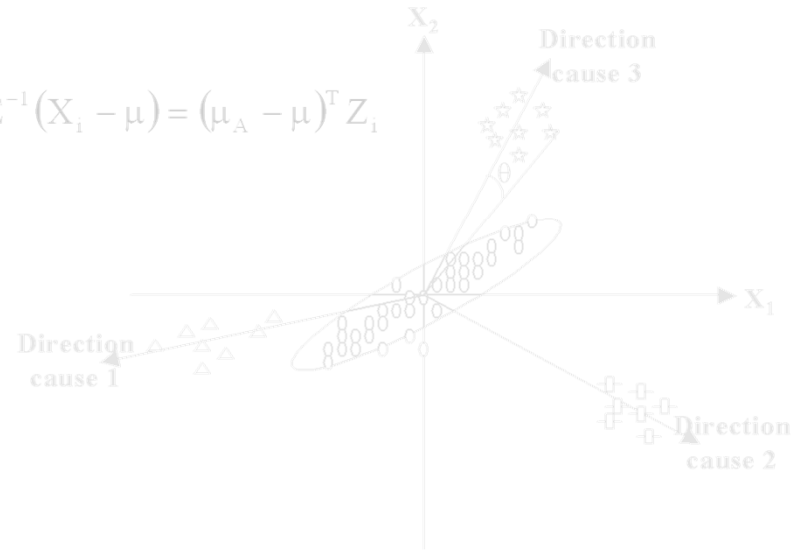
$$\max_i \left| \frac{\bar{x}_i^0}{\bar{r}_i} \right| = \max_i \left\{ \left( \frac{\bar{x}_i^0}{\bar{r}_i} \right)^T \bar{E}_i^0, \left( \frac{\bar{x}_i^0}{\bar{r}_i} \right)^T \bar{r}_i^0 \right\}$$



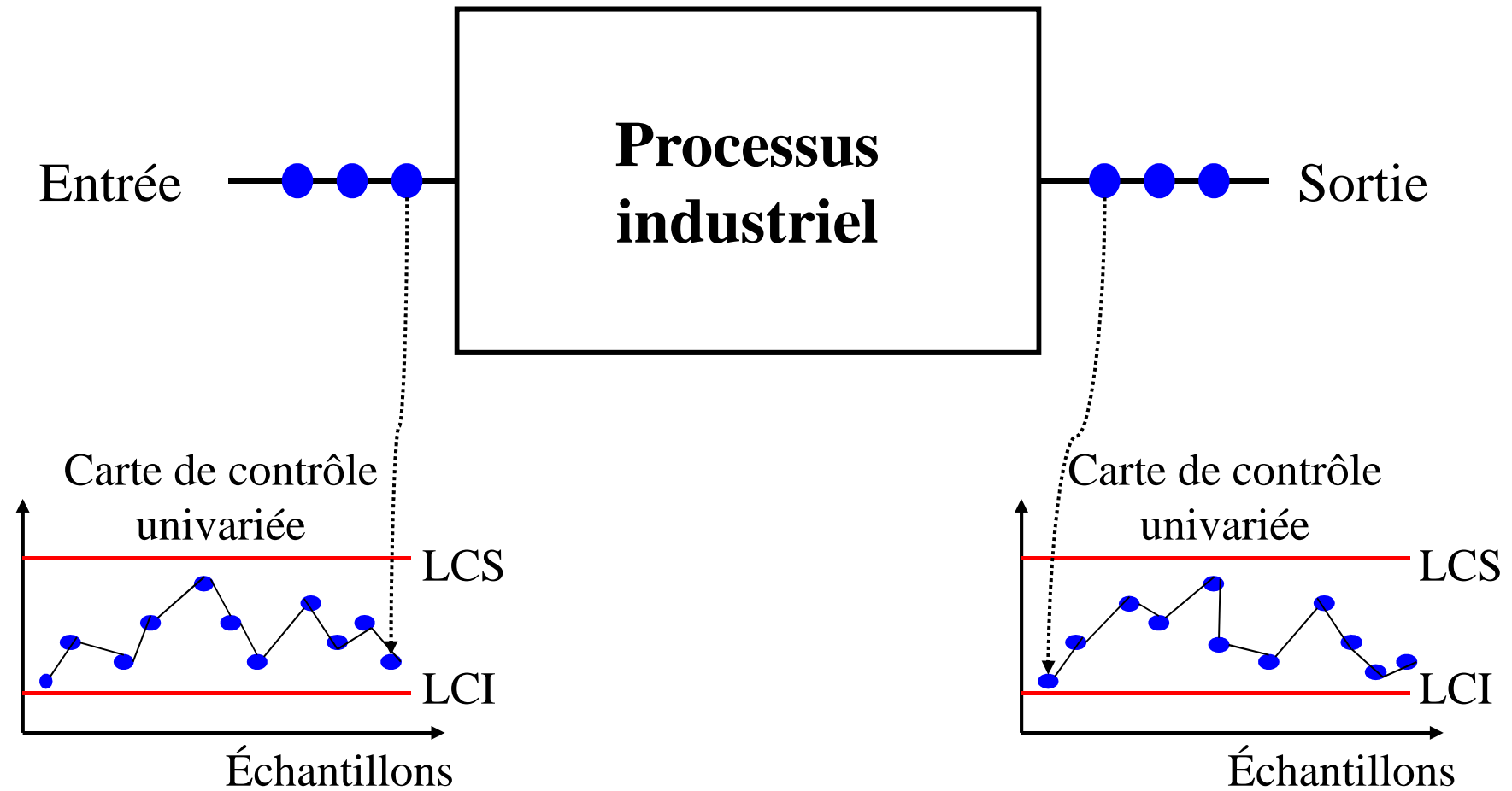
# Contexte



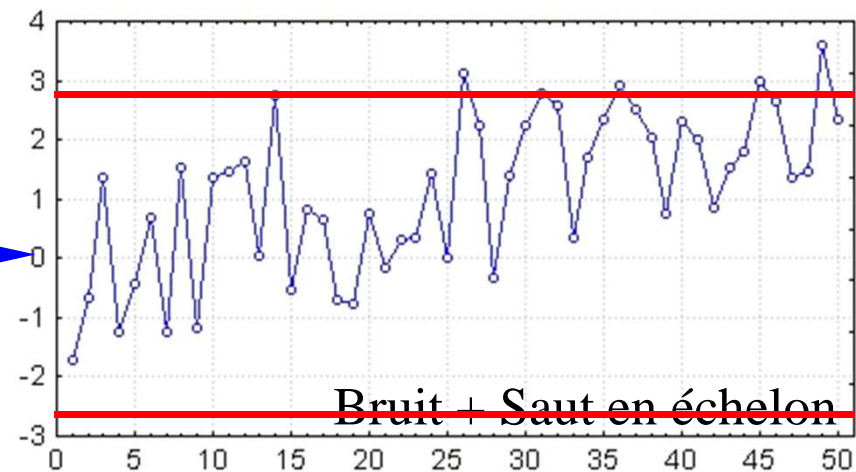
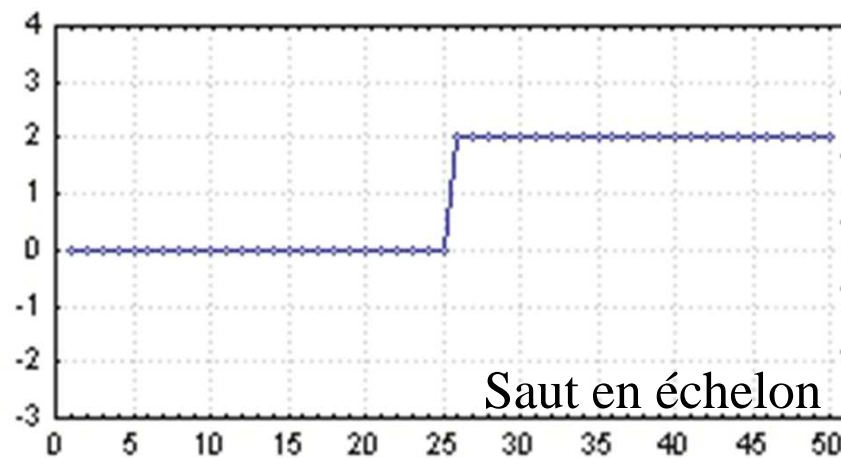
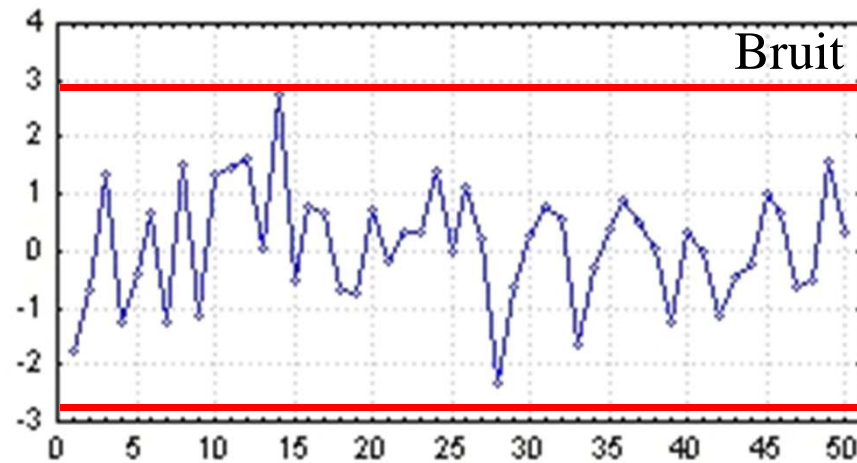
$$(\mu_A - \mu)^T \Sigma^{-1} (X_i - \mu) = (\mu_A - \mu)^T Z_i$$



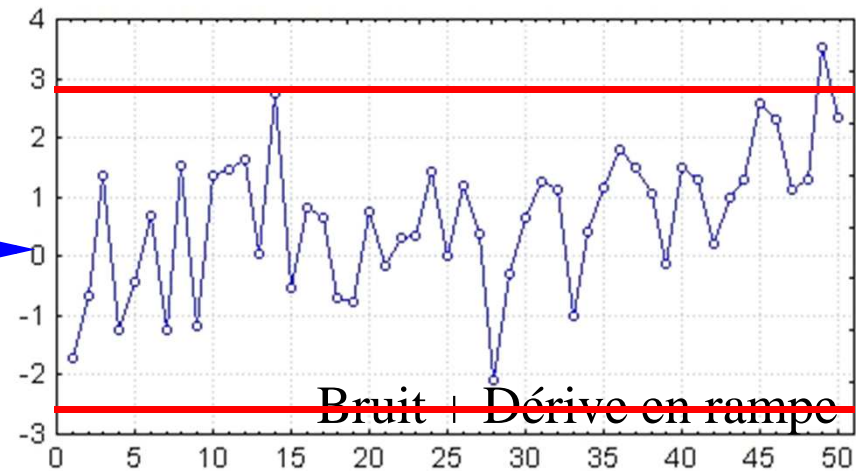
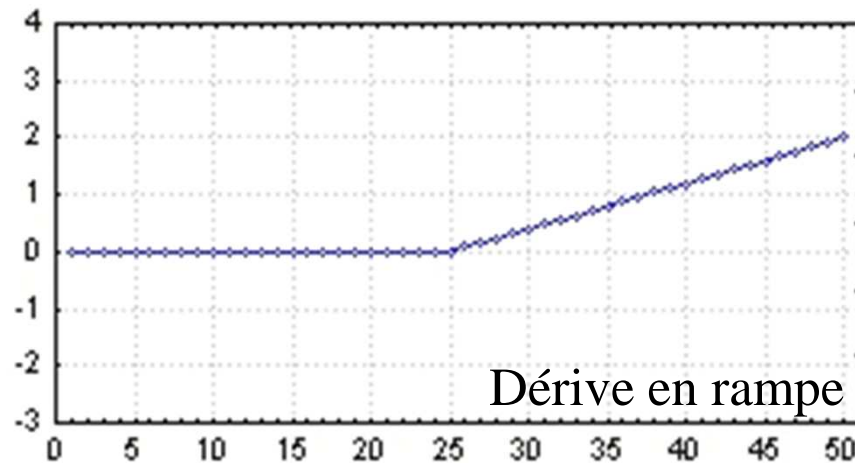
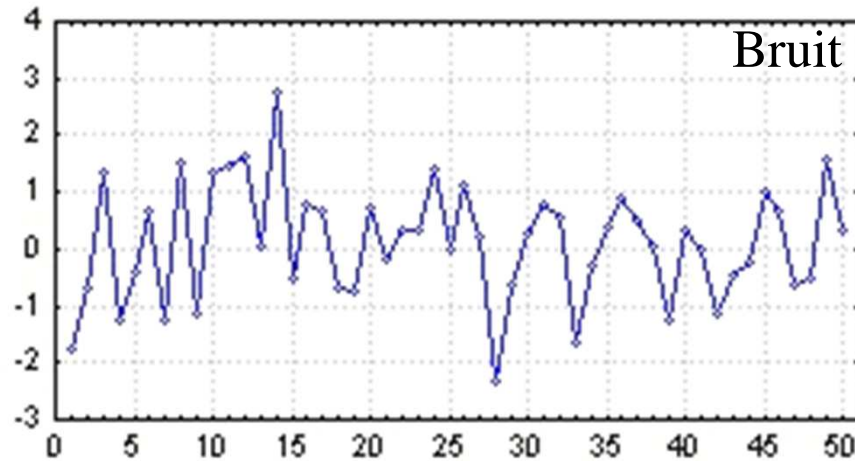
# Maîtrise Statistique des Processus (MSP)



## Types des variations en MSP (1)



## Types des variations en MSP (2)



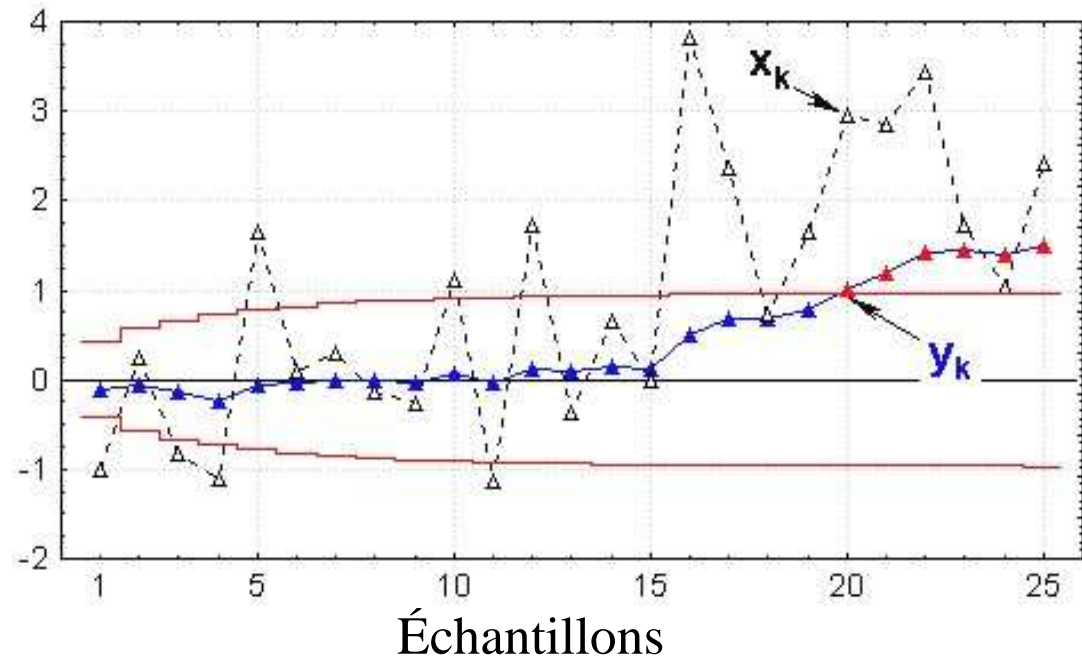
## Cartes de contrôle univariées

- Carte de contrôle de **Shewhart**
- Carte de contrôle **CUSUM**
- Carte de contrôle **EWMA** :  $y_k = rx_k + (1-r)y_{k-1}$ ; ( $0 < r \leq 1$ ;  $y_0 = \mu_0$ )

$$LCS = \mu_0 + h\sigma_x \sqrt{\frac{r}{2-r}}$$

$$LCI = \mu_0 - h\sigma_x \sqrt{\frac{r}{2-r}}$$

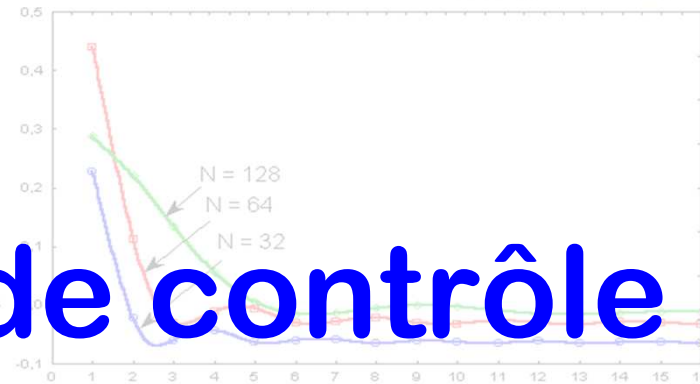
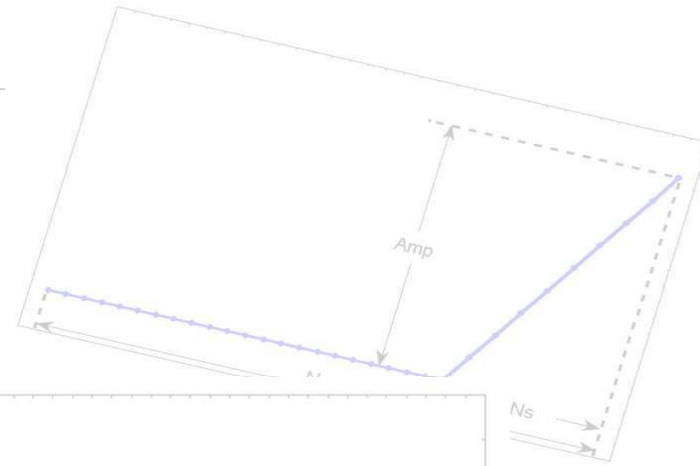
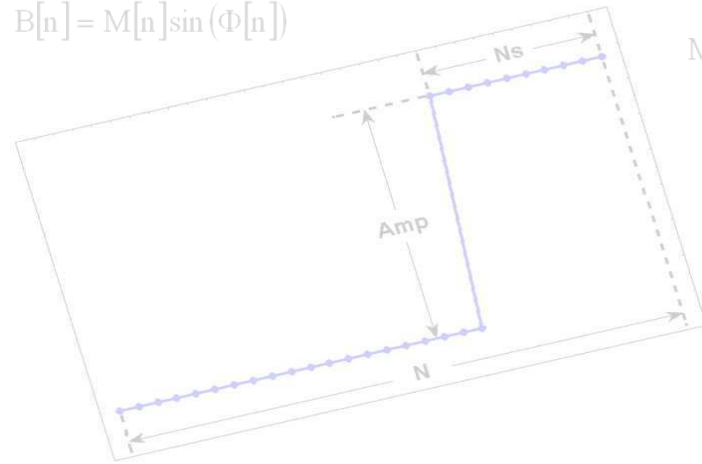
Valeurs



$$A[n] = M[n] \cos(\Phi[n])$$

$$B[n] = M[n] \sin(\Phi[n])$$

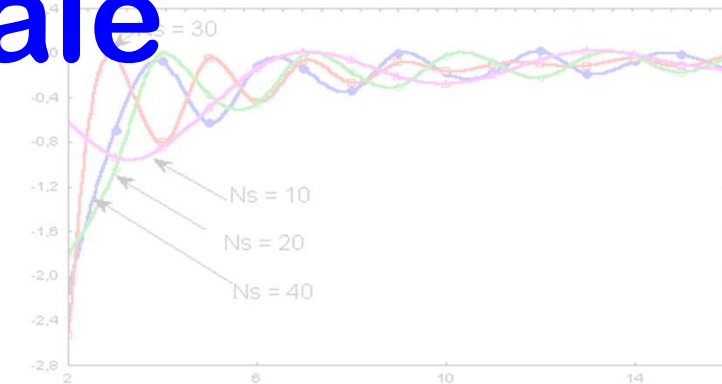
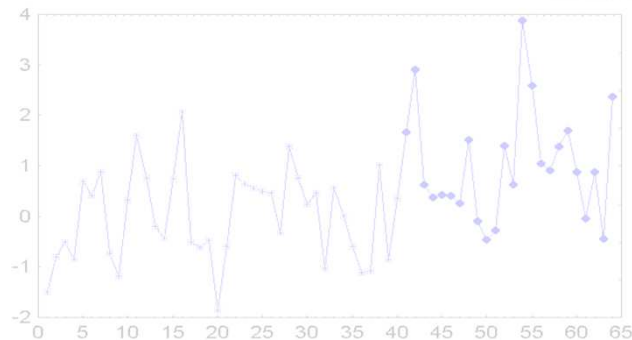
$$M[n] = \sqrt{A^2[n] + B^2[n]}$$



# Carte de contrôle spectrale

$$A_{CR}^* [ ] = \frac{A^* [ ] - \bar{A}}{\sigma_A} \sim N(0,1)$$

$$B_{CR}^* [ ] = \frac{B^* [ ] - \bar{B}}{\sigma_B} \sim N(0,1)$$

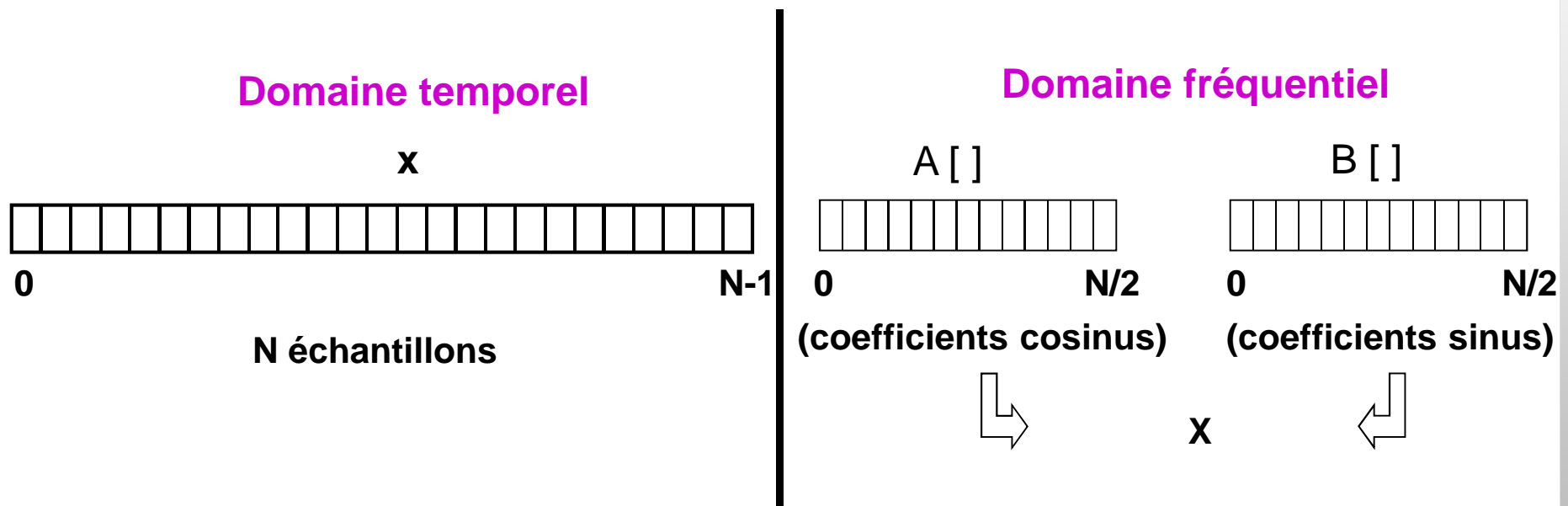


$$M_{CR}^2 [ ] = A_{CR}^{*2} [ ] + B_{CR}^{*2} [ ] = \left( \frac{A^* [ ] - \bar{A}}{\sigma_A} \right)^2 + \left( \frac{B^* [ ] - \bar{B}}{\sigma_B} \right)^2$$



## Carte de Contrôle Spectrale

- Principe de construction



$$x_k = \sum_{n=0}^{N/2} A[n] \cos\left(2\pi k \frac{n}{N}\right) + \sum_{n=0}^{N/2} B[n] \sin\left(2\pi k \frac{n}{N}\right), \quad k = 0, \dots, N-1$$

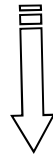
## Carte de Contrôle Spectrale

- Principe de construction

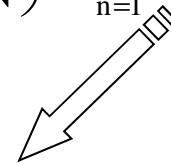
$\mathbf{x} = \{x_k \mid k = 0, \dots, N-1\}$  – bruit blanc



$$x_k = A[0] + A\left[\frac{N}{2}\right] \cos(k\pi) + \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} A[n] \cos\left(2\pi k \frac{n}{N}\right) + \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} B[n] \sin\left(2\pi k \frac{n}{N}\right)$$



$$A^* [ ] \sim N(\bar{A}, \sigma_A)$$



$$B^* [ ] \sim N(\bar{B}, \sigma_B)$$

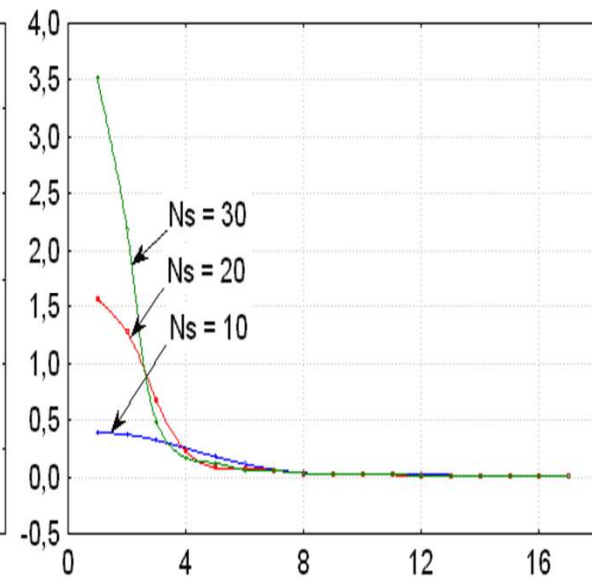
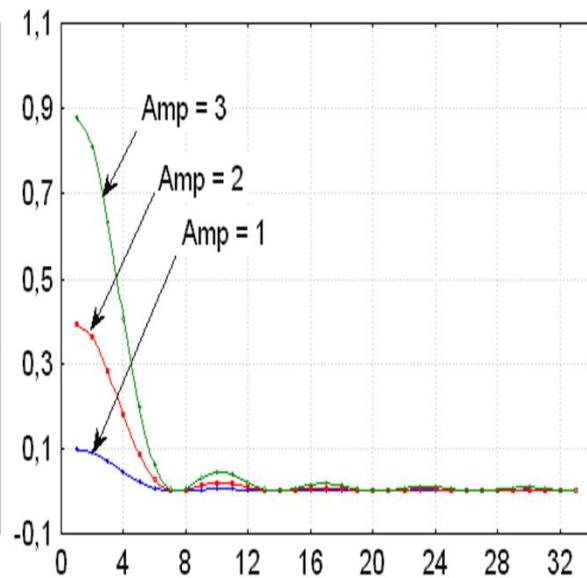
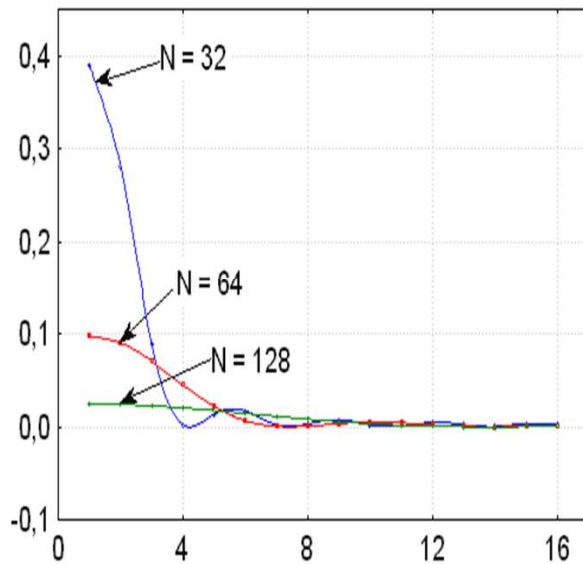
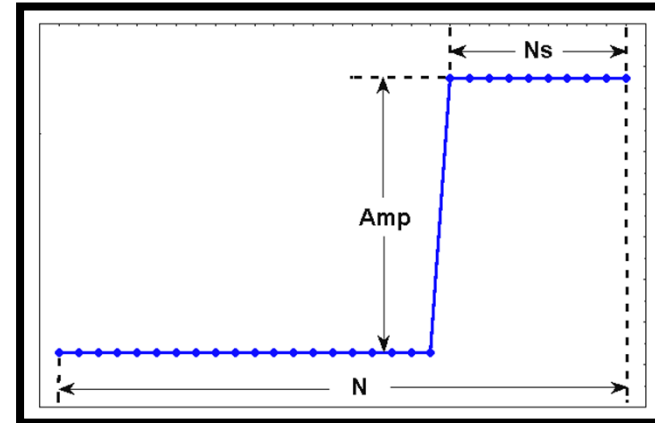
$$M_{CR}^2 [ ] = \left( \frac{A^* [ ] - \bar{A}}{\sigma_A} \right)^2 + \left( \frac{B^* [ ] - \bar{B}}{\sigma_B} \right)^2 \implies M_{CR}^2 [ ] \sim \chi_{(2ddl)}^2 \quad \boxed{LC = \chi_{\alpha, ddl}^2}$$

# Carte de Contrôle Spectrale

## • Étude de $M^2_{CR}$ [ ]

### — Paramètres

- N
- Amp
- Ns

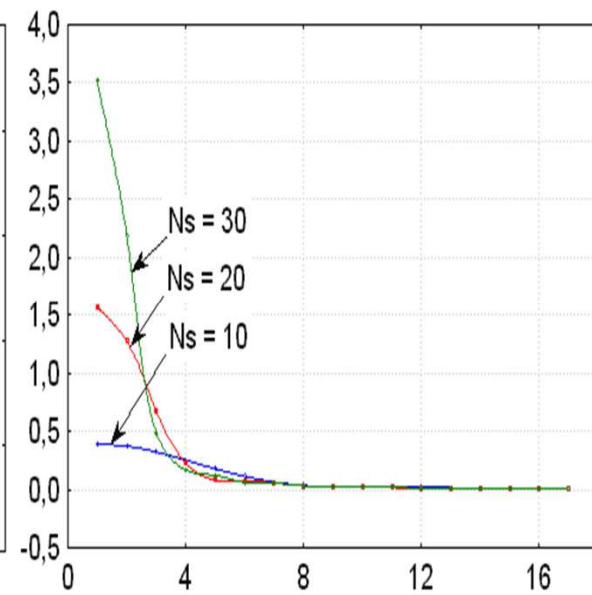
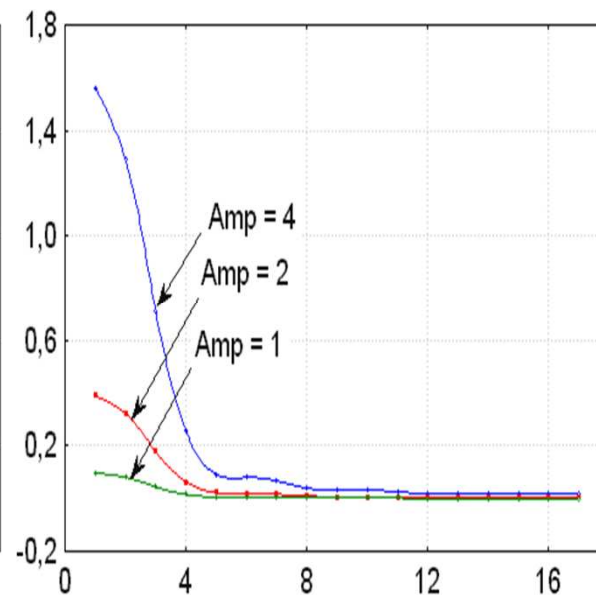
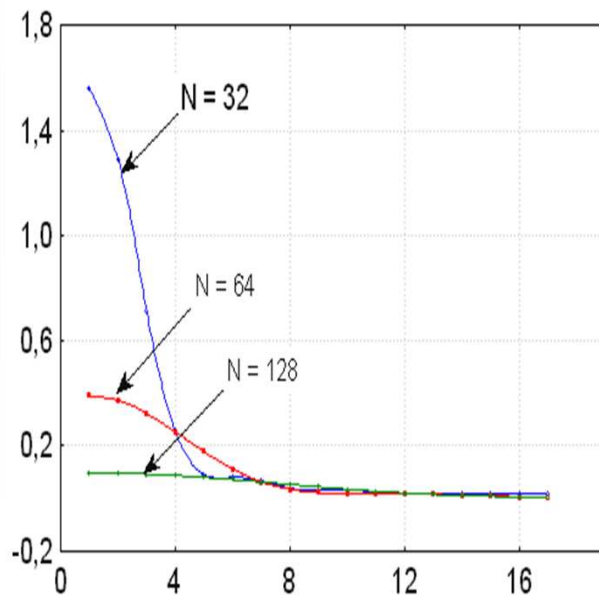
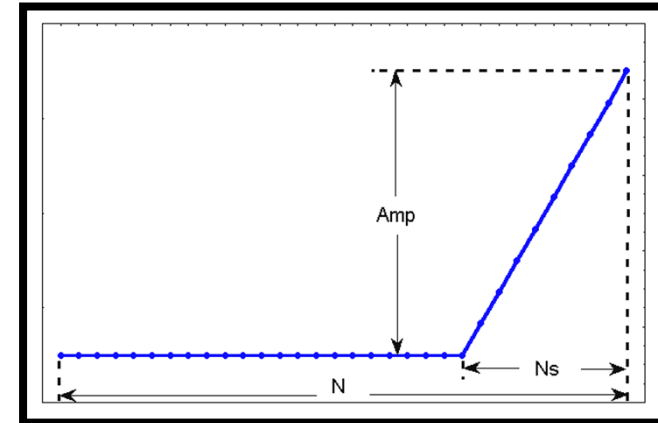


# Carte de Contrôle Spectrale

## • Étude de $M^2_{CR}$ [ ]

— Paramètres

- N
- Amp
- Ns



## Carte de Contrôle Spectrale

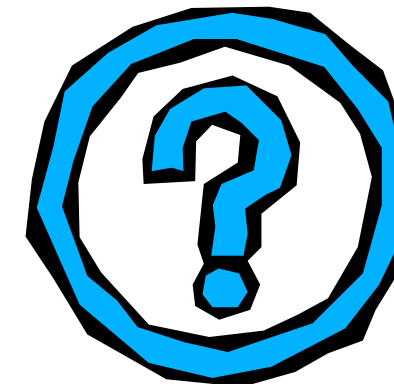
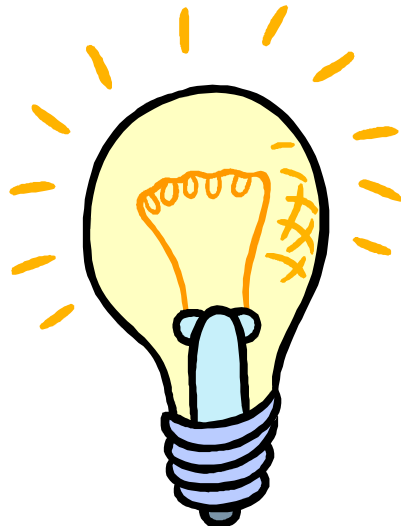
- En résumé...

- Détection facilitée si:

- N - petite

- Amp - grande

- Ns - grand



**Comment faire ?**

- **Solution:**

- Utilisation d'une fenêtre glissante!

## Carte de Contrôle Spectrale

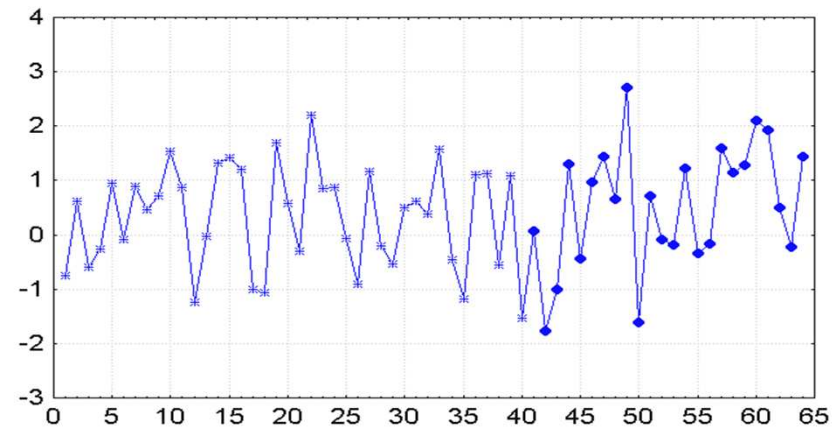
- **Taille de la fenêtre**
  - Trouver le compromis
    - bonne résolution spectrale → N grande
    - détection facile → N petite
- **Solution**
  - fenêtre de taille N réduite
  - ajout de N' zéros
  - analyse spectrale



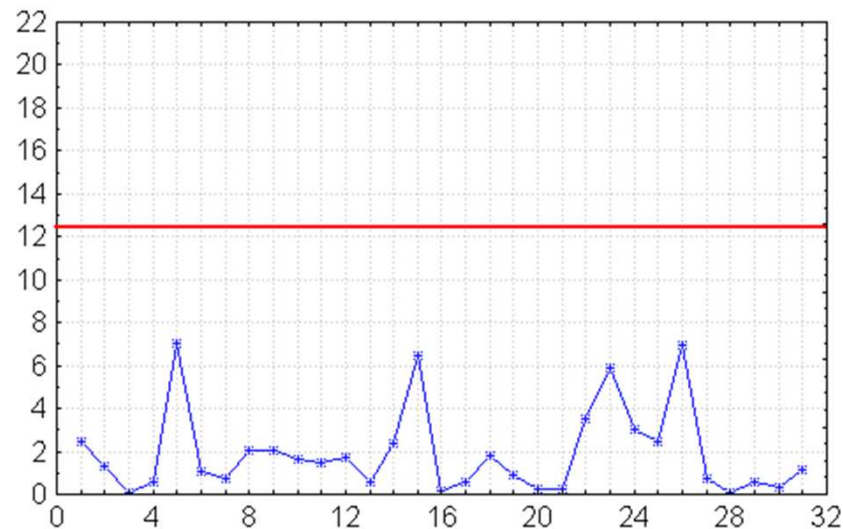
## Carte de Contrôle Spectrale

- Exemple: dérive en rampe

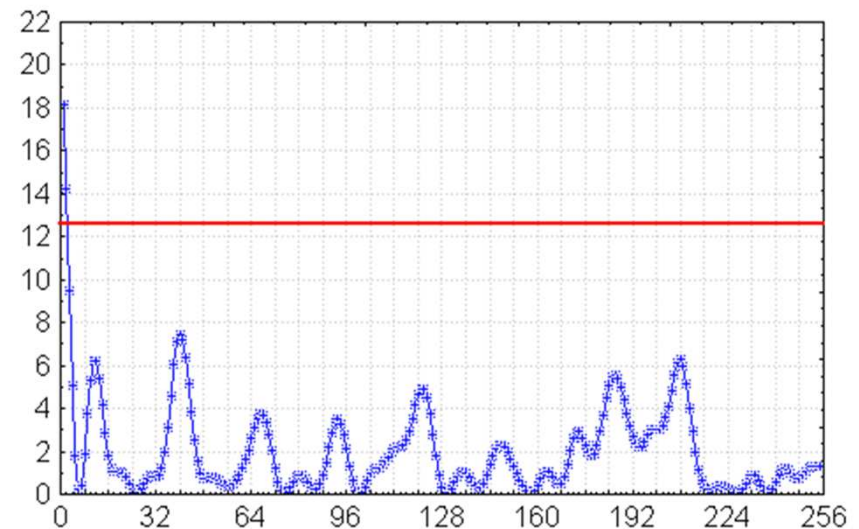
- N = 64
- k = 41
- Amp = 1 sigma
- N' = 448



$M_{CR}^2 [ ]$



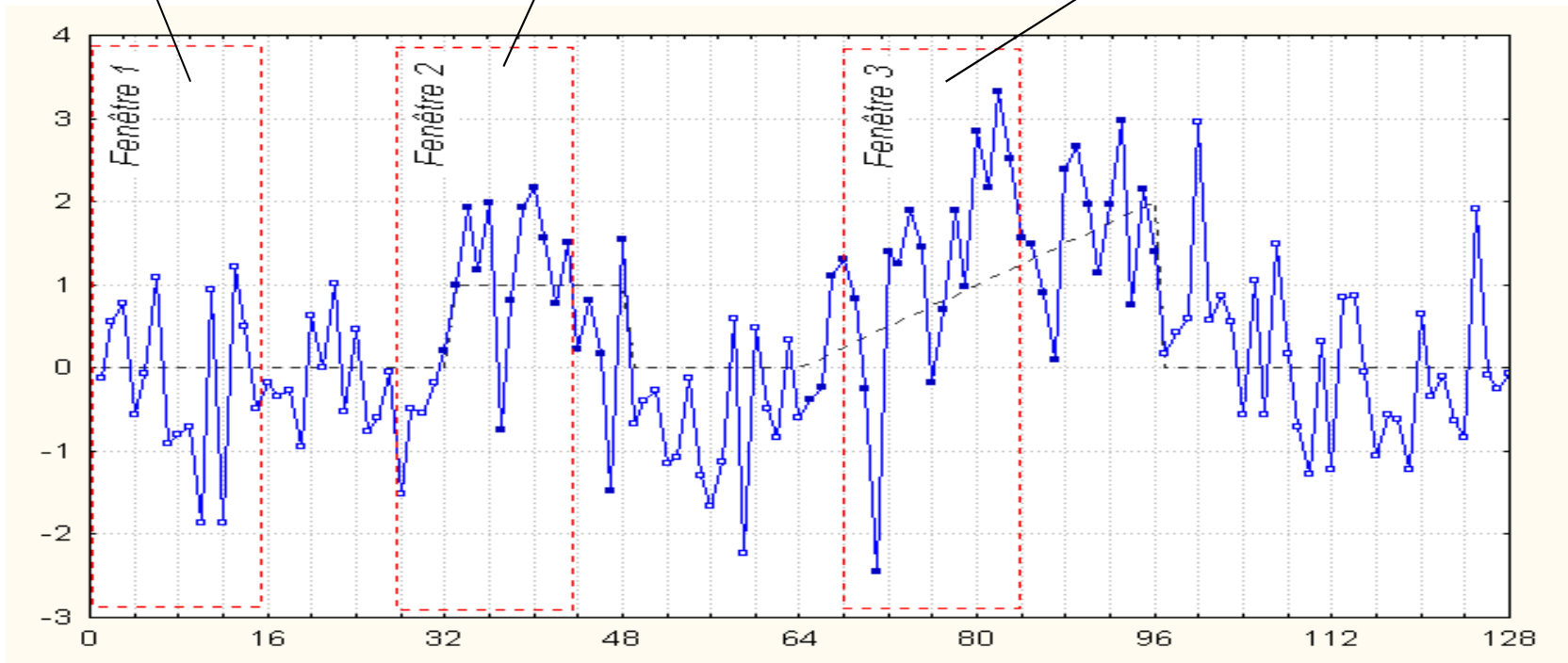
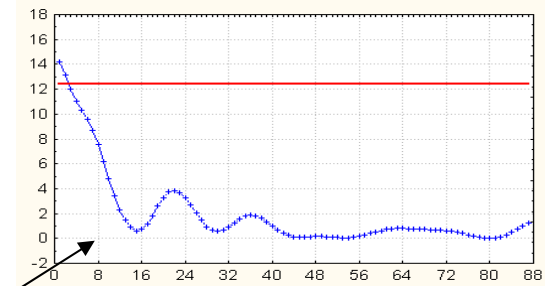
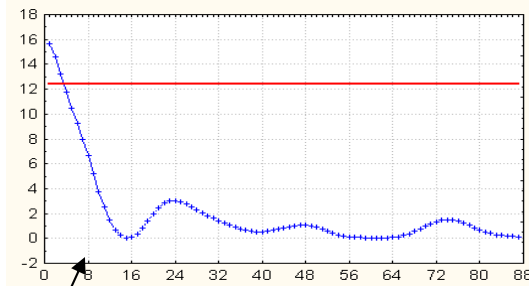
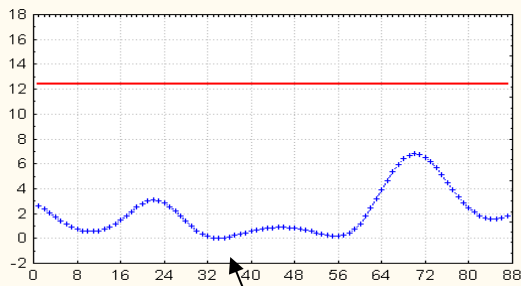
$M_{CR}^2 [ ]$





# Carte de Contrôle Spectrale

- Détection des dérèglages



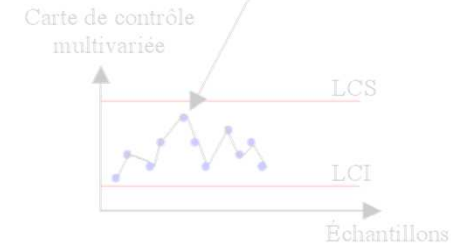
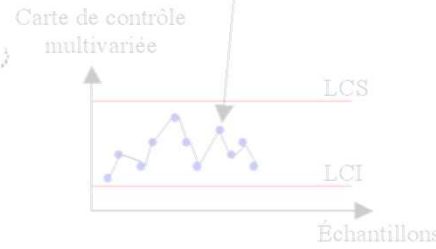
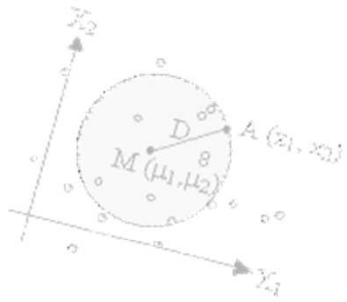
## Carte de Contrôle Spectrale

### Efficacité de la carte

- N = 16 observations
- N' = 160 zéros

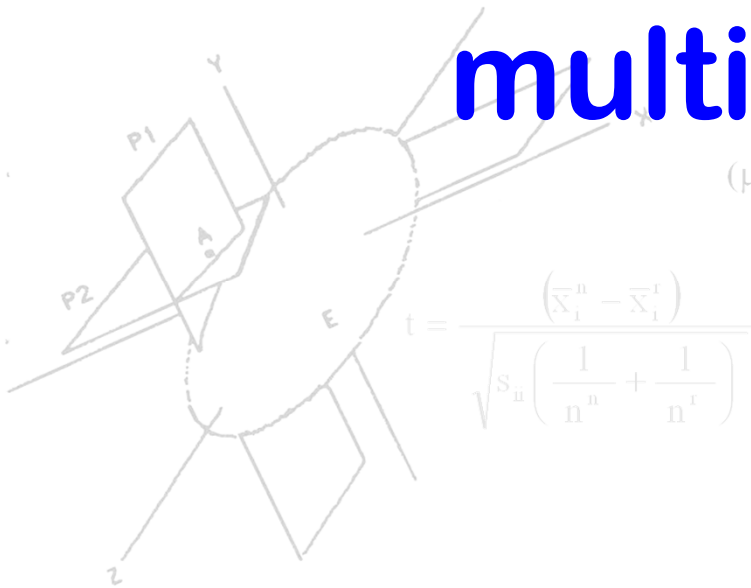
| Amp [ $\sigma$ ]<br>POM <sub>0</sub> | 0.75  | 1     | 1.5  | 2    | 2.5  | 3    |
|--------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|
| 100                                  | 6.19  | 5.72  | 3.13 | 2    | 1.73 | 1.57 |
| 200                                  | 8.15  | 7.17  | 4.17 | 2.55 | 2.17 | 1.92 |
| 500                                  | 9.92  | 8.57  | 5.28 | 3.27 | 2.75 | 2.38 |
| 1000                                 | 10.81 | 9.85  | 5.86 | 3.79 | 3.17 | 2.59 |
| 2000                                 | 12.17 | 11.26 | 7.16 | 5.03 | 3.86 | 3.15 |

| EWMA<br>(POM <sub>0</sub> =500) | 15.9 | 10.2 | 5.46 | 3.51 | 2.50 | 1.86 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|

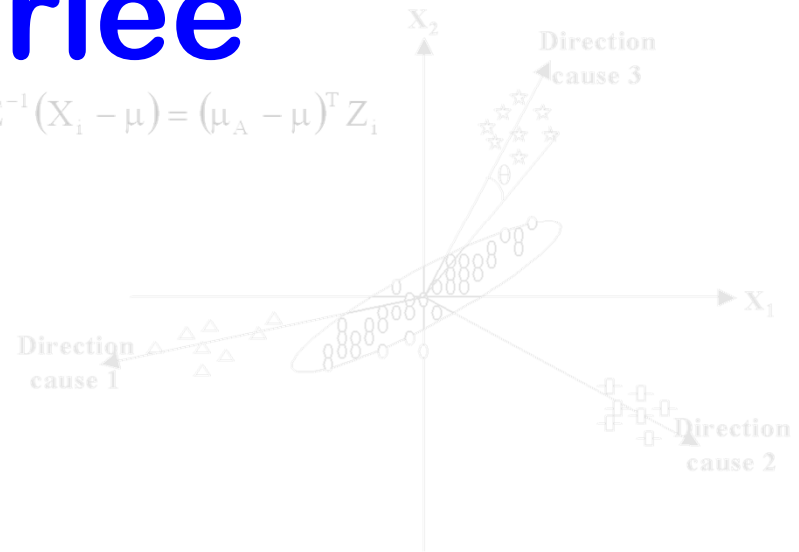


$$\max_{\mu} \left\| \frac{\bar{x}^0}{\sqrt{F}} \right\|^2 = \max_{\mu} \left\| \frac{\bar{x}^0}{\sqrt{F}} \right\|^2 \frac{E_1}{E_1 + \dots + E_p} \approx 0$$

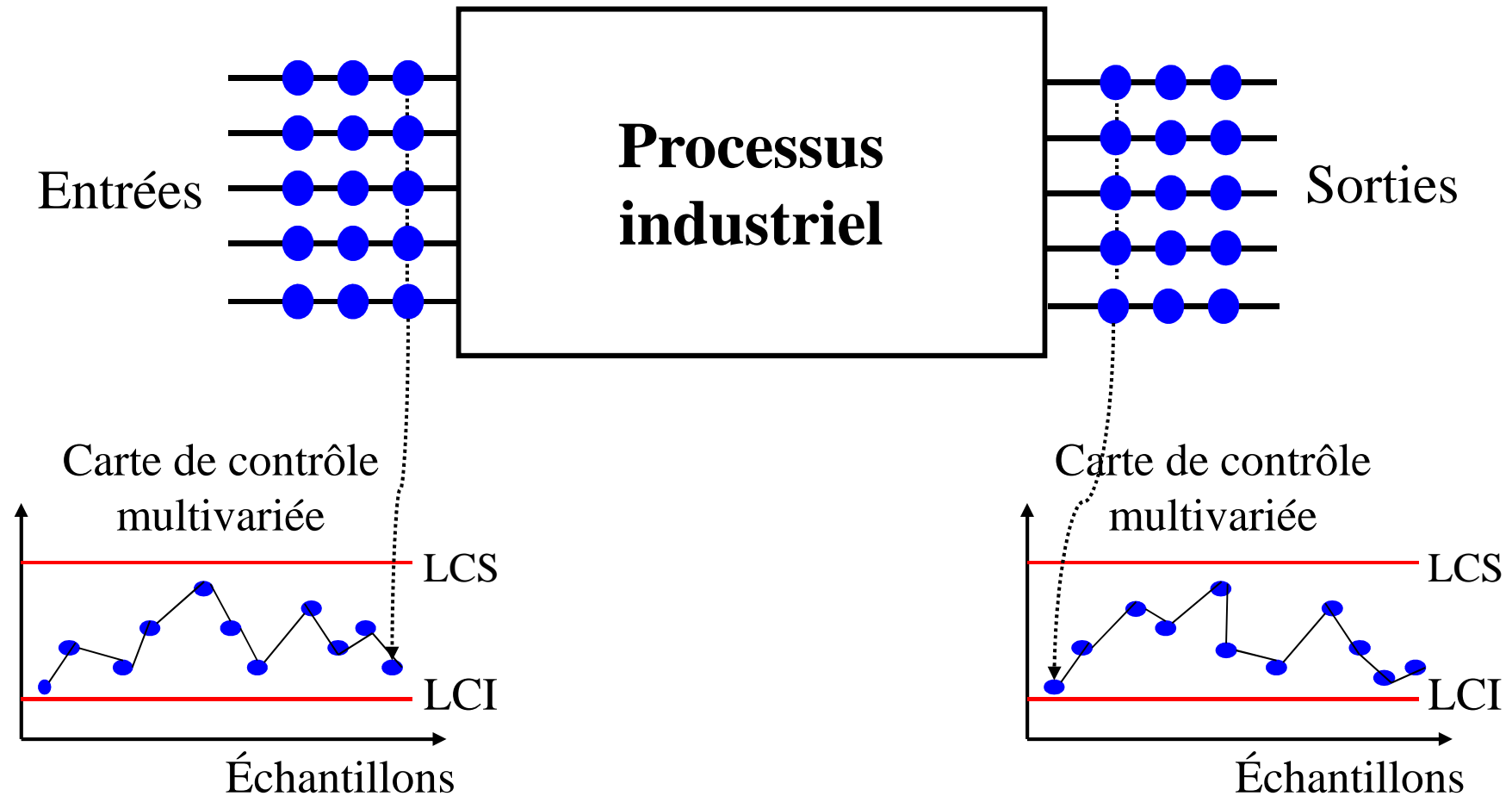
# Problématique multivariée



$$(\mu_A - \mu)^T \Sigma^{-1} (X_i - \mu) = (\mu_A - \mu)^T Z_i$$



# Maîtrise Statistique des Processus Multivariés



## Cartes de contrôle multivariées

- Carte de contrôle **T<sup>2</sup>** de **Hotelling**:  $T^2 = (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu)$
- Carte de contrôle **CUSUM** multivariée
- Carte de contrôle **EWMA** multivariée

## Cartes de contrôle multivariées

- **Avantages**

- plus adéquates pour le suivi des processus multivariés
- prise en compte de la corrélation entre les variables

- **Inconvénients**

- manque d'information concernant la source d'une situation hors-contrôle
- prise des actions correctives difficile

## Méthodes de détection existantes

Approches  
géométriques

Sélection de  
la cause

### G. C. Runge et al. [1996]

- calcul de la 1<sup>ère</sup> variable à

### M. K. Chua et D. C. Montgomery [1990, 1992]

- algorithme BSA (Backward Selection Algorithm) pour réduire le nombre des variables

### D. Lafaye de Micheaux [1998, 2001]

- direction privilégiée des causes assignables
- détection basée sur l'abscisse de projection ou l'angle au centre

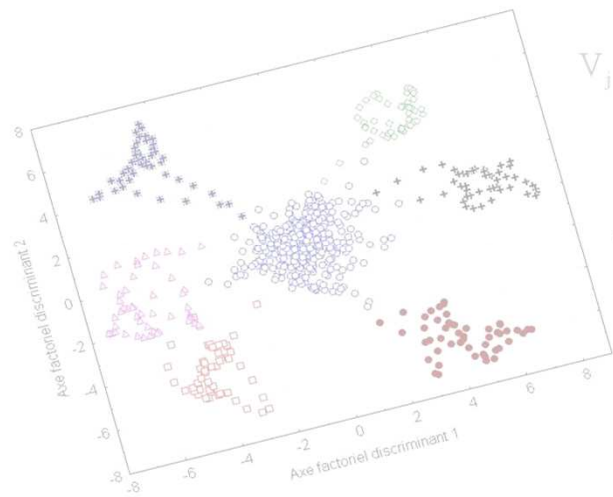
### S. Yoon et J. F. MacGregor [2001]

- changement dans l'orientation du vecteur d'observations dans l'espace ACP ("signature" de la cause assignable)
- détection basée sur le cosinus de l'angle dans l'espace ACP et des résidus

## Inconvénients des méthodes existantes

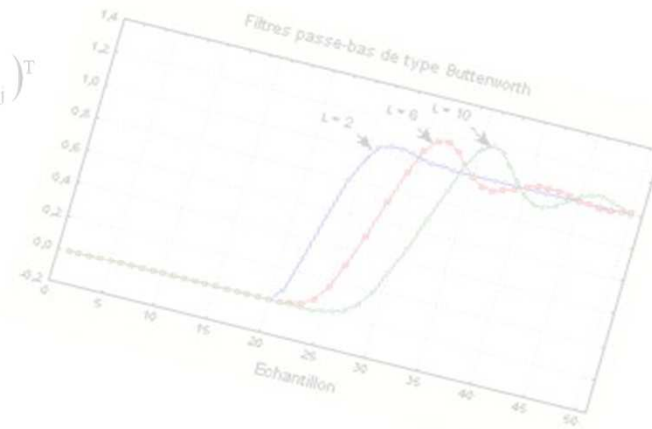
- méthodes "off-line"
- expérience acquise non-valorisée
- résultats difficilement analysables
- formation de l'opérateur





$$V_j = \frac{1}{m_{Y_j}} \sum_{x_i \in Y_j} m_{x_i} (x_i - g_j)(x_i - g_j)^T$$

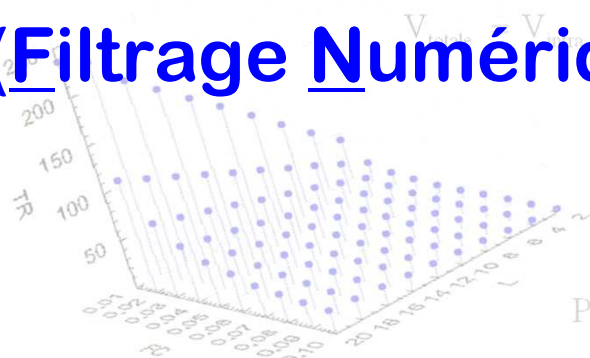
- région normale
- saut (-) VAR1
- saut (+) VAR1
- △ saut (-) VAR2
- + saut (+) VAR2
- \* saut (-) VAR3
- saut (+) VAR3



# Méthodologie FNAD

$$\underset{(u)}{\text{maximiser}} \left( \frac{uBu^T}{uWu^T} \right)$$

## (Filtrage Numérique et Analyse Discriminante)



$$P(Y_k | X) = \frac{P_k f_k(x)}{\sum_{k=1}^q P_k f_k(x)}$$

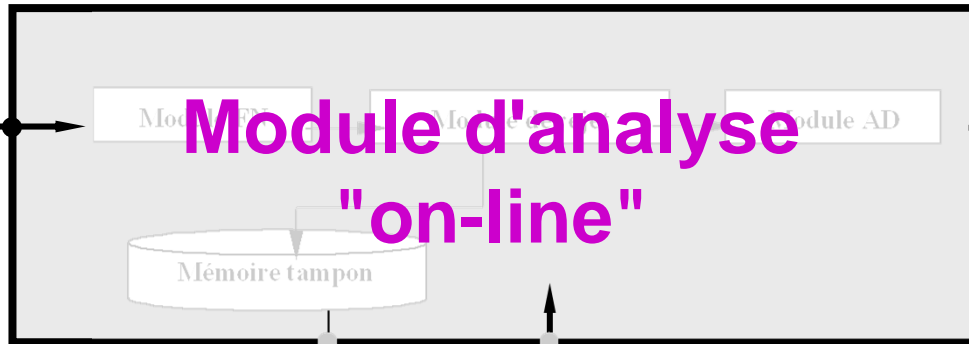


Processus multivarié

# Schéma fonctionnel



Données d'entrée

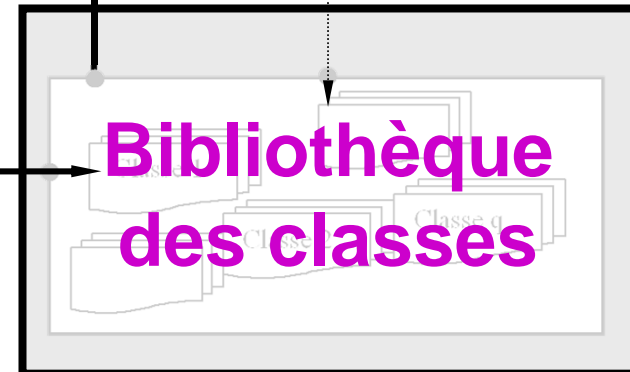
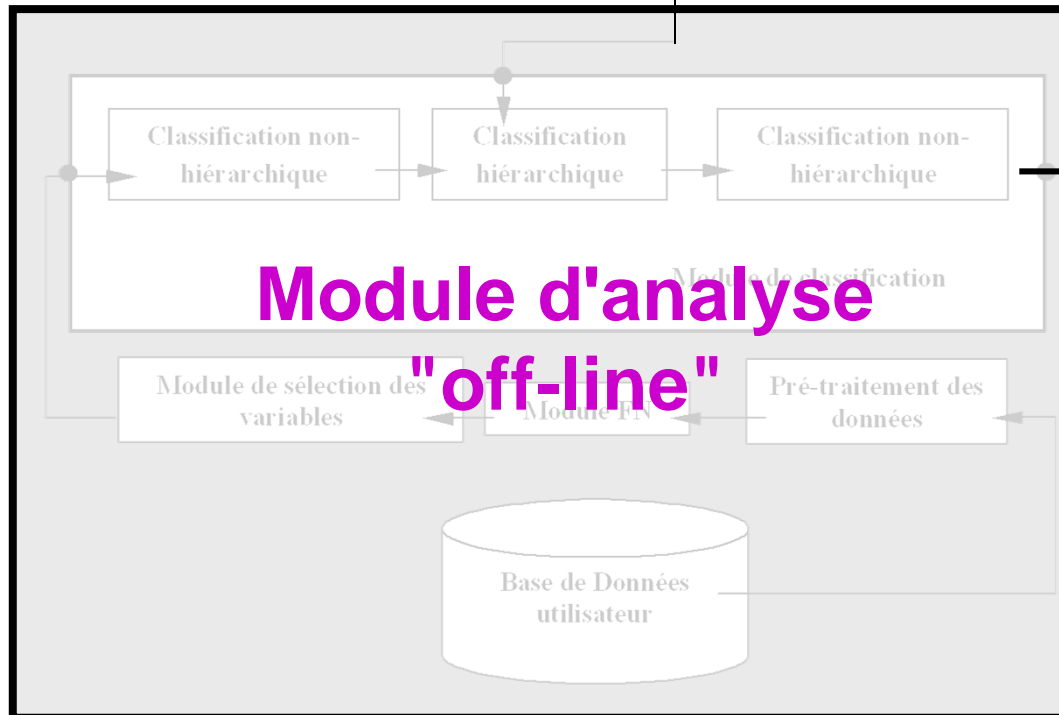


Opérateur

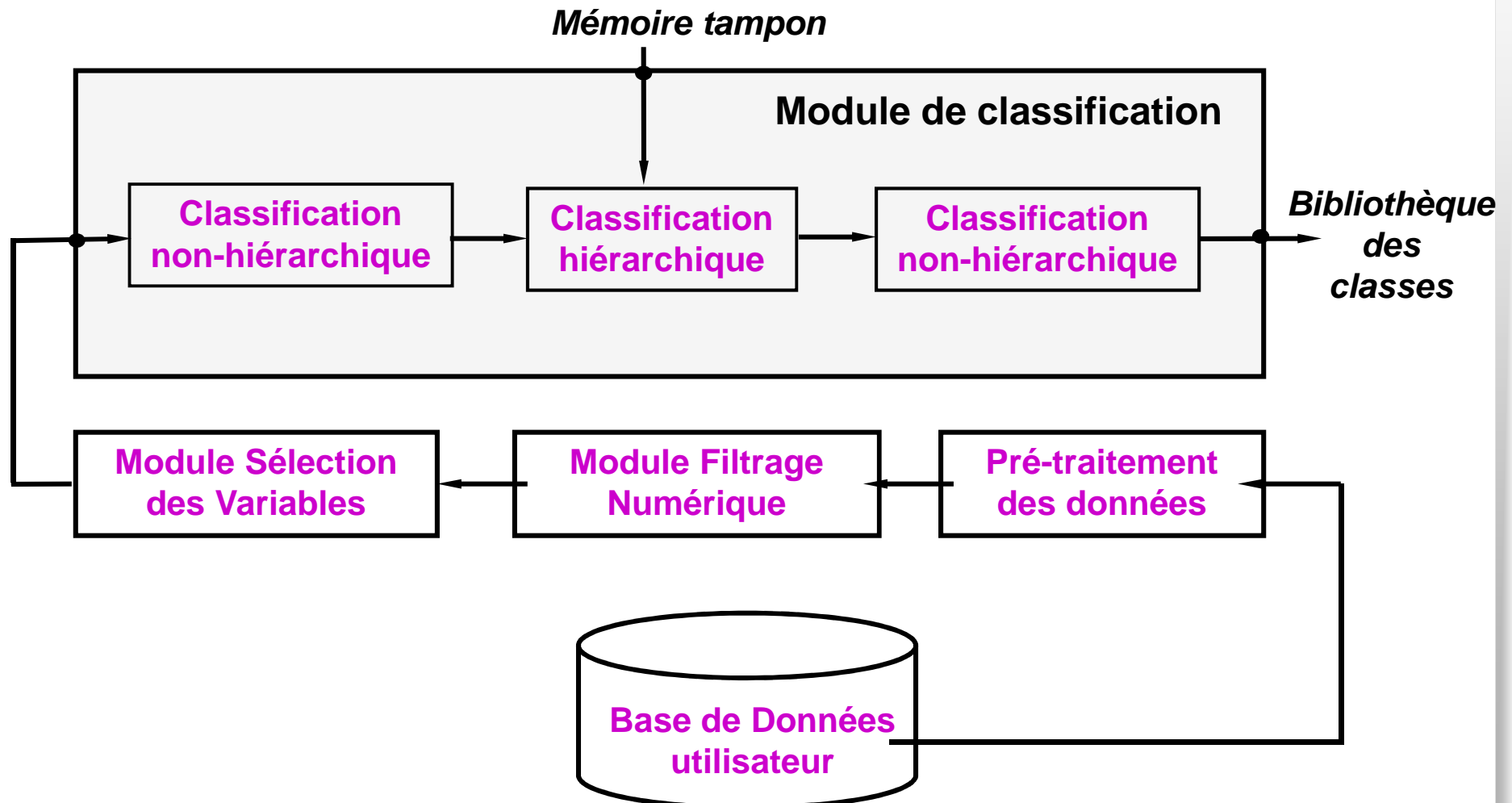


Détection automatique

Actualisation des classes



## Module d'analyse "off-line"



## Module Classification

### Données avant la classification

#### Etape 1: partition préliminaire

- autour des centres mobiles
- nuées dynamiques

#### Etape 2.a:

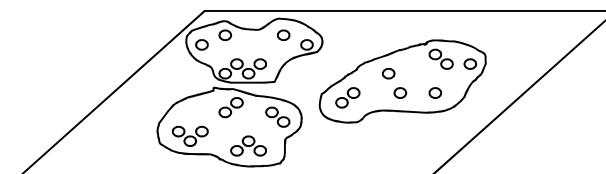
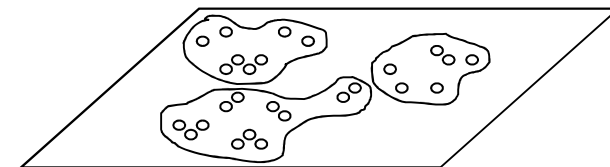
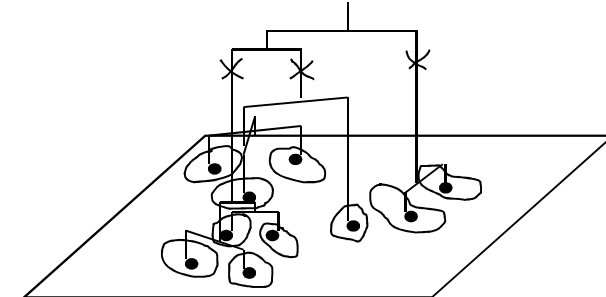
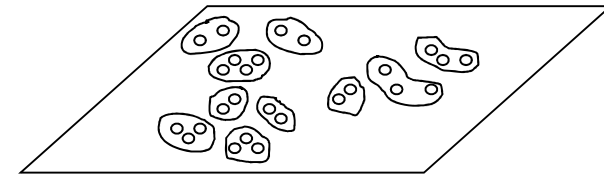
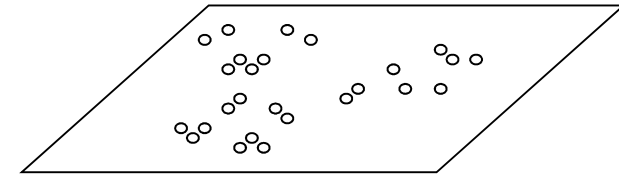
- classification hiérarchique ascendante sur les centres de classes obtenues à l'étape 1

#### Etape 2.b:

- partition en trois classes après la coupure de l'arbre

#### Etape 3:

- "consolidation" par réaffectation

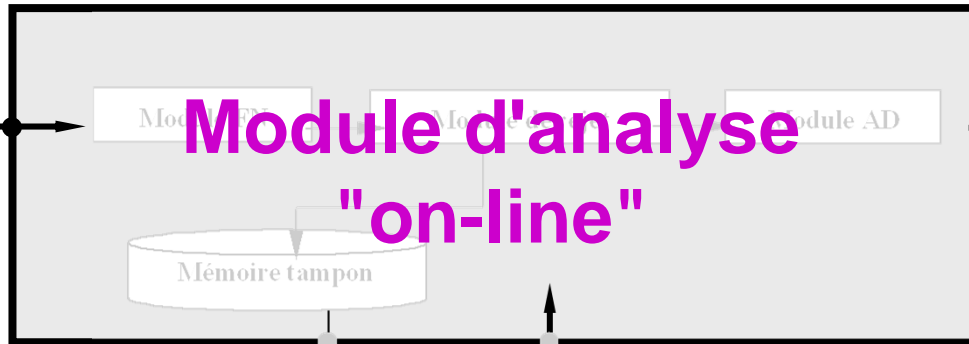


Processus multivarié

# Schéma fonctionnel



Données d'entrée

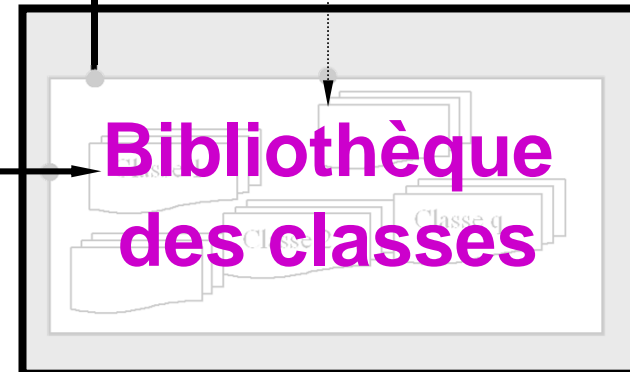
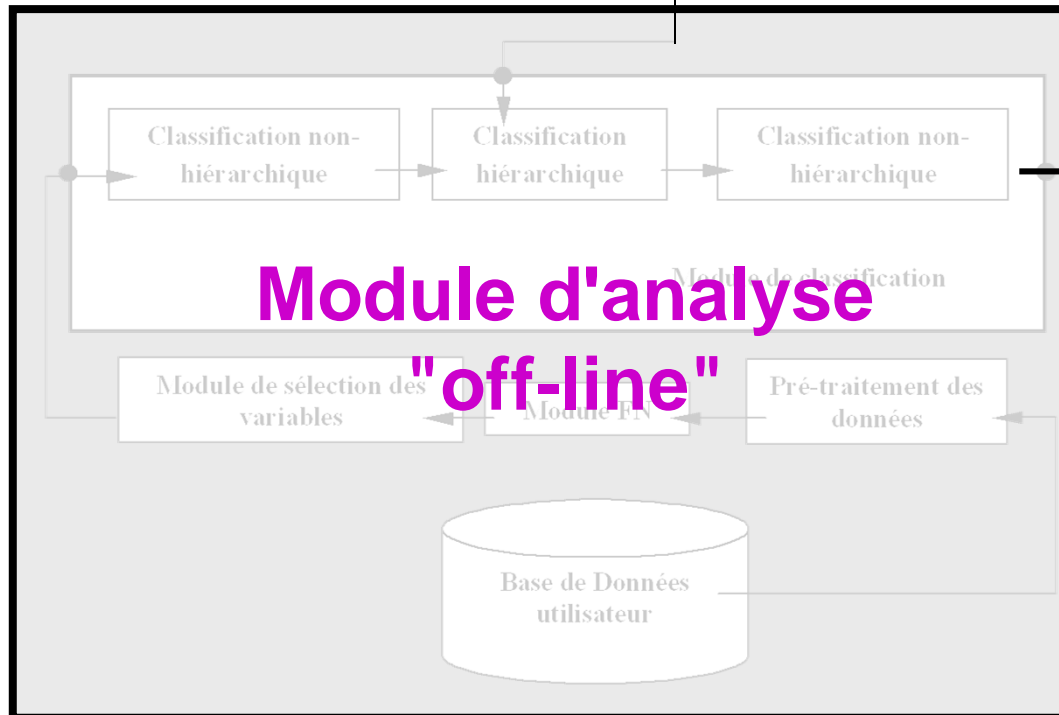


Opérateur

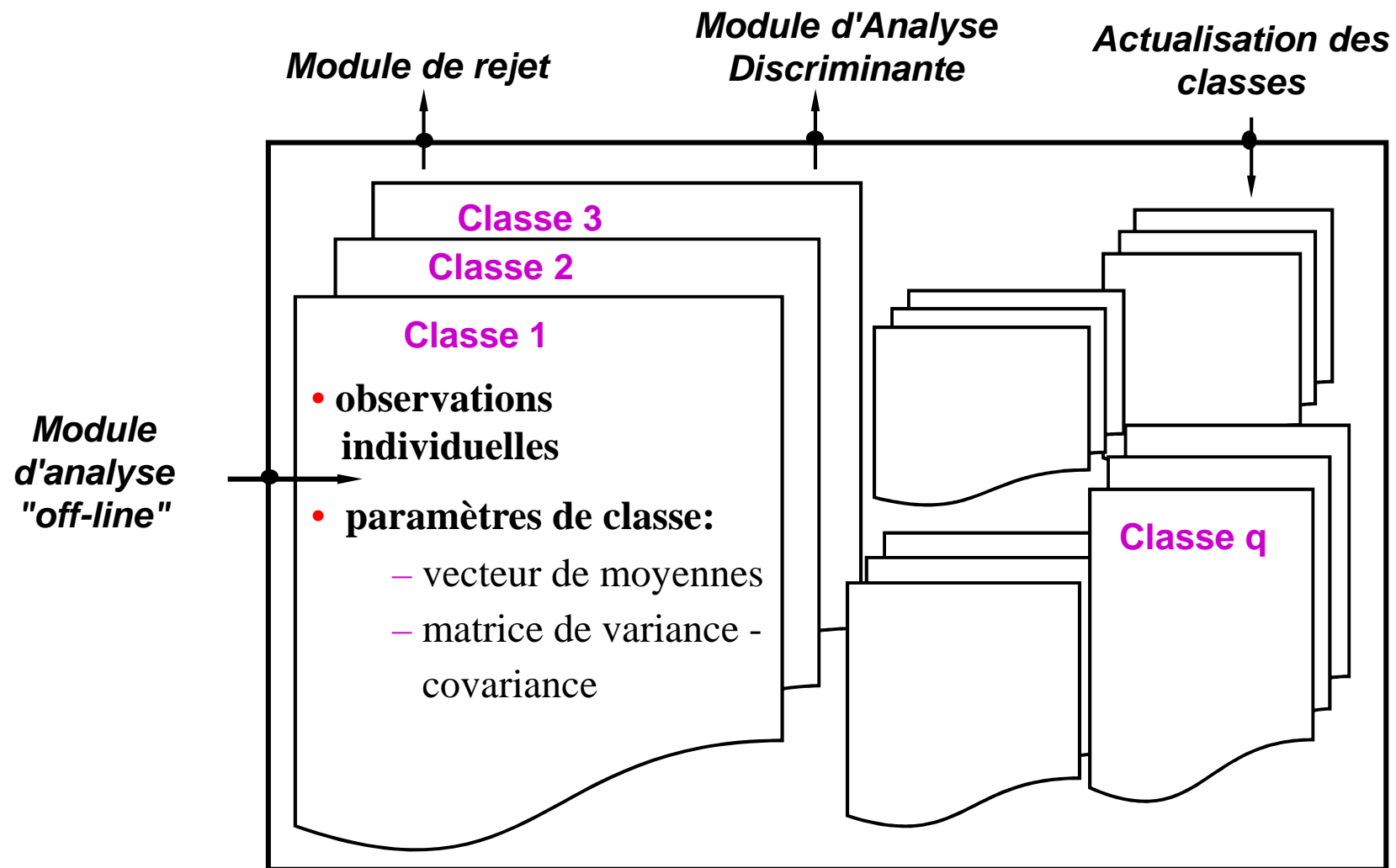


Détection automatique

Actualisation des classes

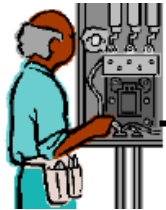


# Bibliothèque des classes

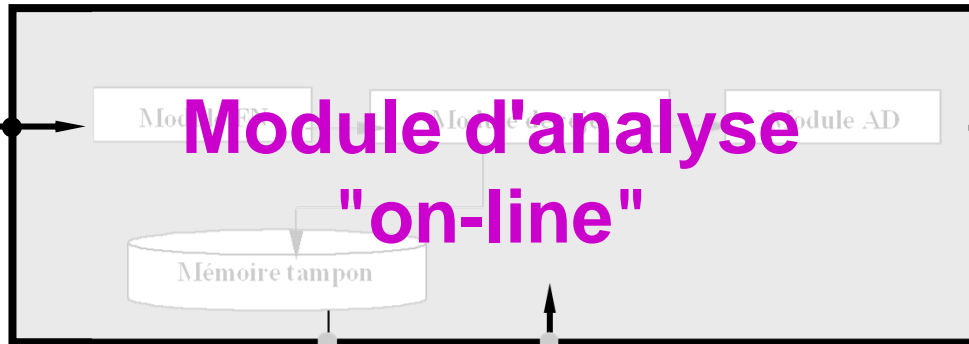


### Processus multivarié

# Schéma fonctionnel



Données d'entrée

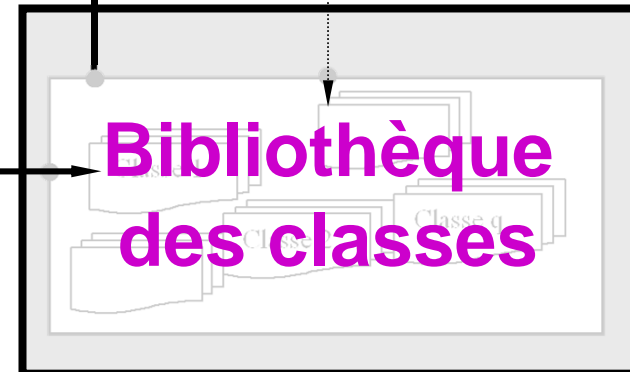
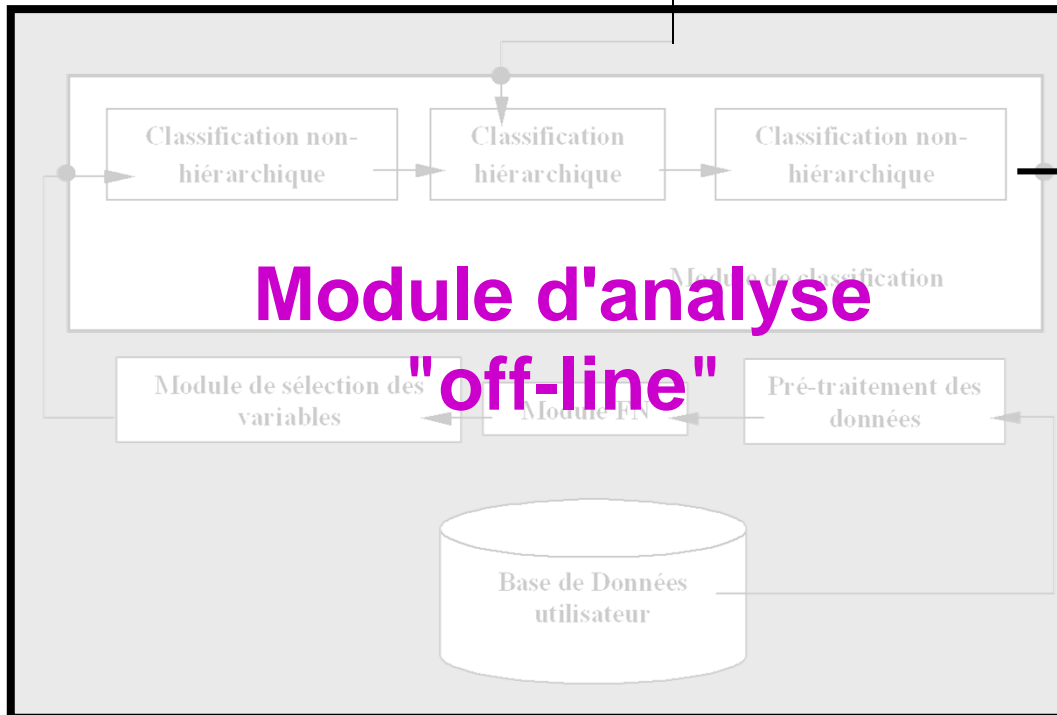


Opérateur

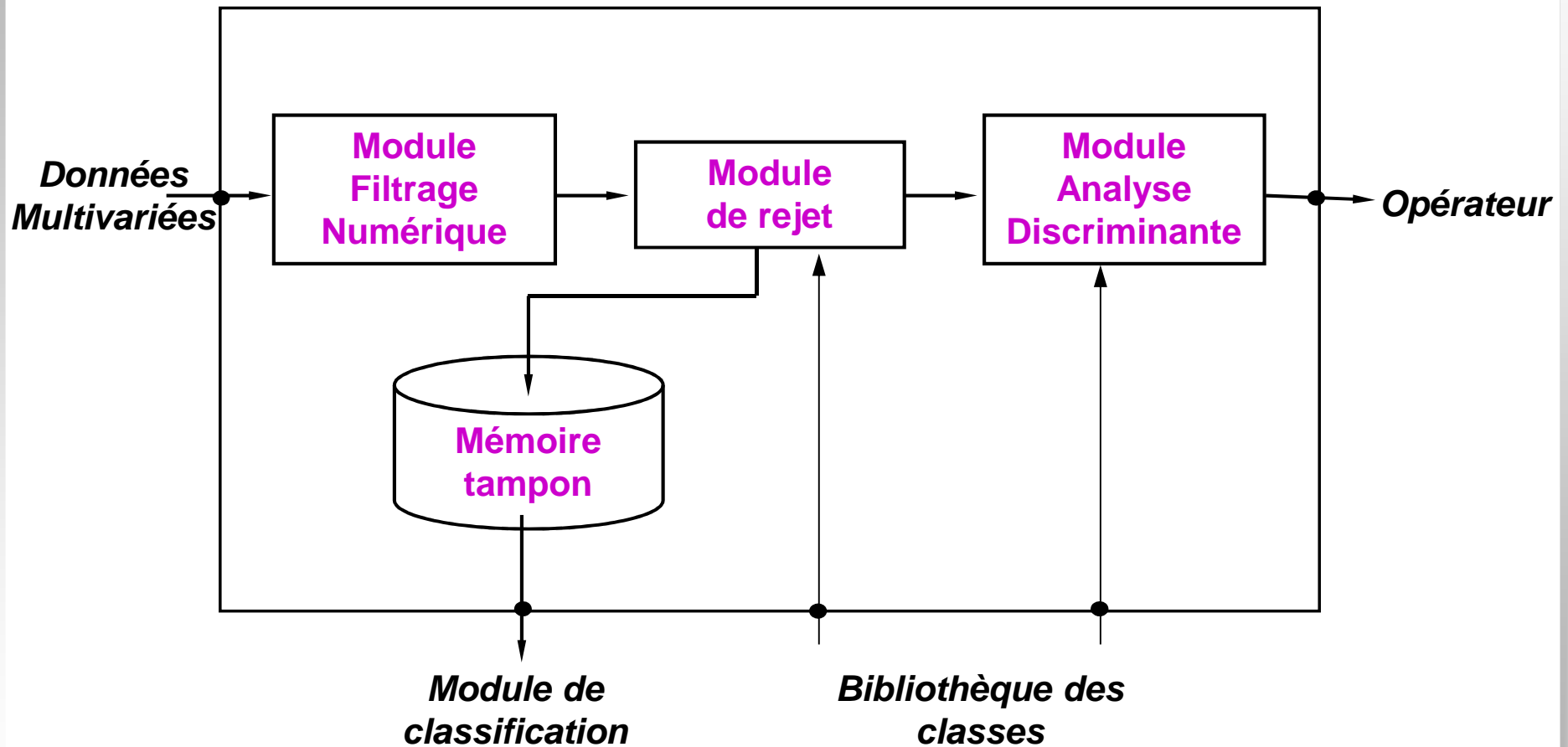


Détection automatique

Actualisation des classes

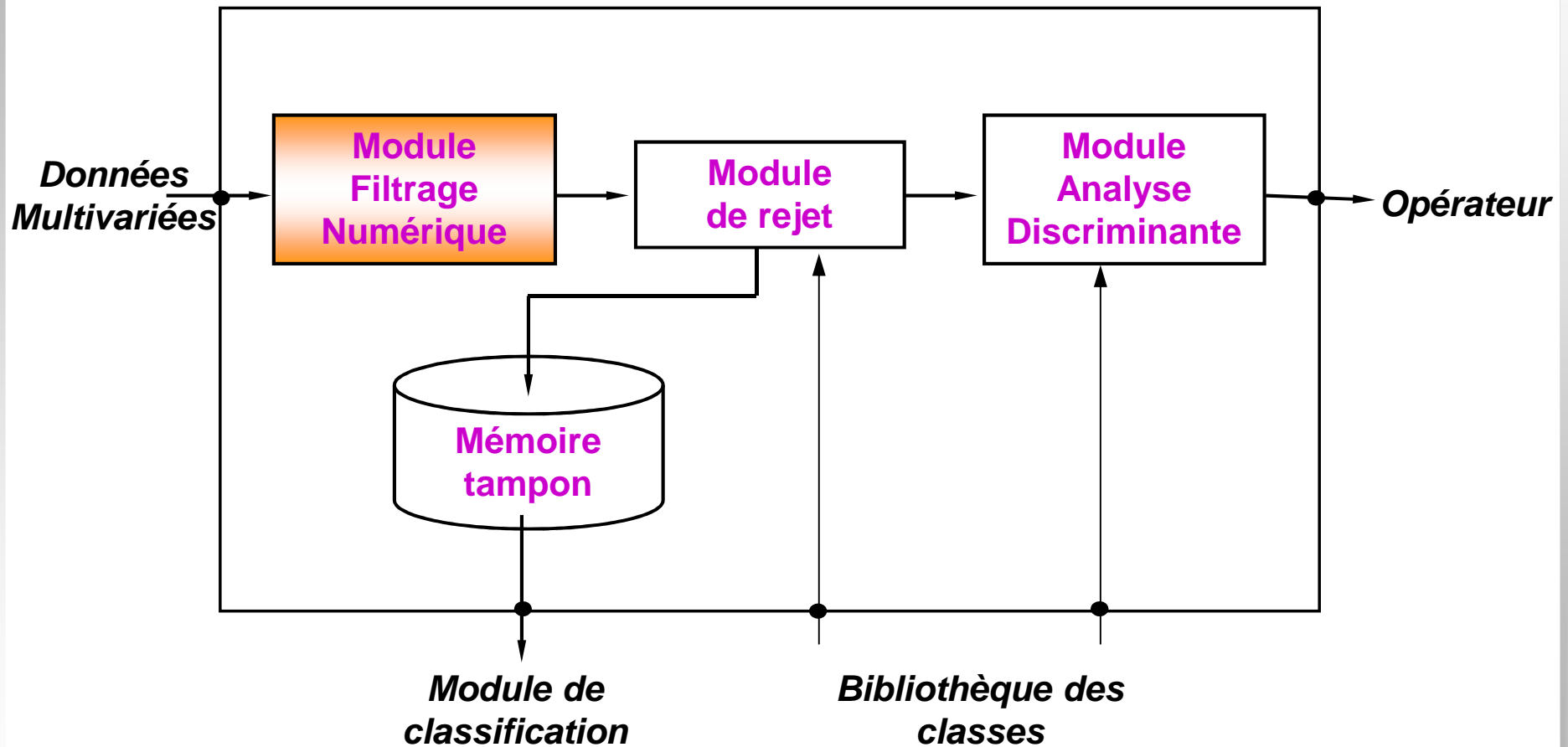


## Module d'analyse "on-line"





## Module d'analyse "on-line"



# Module Filtrage Numérique

- **Types des filtres**

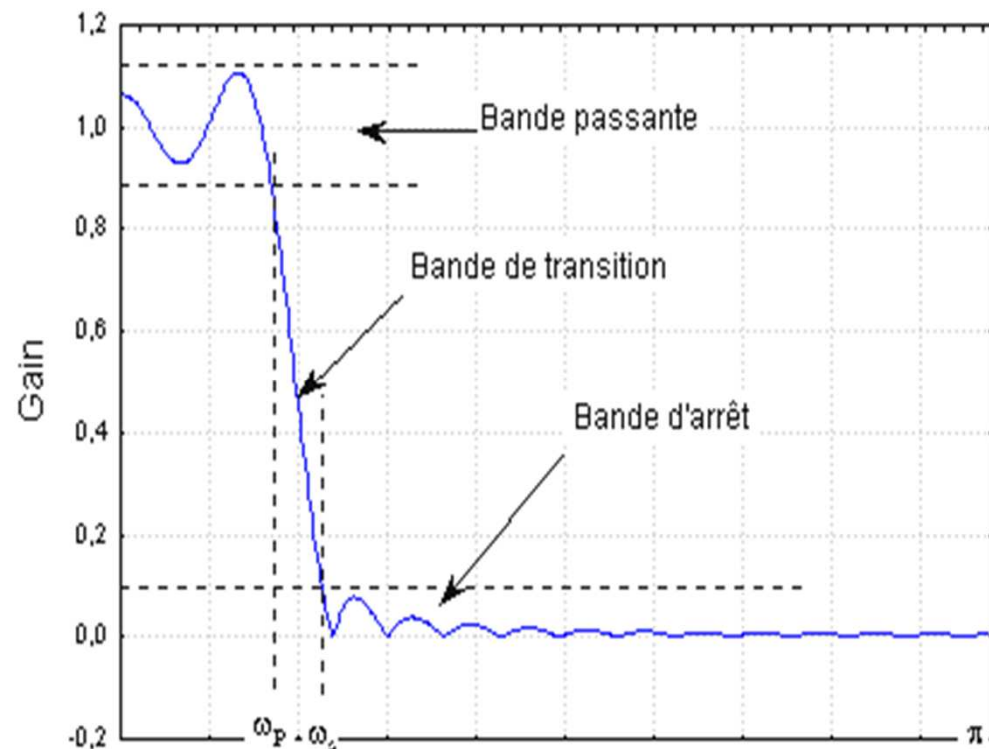
- passe-bas
- passe-haut
- coupe-bande
- passe-bande

- **Caractéristiques des filtres**

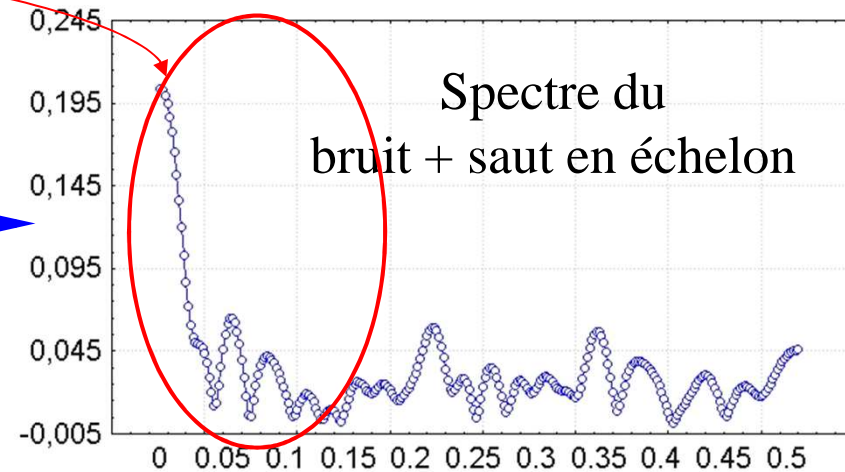
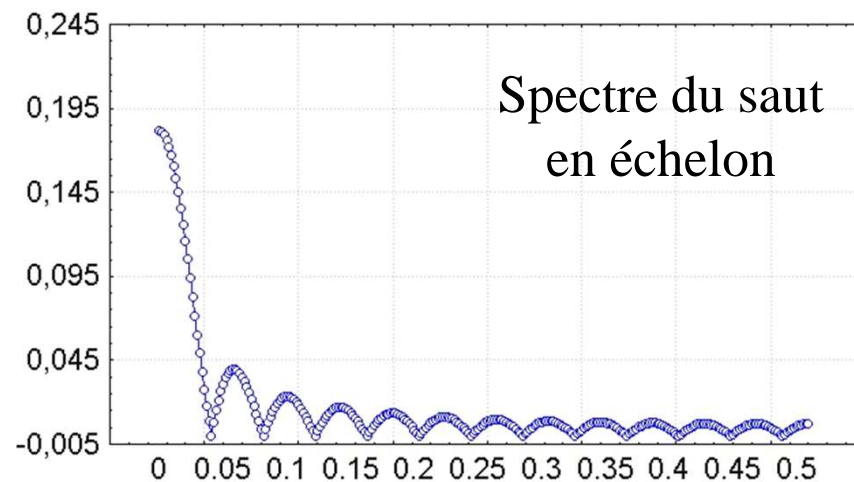
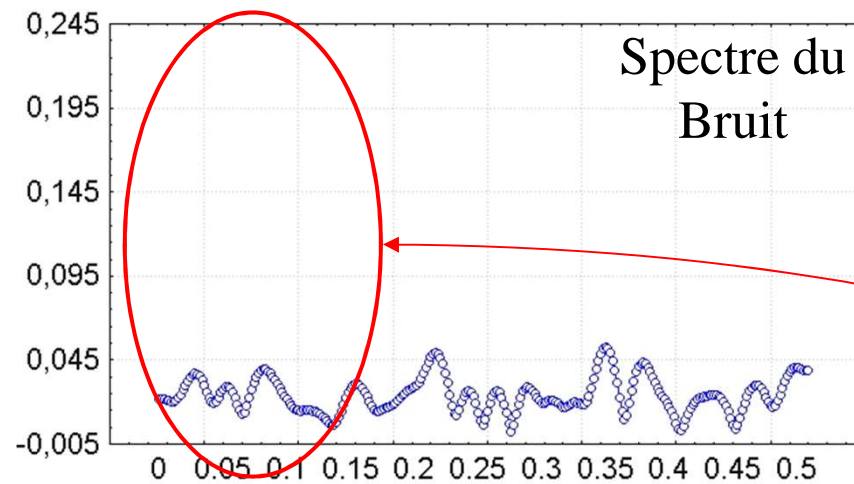
- bande de passage
- bande de transition
- bande d'arrêt

- **Réponse Impulsionnelle**

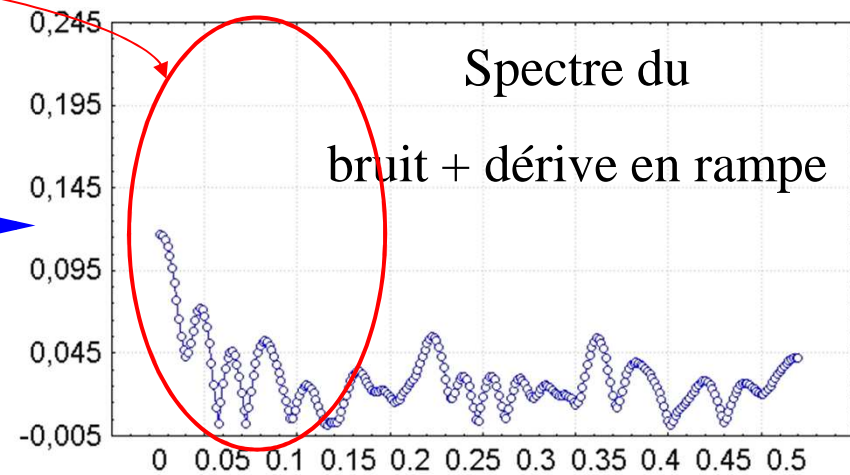
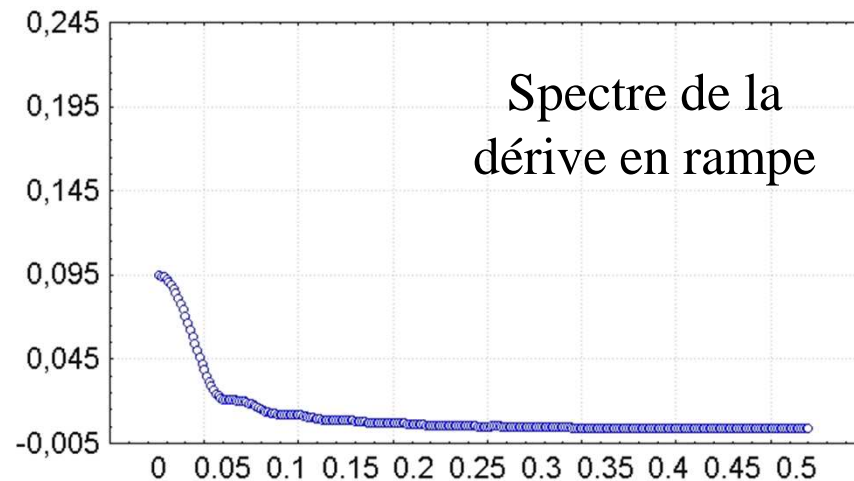
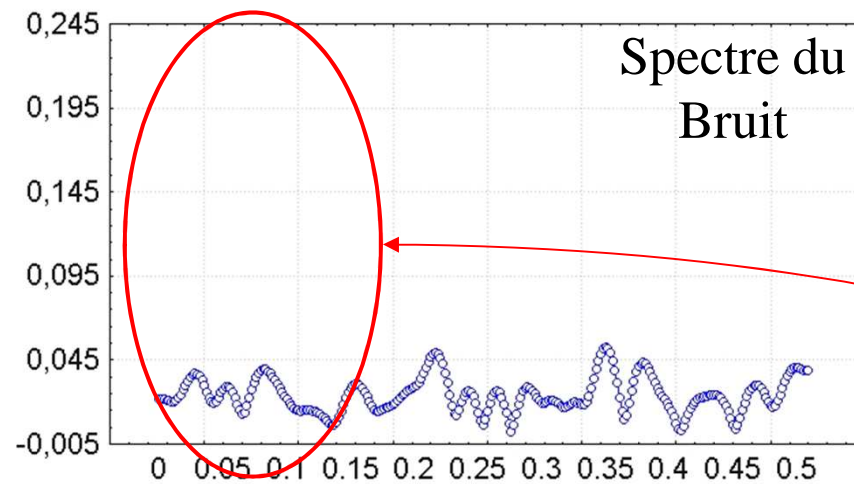
- RII
- RIF



# Analyse spectrale des causes de variation (1)



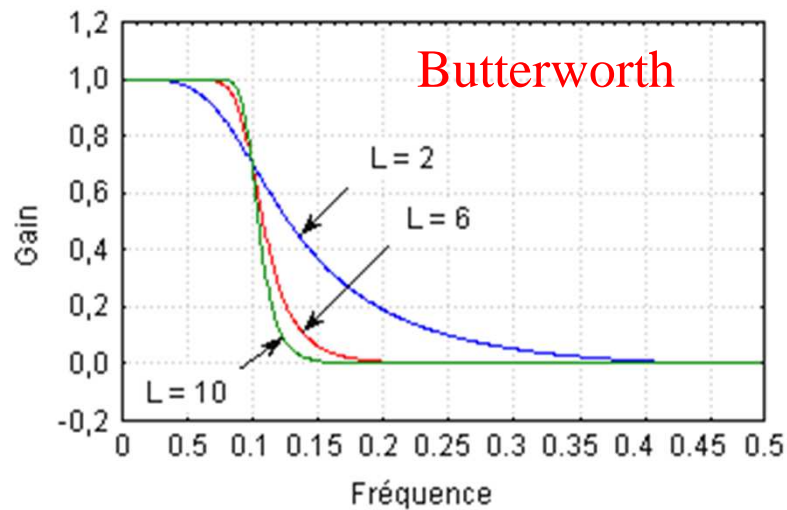
## Analyse spectrale des causes de variation (2)



## En résumé...

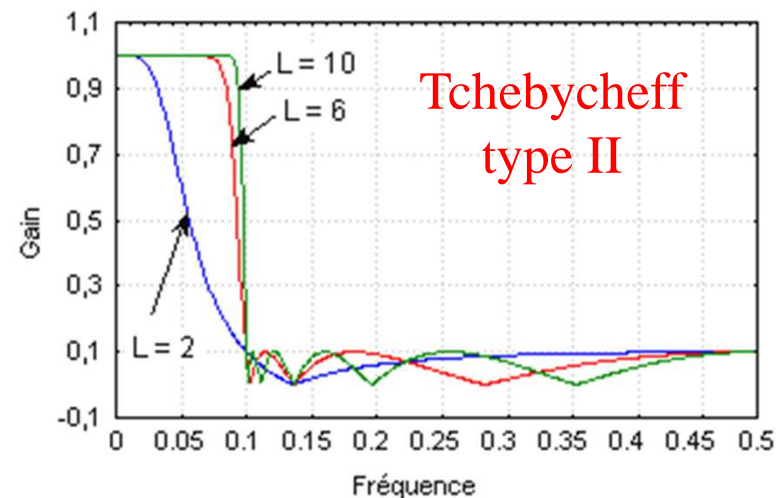
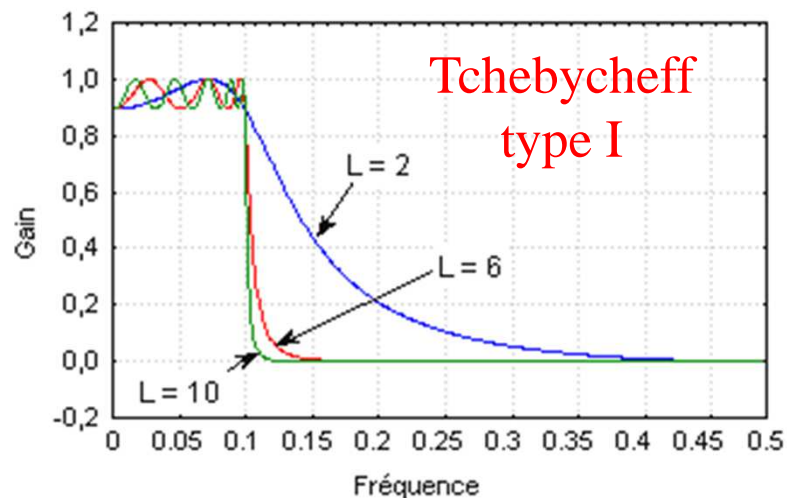
- **Utilisation des filtres passe-bas**
  - élimine les hautes fréquences
  - garde les basses fréquences
  - mette en évidence la cause assignable

## Choix du filtre numérique passe-bas (1)

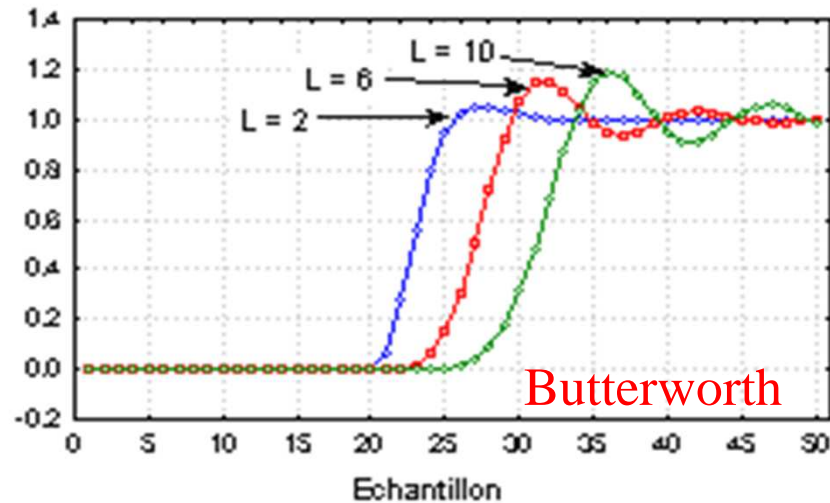


- **Critères de sélection en fréquence**

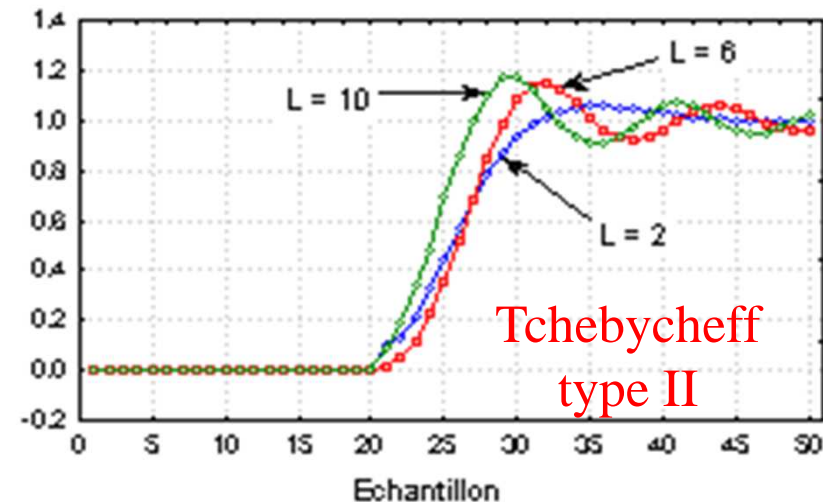
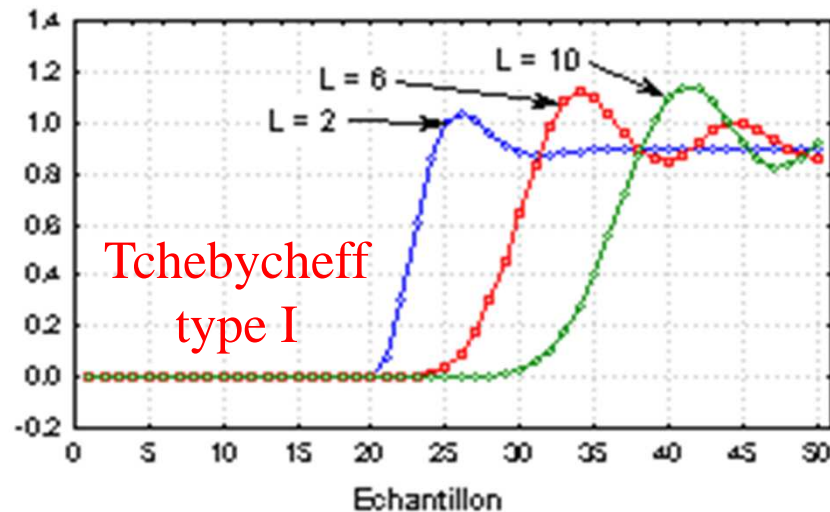
- bande de transition étroite
- sans ondulations dans la bande passante
- bonne atténuation dans la bande d'arrêt



## Choix du filtre numérique passe-bas (2)



- Critères de sélection en temps
  - temps de réponse court
  - sans distorsions
  - phase linéaire



## En résumé...

- **Utilisation des filtres Butterworth**

- pas d'ondulation dans la bande passante et dans la bande d'arrêt
- bonne atténuation dans la bande d'arrêt
- temps de réponse court
- distorsions réduites

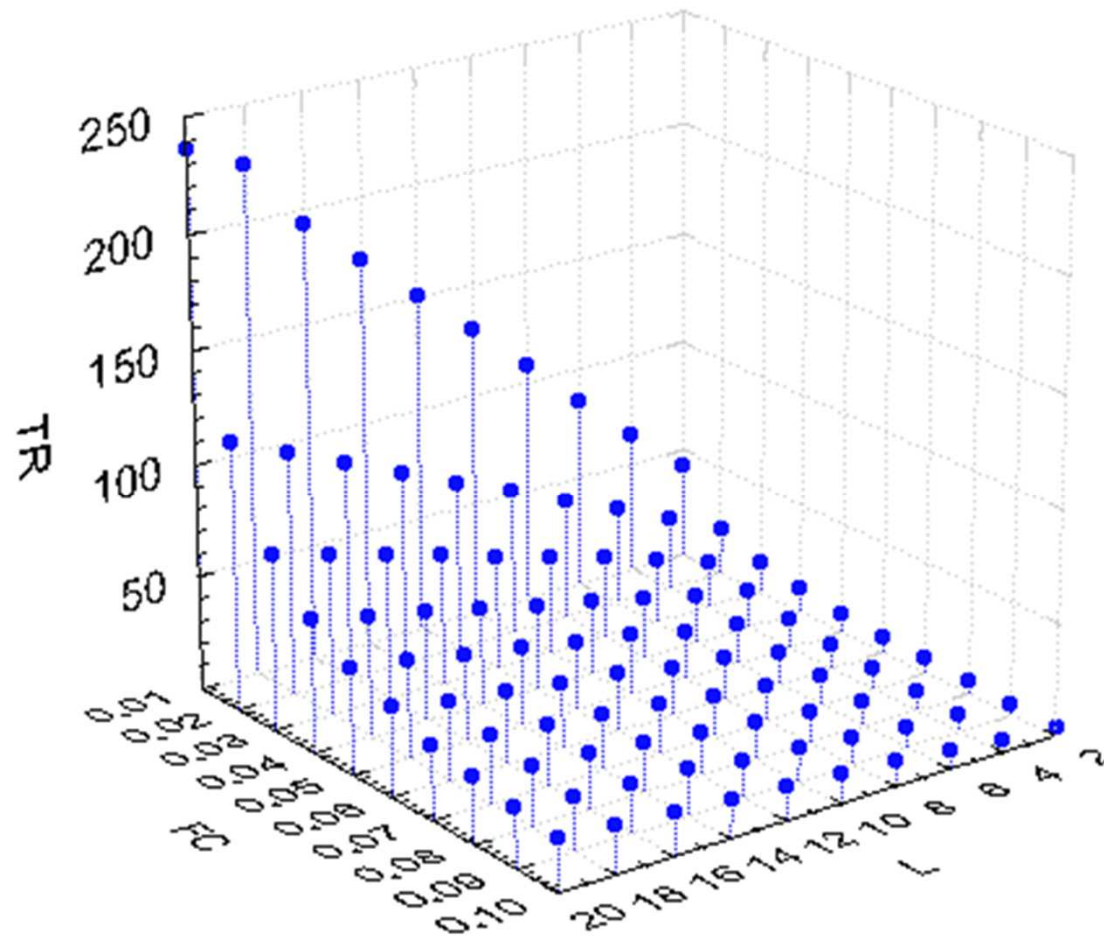


## Choix des paramètres du filtre (1)

- **Paramètres à définir**
  - Ordre ( $L$ )
  - Fréquence de coupure ( $FC$ )
- **Contraintes**
  - Temps de réponse ( $TR$ )
  - Taux d'erreur de classification ( $\%Err$ )

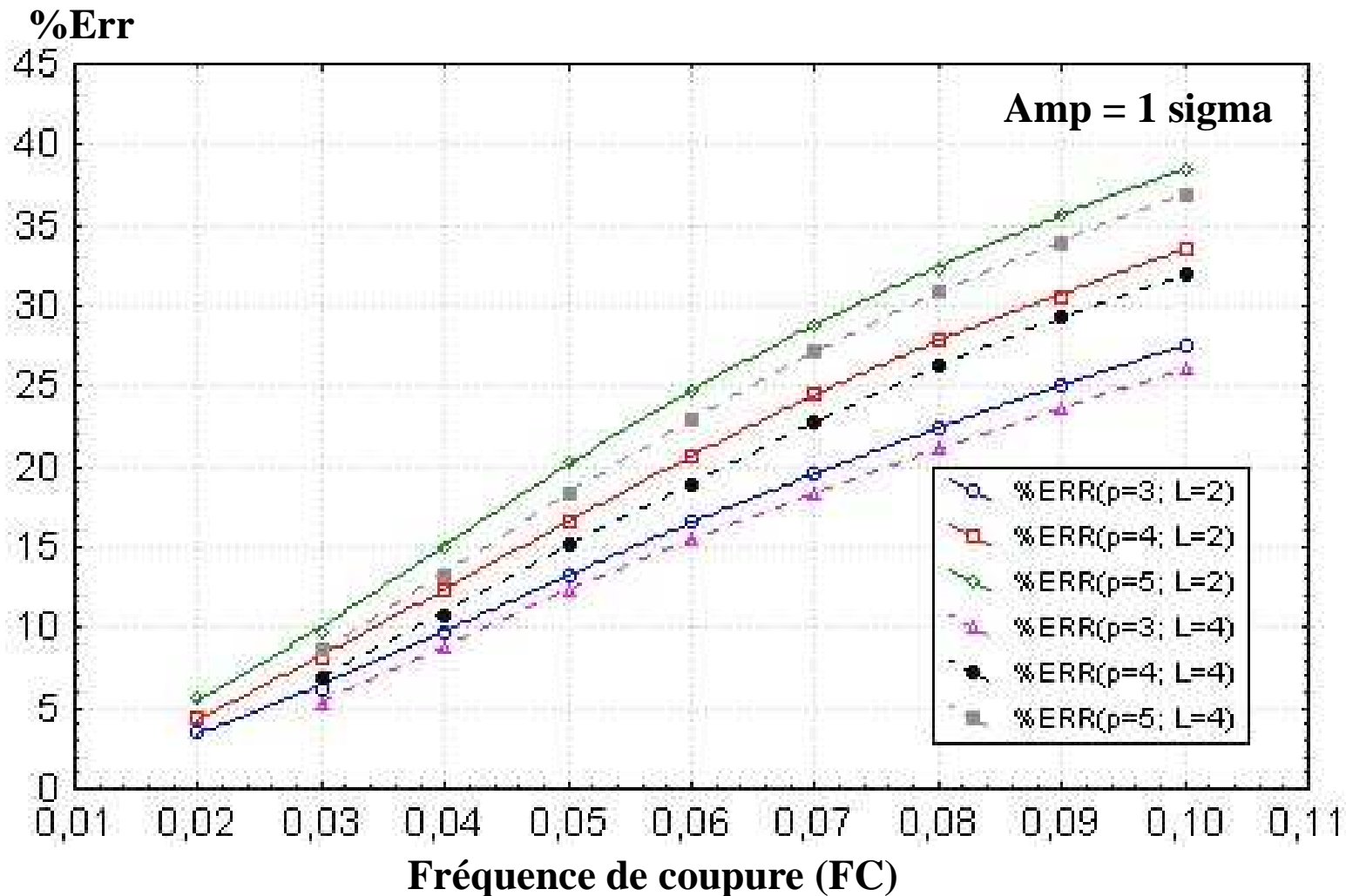
## Choix des paramètres du filtre (2)

- L'influence de **L** et **FC** sur **TR**



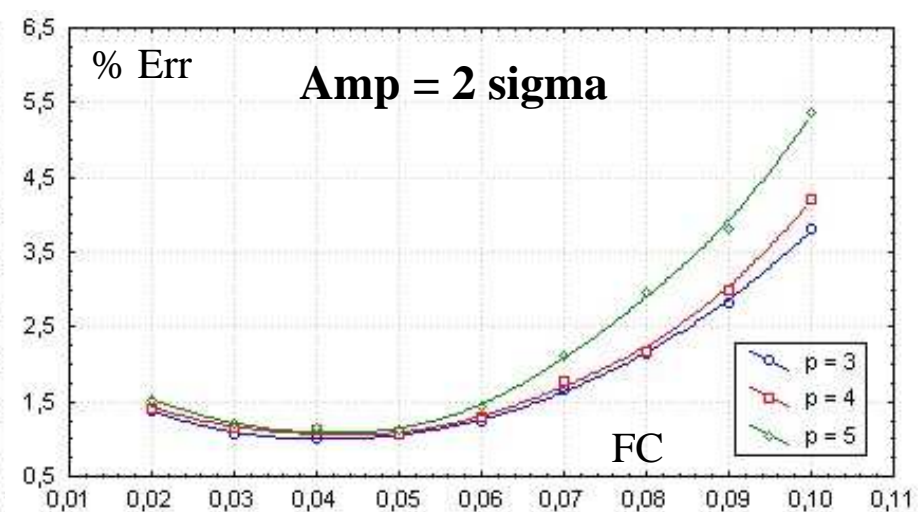
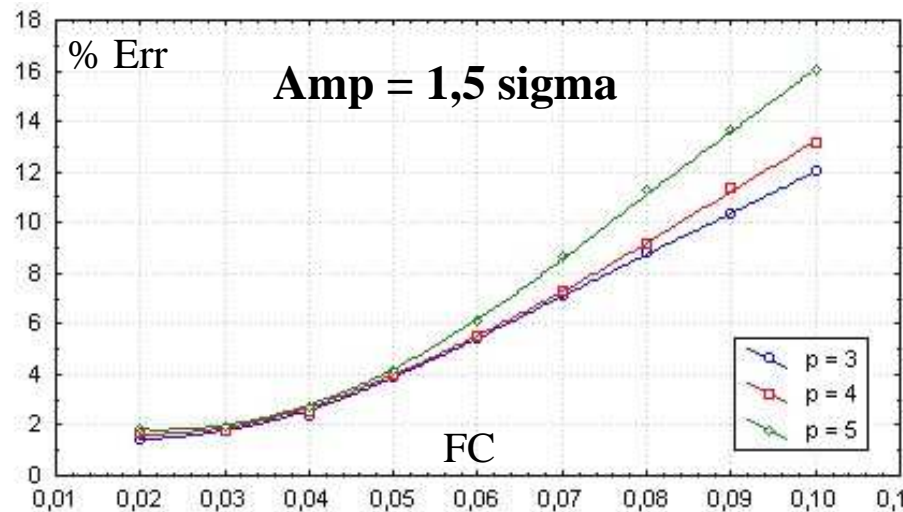
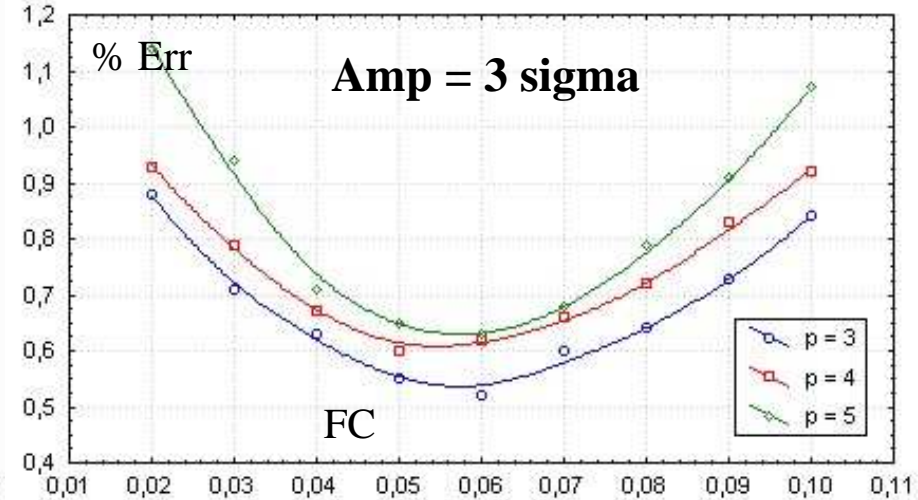
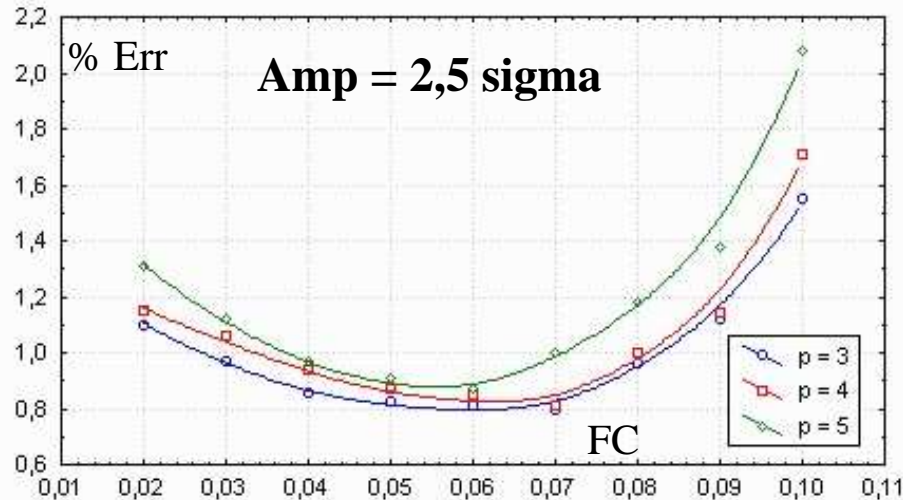
## Choix des paramètres du filtre (3)

- L'influence de **L** et **FC** sur **%Err**

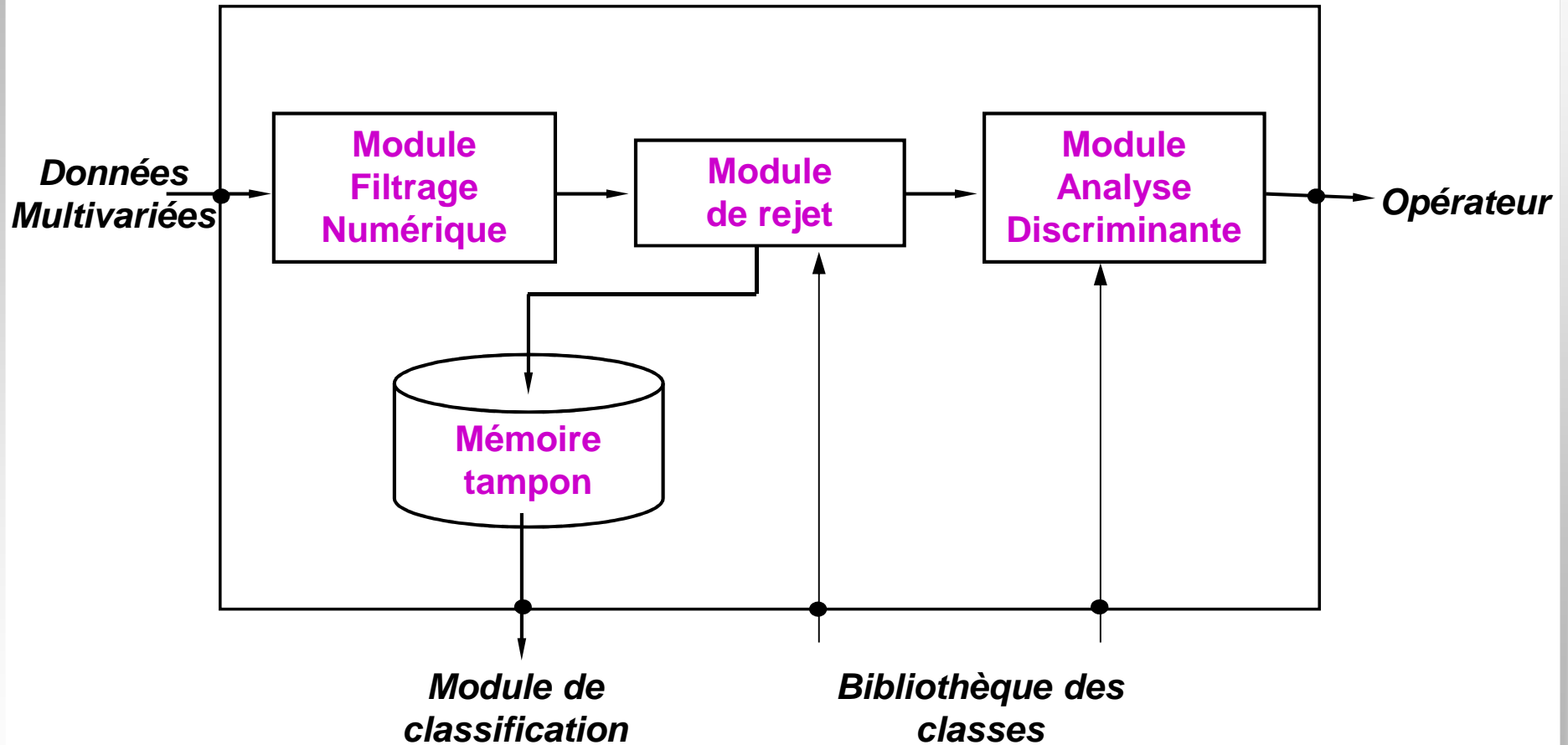


## Choix des paramètres du filtre (4)

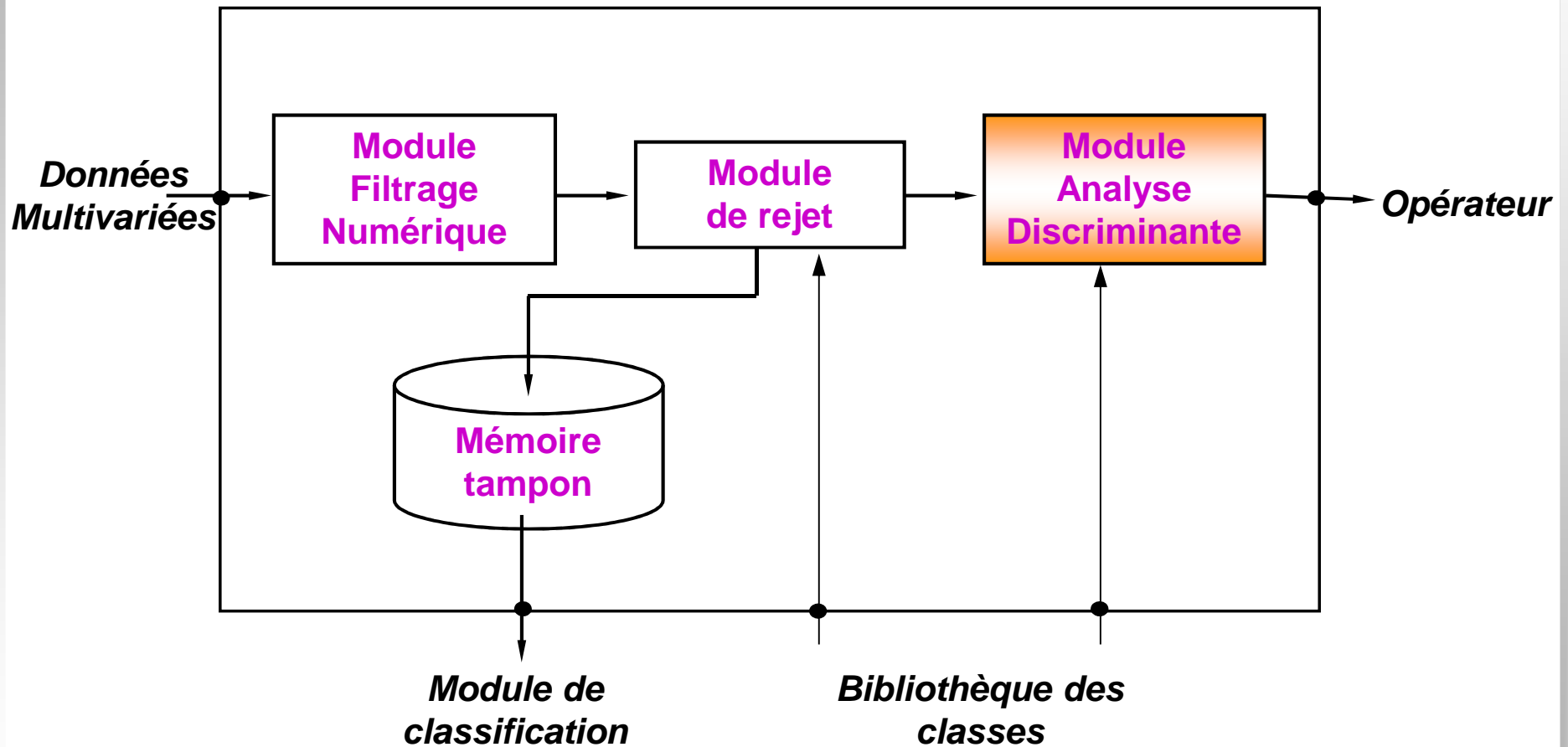
- L'influence de FC sur %Err



## Module d'analyse "on-line"

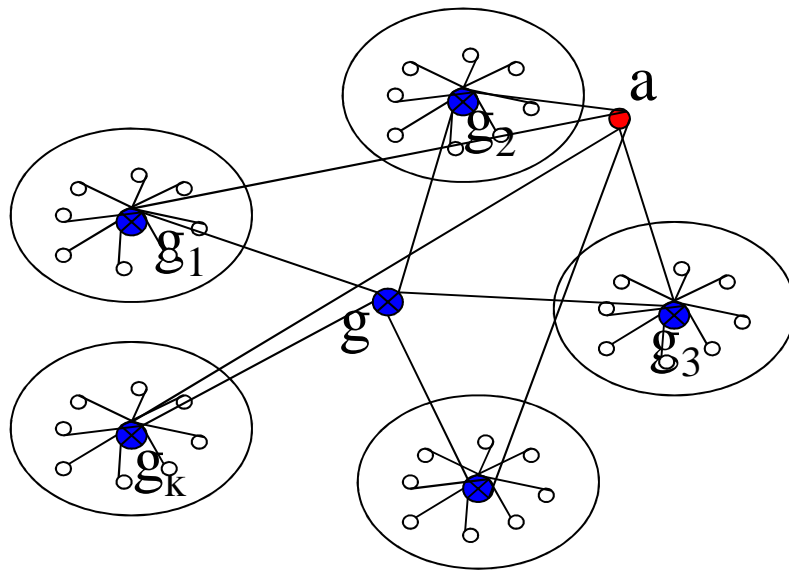


## Module d'analyse "on-line"



## Module d'Analyse Discriminante

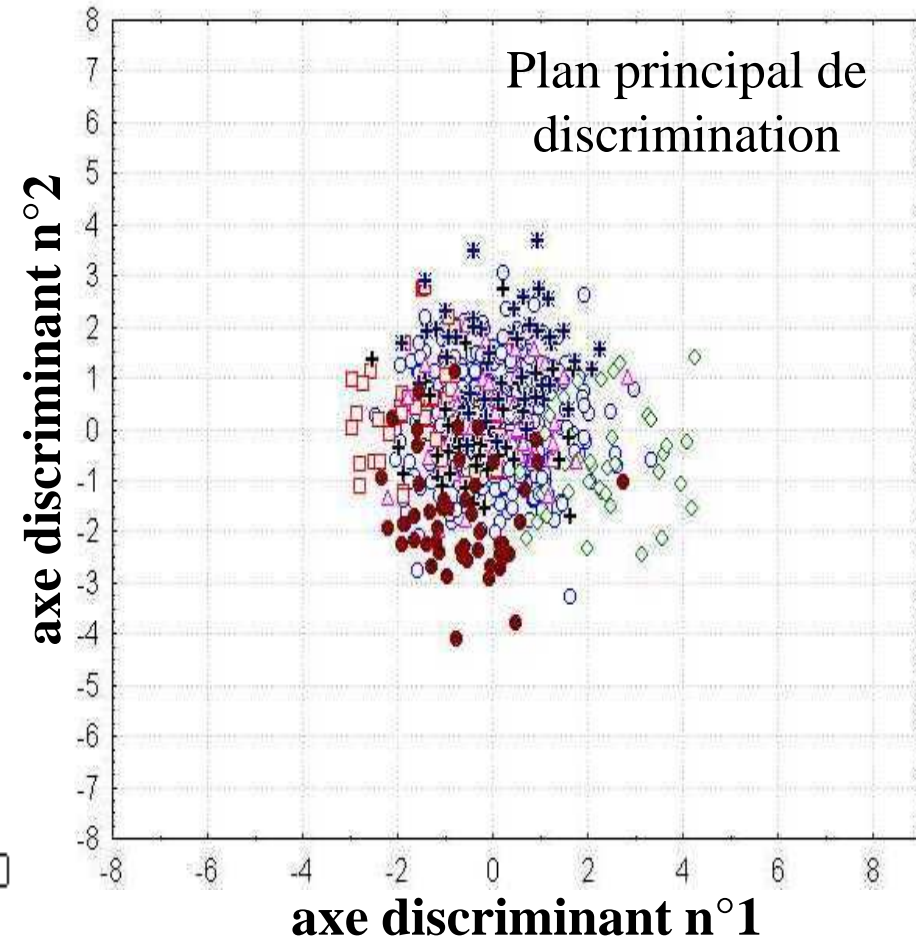
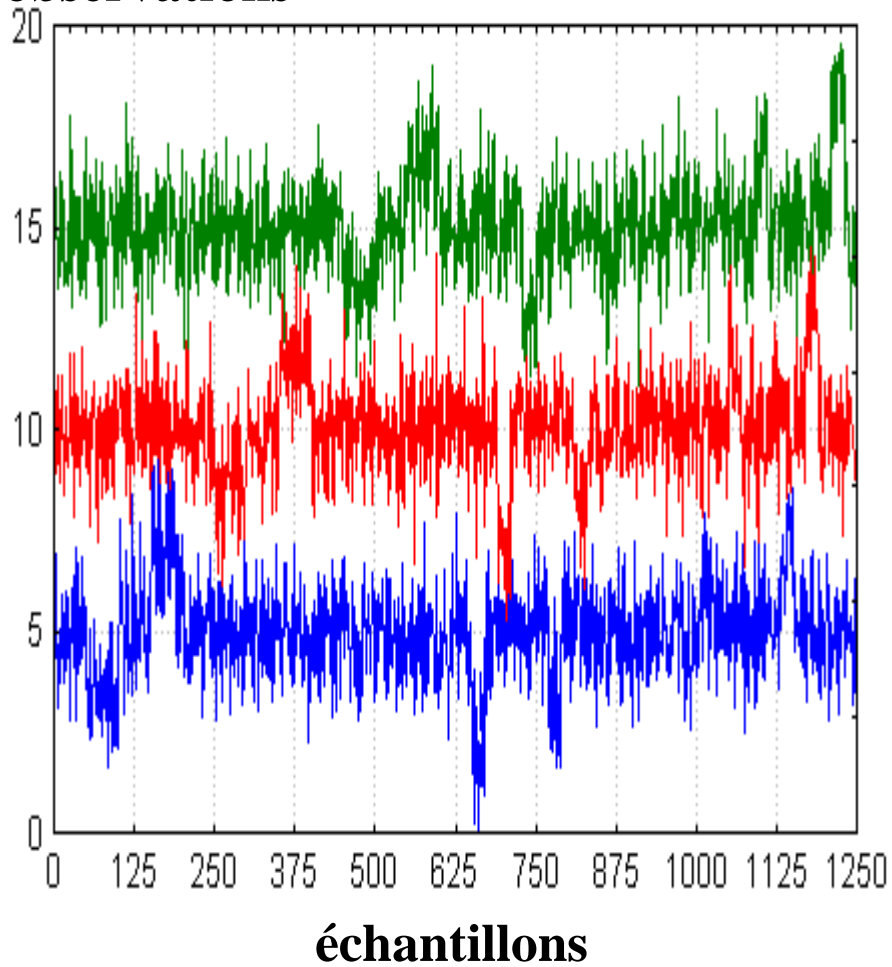
- Aspects de l'analyse discriminante
  - descriptif
  - décisionnel



|     | $V_1$    | ... | $V_p$    | $Y$   |
|-----|----------|-----|----------|-------|
| 1   | $x_{11}$ | ... | $x_{1p}$ | $y_1$ |
| 2   | $x_{21}$ | ... | $x_{2p}$ | $y_2$ |
| :   | $X$      |     |          | :     |
| :   |          |     |          | :     |
| :   |          |     |          | :     |
| :   |          |     |          | :     |
| N   | $x_{N1}$ | ... | $x_{Np}$ | $y_K$ |
| Obs | $x_1^n$  | ... | $x_p^n$  | ?     |

## Exemple 1: 3 variables non-corrélées (1)

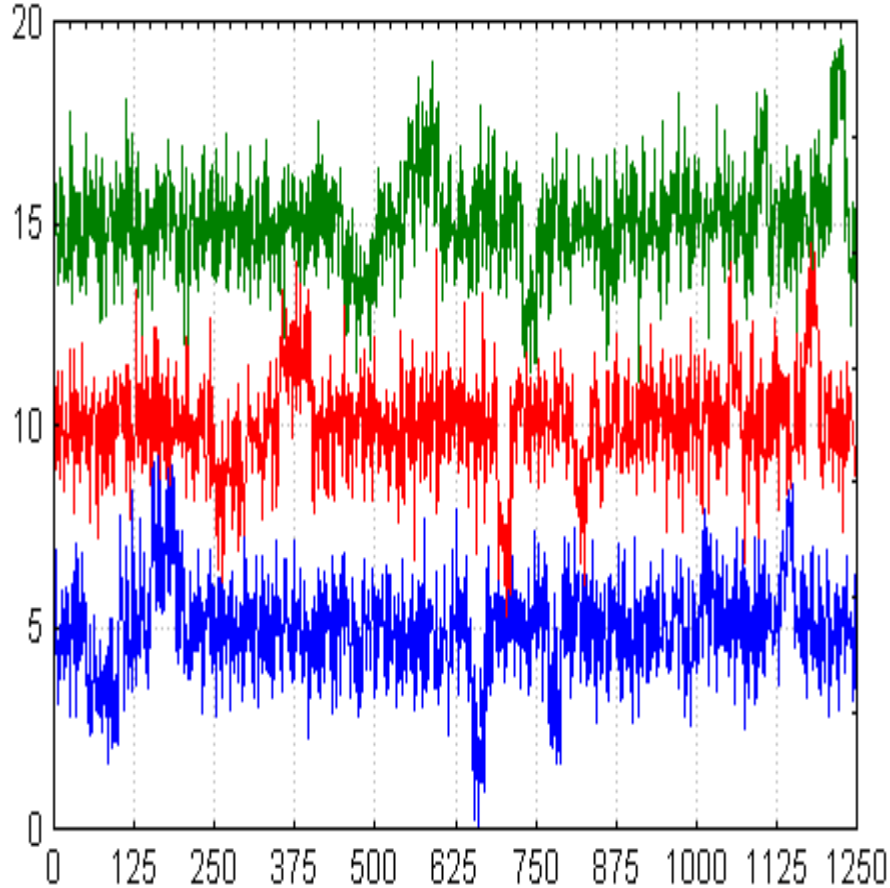
observations





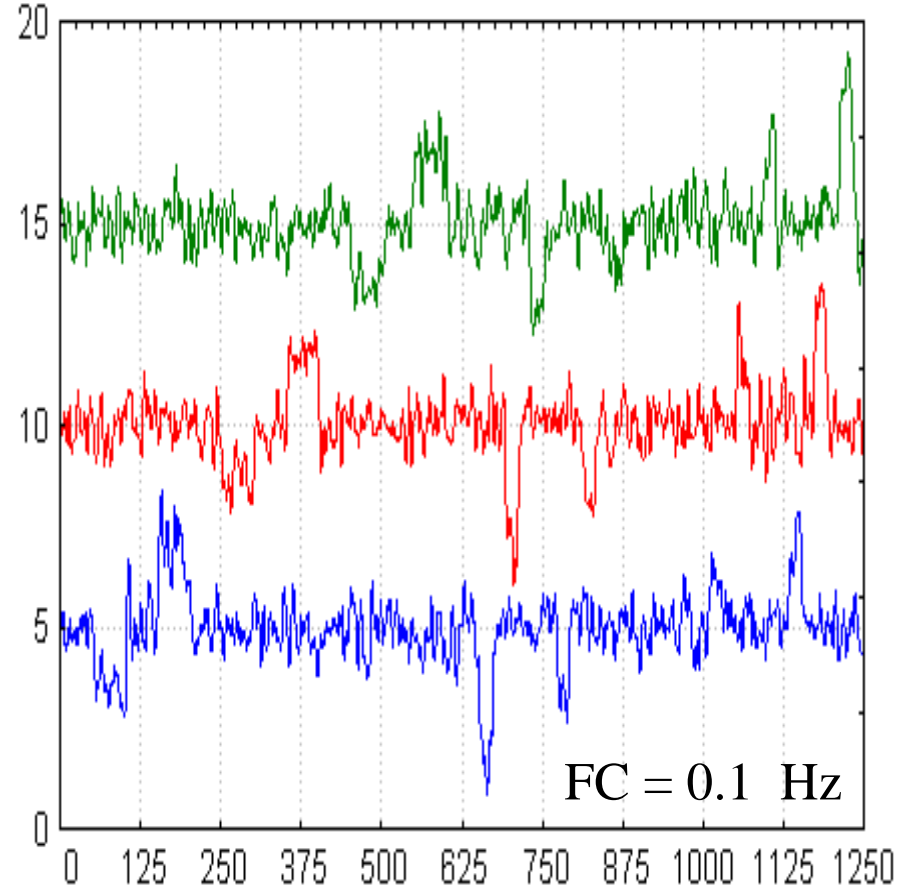
## Exemple 1: 3 variables non-corrélées (2)

observations



échantillons

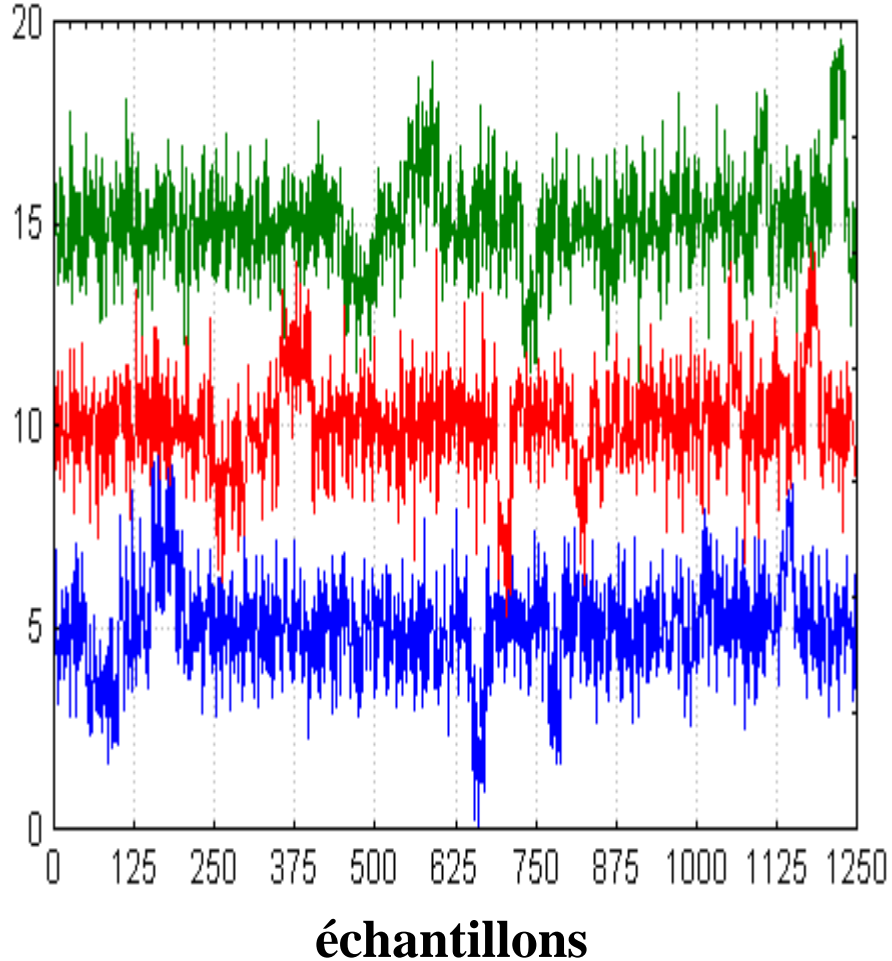
observations



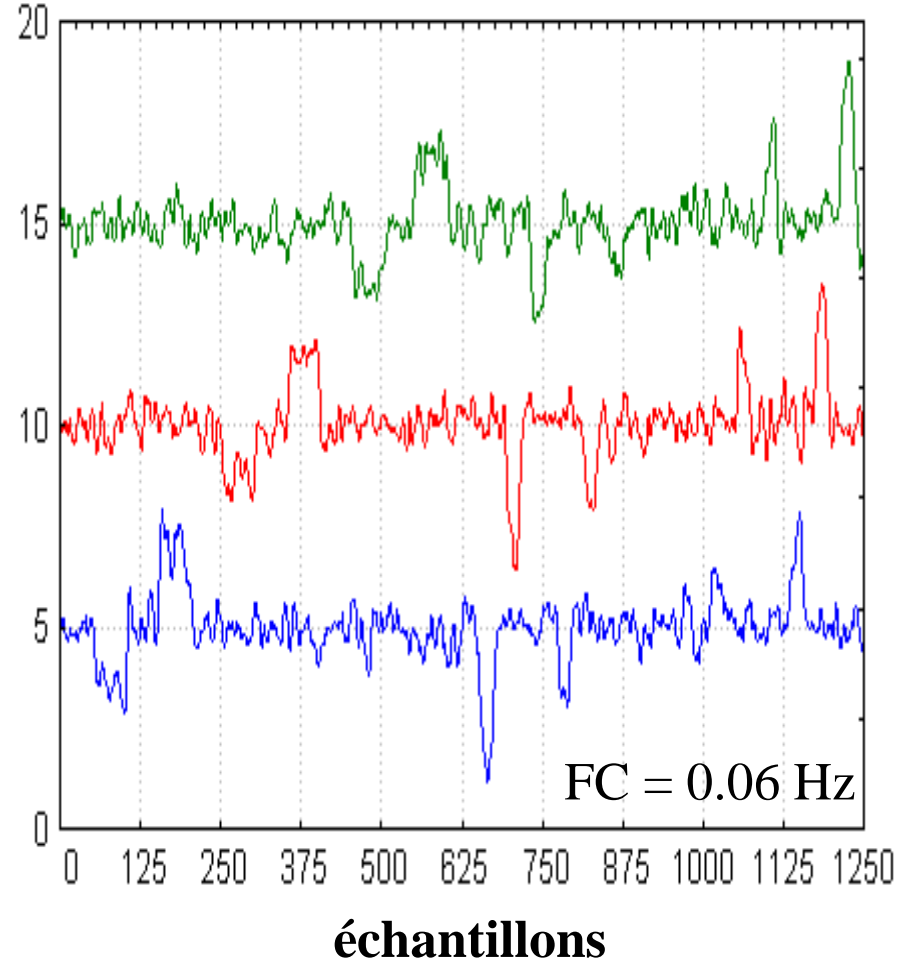
échantillons

## Exemple 1: 3 variables non-corrélées (2)

observations

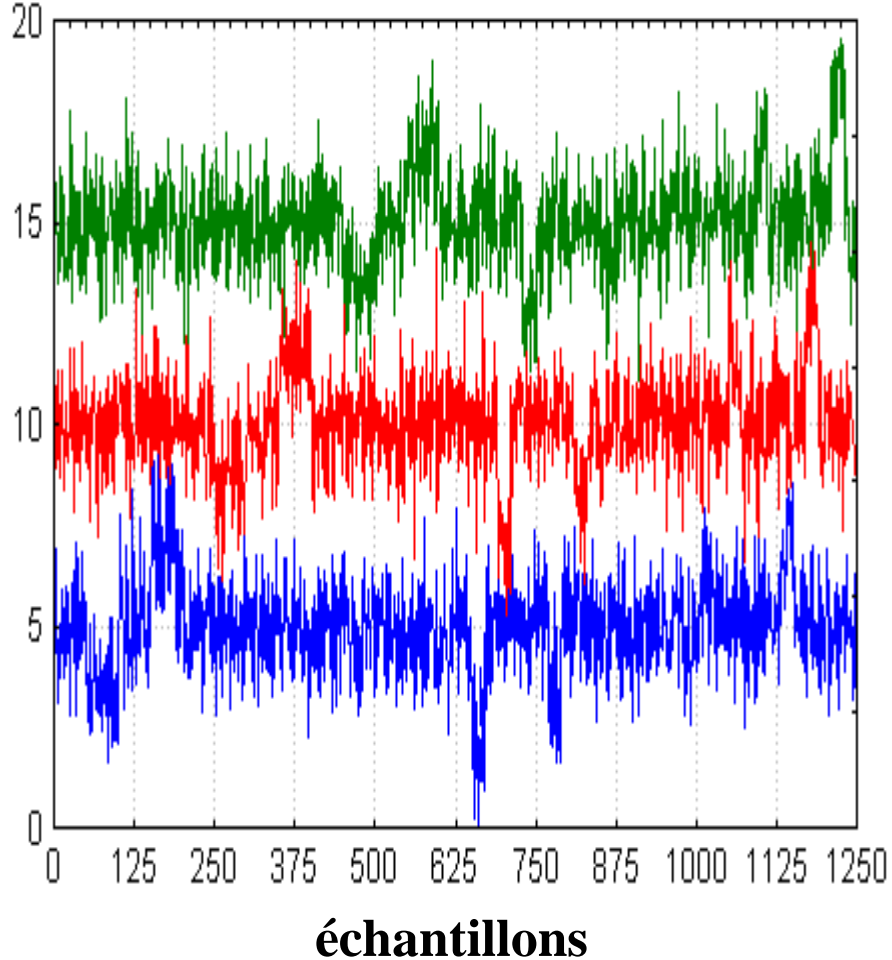


observations

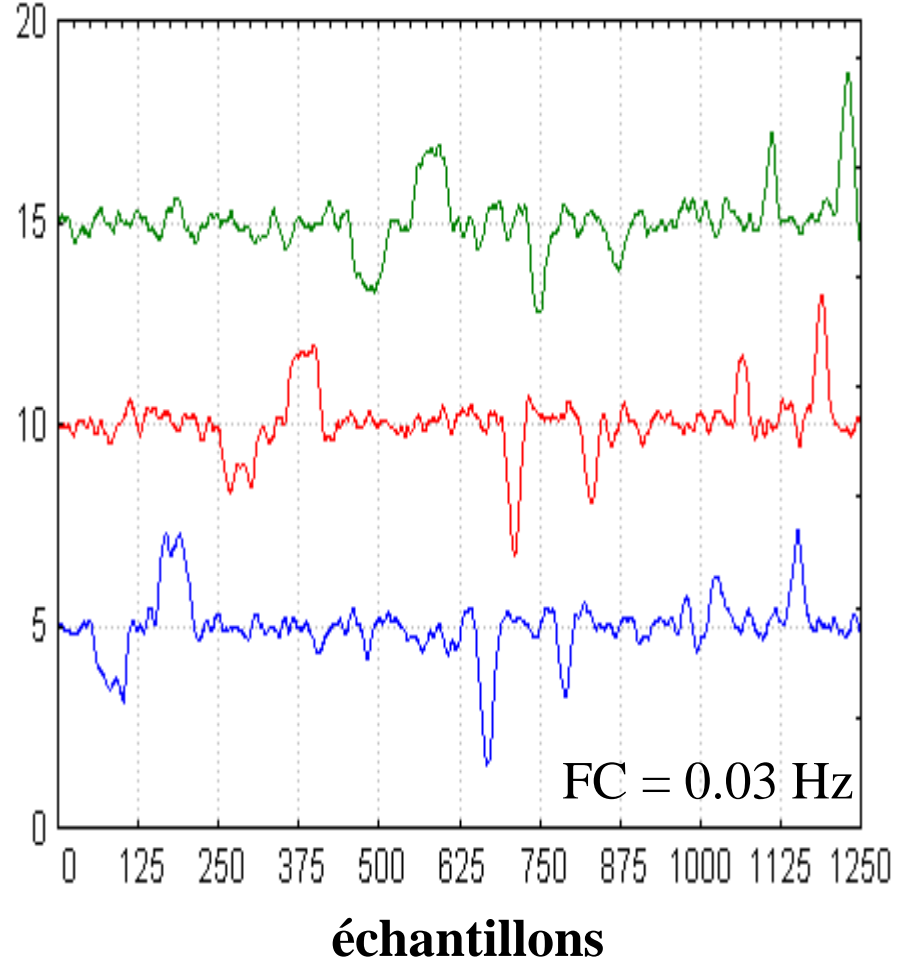


## Exemple 1: 3 variables non-corrélées (2)

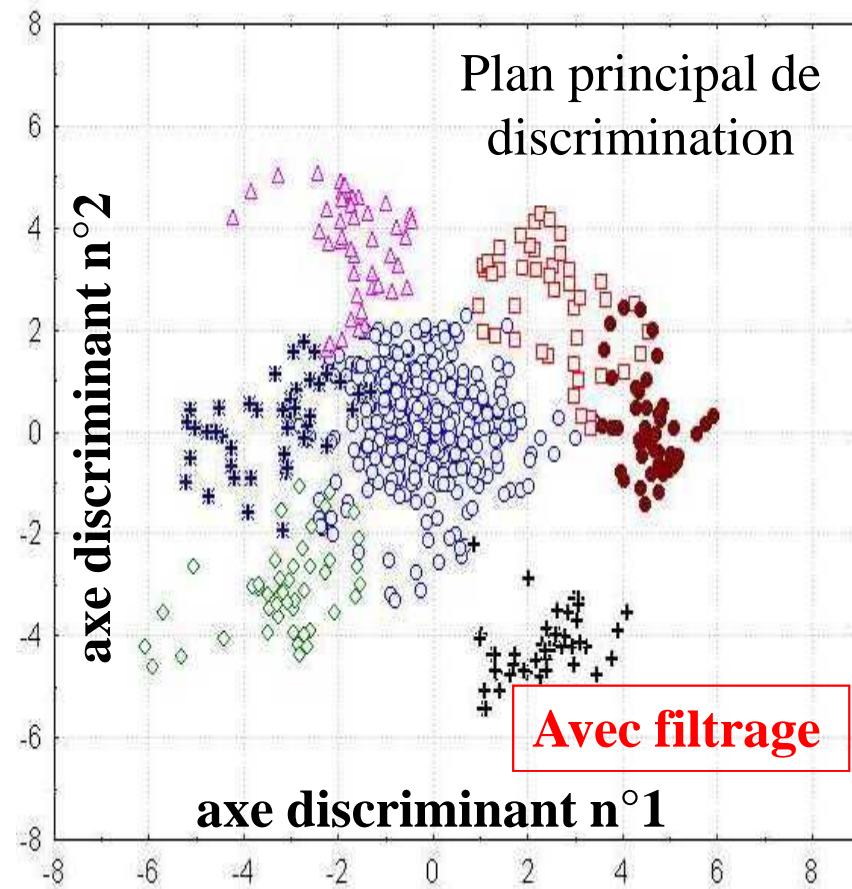
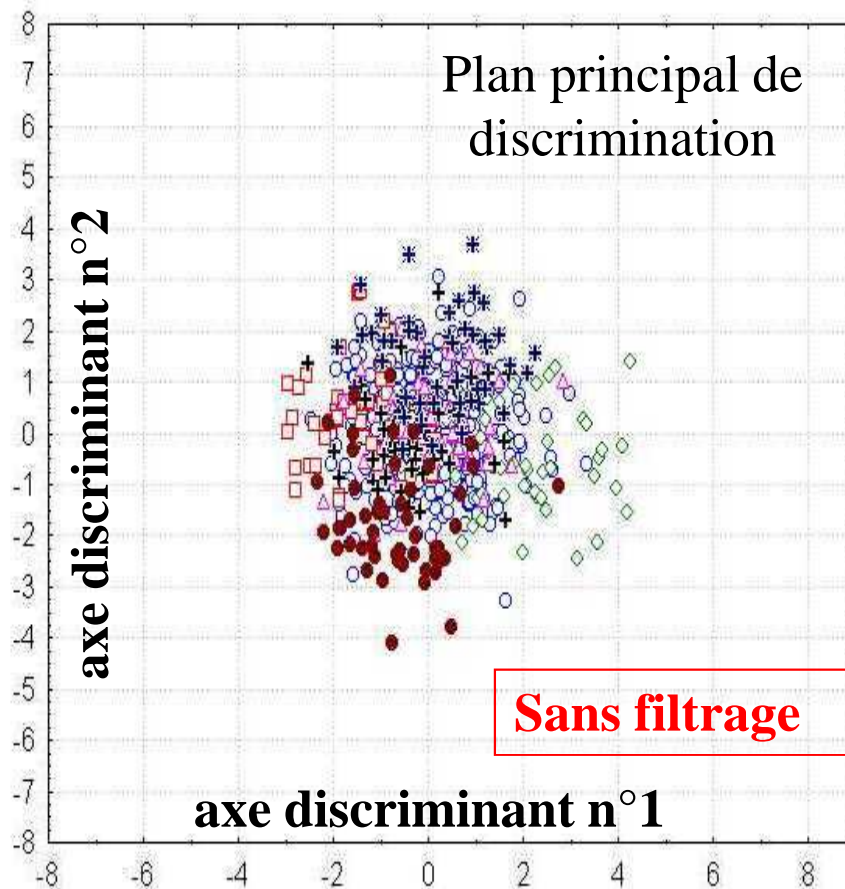
observations



observations



## Exemple 1: 3 variables non-corrélées (3)



- réduction du taux d'erreur de classification

44,48 % (sans filtrage) → 5,42 % (avec filtrage)

## Exemple 2: 3 variables corrélées

- **matrice de variance-covariance**

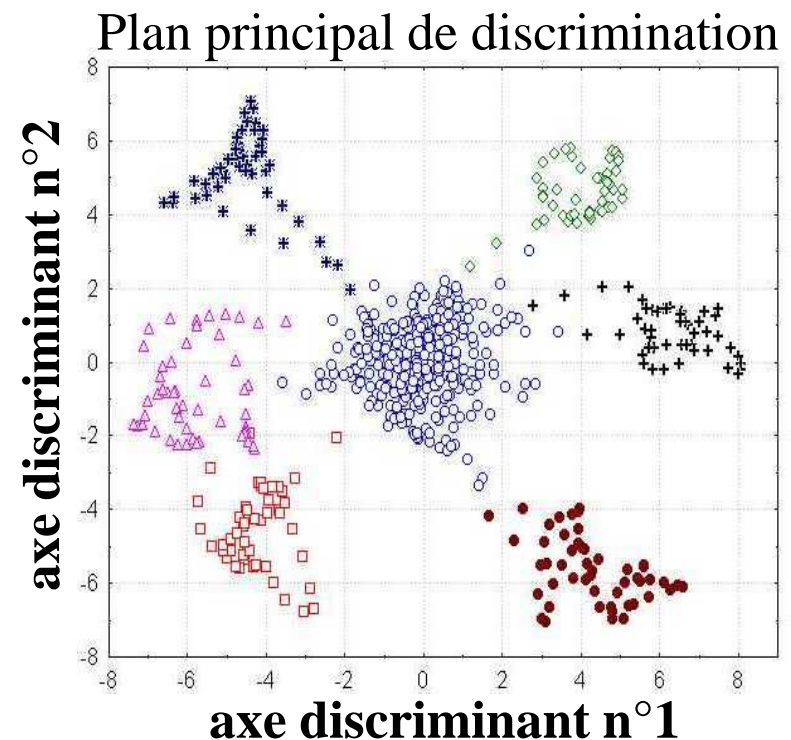
$$\Sigma = 0.2 \times I + 0.8 \times 1 \times 1^T$$

- **2 mécanismes de dérèglement**

- le changement d'une variable n'influence pas les autres
- le changement d'une variable influence les autres

- **Constat**

- la forte corrélation n'est pas un inconvénient
- taux d'erreurs de classification = 1.2 %



# Efficacité de la méthodologie FNAD

## 1. Sauts en échelon

| Amplitude du saut          | $-3,5\sigma$      | $-3\sigma$          | $-2,5\sigma$        | $-2\sigma$          | $-1,5\sigma$       | $-1\sigma$          | $-0,5\sigma$        | $+0,5\sigma$        | $+1\sigma$          | $+1,5\sigma$        | $+2\sigma$         | $+2,5\sigma$        | $+3\sigma$          | $+3,5\sigma$        |
|----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Détection (%)              | 100               | 100                 | 100                 | 100                 | 100                | 95,6                | 47,2                | 40,8                | 98                  | 100                 | 100                | 100                 | 100                 | 100                 |
| <b>POM</b><br>(écart-type) | <b>3,4</b><br>0,7 | <b>3,69</b><br>0,82 | <b>4,05</b><br>0,95 | <b>4,54</b><br>1,24 | <b>5,7</b><br>2,11 | <b>9,19</b><br>4,47 | <b>11,8</b><br>5,38 | <b>11,5</b><br>5,17 | <b>8,54</b><br>4,22 | <b>5,82</b><br>2,07 | <b>4,72</b><br>1,2 | <b>3,92</b><br>0,91 | <b>3,62</b><br>0,82 | <b>3,39</b><br>0,83 |

## 2. Dérives en rampe

| Amplitude du saut          | $-3,5\sigma$        | $-3\sigma$     | $-2,5\sigma$        | $-2\sigma$       | $-1,5\sigma$      | $-1\sigma$         | $-0,5\sigma$        | $+0,5\sigma$      | $+1\sigma$          | $+1,5\sigma$        | $+2\sigma$        | $+2,5\sigma$        | $+3\sigma$          | $+3,5\sigma$        |
|----------------------------|---------------------|----------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Détection (%)              | 100                 | 100            | 100                 | 100              | 89,2              | 67,2               | 23,6                | 26,4              | 60,4                | 92,8                | 99,6              | 100                 | 100                 | 100                 |
| <b>POM</b><br>(écart-type) | <b>9,18</b><br>2,44 | <b>10</b><br>2 | <b>11,3</b><br>2,96 | <b>13</b><br>3,6 | <b>15</b><br>3,75 | <b>15,5</b><br>4,6 | <b>15,5</b><br>4,68 | <b>16</b><br>4,59 | <b>15,3</b><br>4,64 | <b>14,5</b><br>4,26 | <b>13</b><br>3,73 | <b>11,4</b><br>2,93 | <b>10,5</b><br>2,52 | <b>9,43</b><br>2,32 |

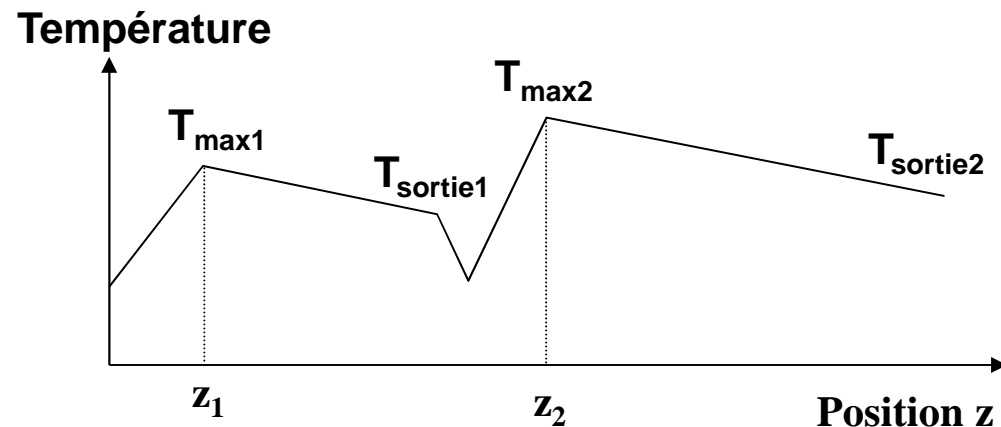
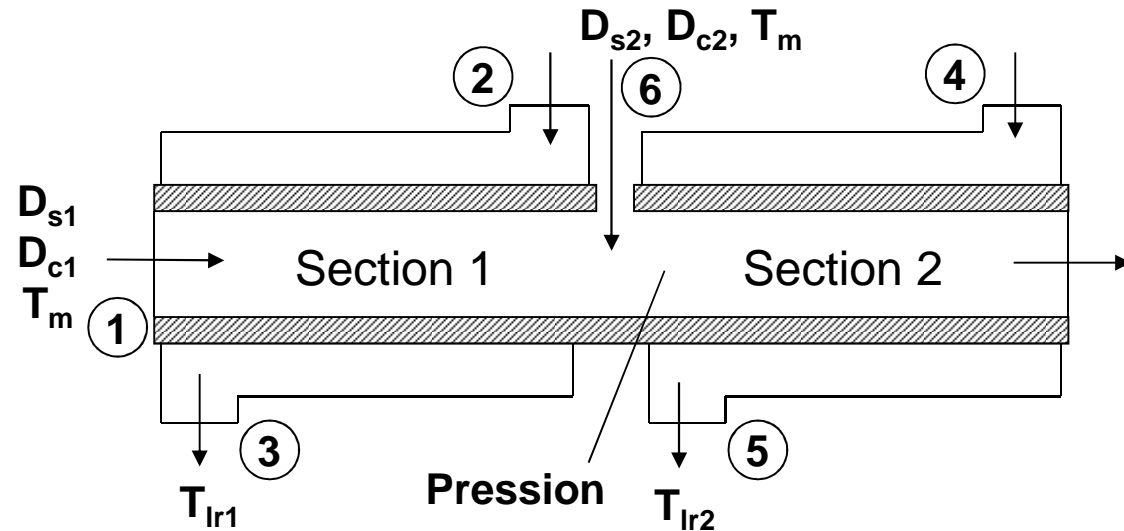
## Application industrielle: Polymérisation de l'éthylène

### variables de processus

- $T_{\max 1}$ ,  $T_{\max 2}$ ,  $T_{\text{sortie1}}$  et  $T_{\text{sortie2}}$
- $z_1$  et  $z_2$
- $T_{\text{lr1}}$  et  $T_{\text{lr2}}$
- $D_{c1}$ ,  $D_{c2}$ ,  $D_{s1}$  et  $D_{s2}$
- $T_m$
- Pression

### caractéristiques qualité du produit

- $T_{\text{Conv}}$
- $M_w$
- $M_n$
- $TR_L$
- $TR_C$



## Bibliothèque des classes (1)

| Causes assignables                              | Effets sur les variables de processus   |
|---|---|
| dépôts de polymère sur les parois du réacteur   | $T_{\text{sortie1}} (\uparrow); T_{\text{sortie2}} (\uparrow);$   |
| taux d'impuretés dans le mélange ( $\uparrow$ ) | $T_{\text{sortie1}} (\downarrow); T_{\text{sortie2}} (\downarrow); T_{\text{max1}} (\downarrow); T_{\text{max2}} (\downarrow);$<br>$z_1 (\uparrow) \text{ et } z_2 (\uparrow);$ |
| $D_{c1} (\uparrow)$                             | $T_{\text{max1}} (\uparrow); T_{\text{sortie1}} (\uparrow); z_1 (\downarrow);$  |
| $D_{c2} (\uparrow)$                             | $T_{\text{max2}} (\uparrow); T_{\text{sortie2}} (\uparrow); z_2 (\downarrow);$  |
| $D_{s1} (\uparrow)$ mais modérée                | pas d'influence sur les autres variables de processus;  |
| $D_{s2} (\uparrow)$ mais modérée                | pas d'influence sur les autres variables de processus;  |
| Pression: $P (\uparrow)$                        | $T_{\text{max1}} (\uparrow); T_{\text{sortie1}} (\uparrow); z_1 (\downarrow);$<br>$T_{\text{max2}} (\uparrow); T_{\text{sortie2}} (\uparrow); z_2 (\downarrow);$                |

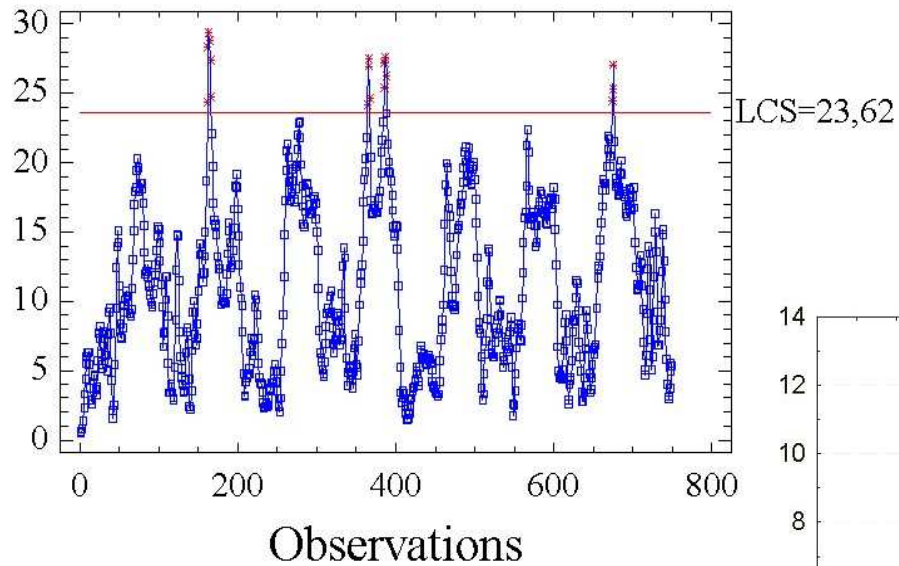


## Bibliothèque des classes (1)

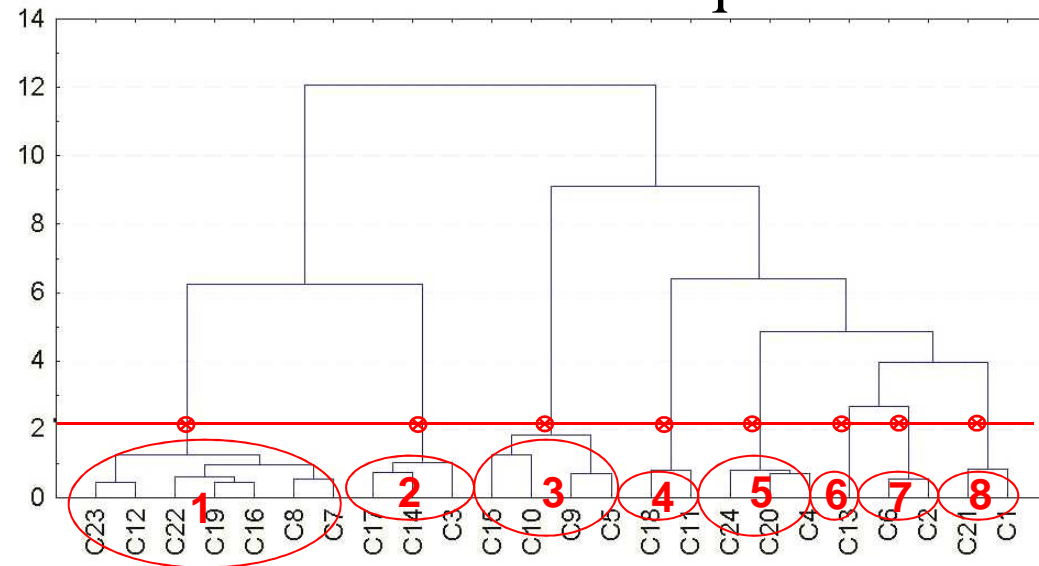
| Causes assignables                              | Effets sur les variables de processus   |
|---|---|
| dépôts de polymère sur les parois du réacteur   | $T_{\text{sortie1}} (\uparrow); T_{\text{sortie2}} (\uparrow);$   |
| taux d'impuretés dans le mélange ( $\uparrow$ ) | $T_{\text{sortie1}} (\downarrow); T_{\text{sortie2}} (\downarrow); T_{\text{max1}} (\downarrow); T_{\text{max2}} (\downarrow);$<br>$z_1 (\uparrow) \text{ et } z_2 (\uparrow);$ |
| $D_{c1} (\uparrow)$                             | $T_{\text{max1}} (\uparrow); T_{\text{sortie1}} (\uparrow); z_1 (\downarrow);$  |
| $D_{c2} (\uparrow)$                             | $T_{\text{max2}} (\uparrow); T_{\text{sortie2}} (\uparrow); z_2 (\downarrow);$  |
| $D_{s1} (\uparrow)$ mais modérée                | pas d'influence sur les autres variables de processus;  |
| $D_{s2} (\uparrow)$ mais modérée                | pas d'influence sur les autres variables de processus;  |
| Pression: $P (\uparrow)$                        | $T_{\text{max1}} (\uparrow); T_{\text{sortie1}} (\uparrow); z_1 (\downarrow);$<br>$T_{\text{max2}} (\uparrow); T_{\text{sortie2}} (\uparrow); z_2 (\downarrow);$                |

## Bibliothèque des classes (2)

Carte de contrôle  $T^2$  de Hotelling



Arbre hiérarchique



## Validation

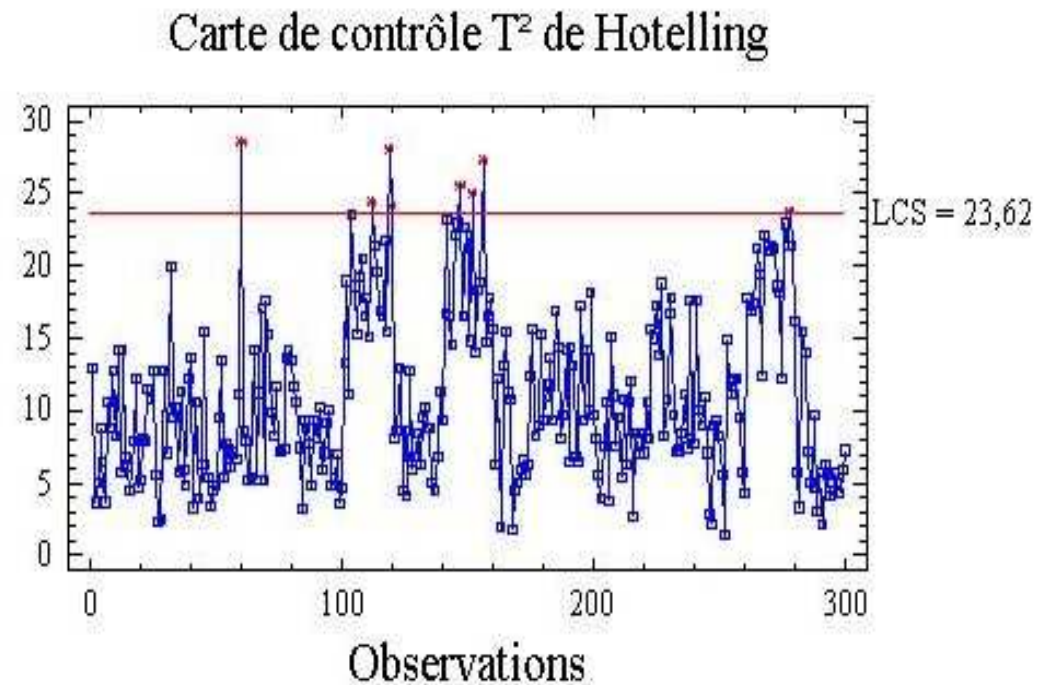
| Causes assignables                   | Apparition        | FNAD<br>(Détection + diagnostic) |
|--------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| $D_{s1}$ (↑) mais modérée            | obs.21 - obs.40   | obs.25 - obs.43                  |
| $D_{s2}$ (↑) mais modérée            | obs.61 - obs.80   | obs.64 - obs.84                  |
| dépôts de polymère sur les parois    | obs.101 - obs.120 | obs.106 - obs.124                |
| taux d'impuretés dans le mélange (↑) | obs.141 - obs.160 | obs.146 - obs.165                |
| $D_{c1}$ (↑)                         | obs.181 - obs.200 | obs.186 - obs.204                |
| $D_{c2}$ (↑)                         | obs.221 - obs.240 | obs.226 - obs.243                |
| Pression: P (↑)                      | obs.261 - obs.280 | obs.266 - obs.285                |

## Validation

| Causes assignables                   | Apparition        | FNAD<br>(Détection + diagnostic) |
|--------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| $D_{s1}$ (↑) mais modérée            | obs.21 - obs.40   | obs.25 - obs.43                  |
| $D_{s2}$ (↑) mais modérée            | obs.61 - obs.80   | obs.64 - obs.84                  |
| dépôts de polymère sur les parois    | obs.101 - obs.120 | obs.106 - obs.124                |
| taux d'impuretés dans le mélange (↑) | obs.141 - obs.160 | obs.146 - obs.165                |
| $D_{c1}$ (↑)                         | obs.181 - obs.200 | obs.186 - obs.204                |
| $D_{c2}$ (↑)                         | obs.221 - obs.240 | obs.226 - obs.243                |
| Pression: P (↑)                      | obs.261 - obs.280 | obs.266 - obs.285                |

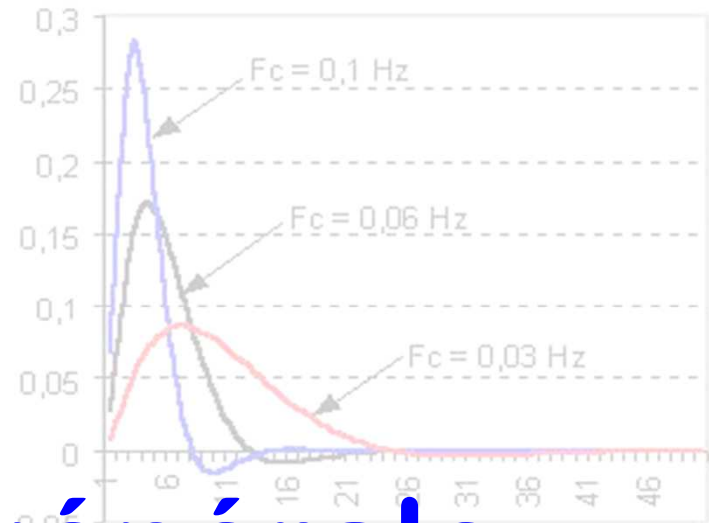
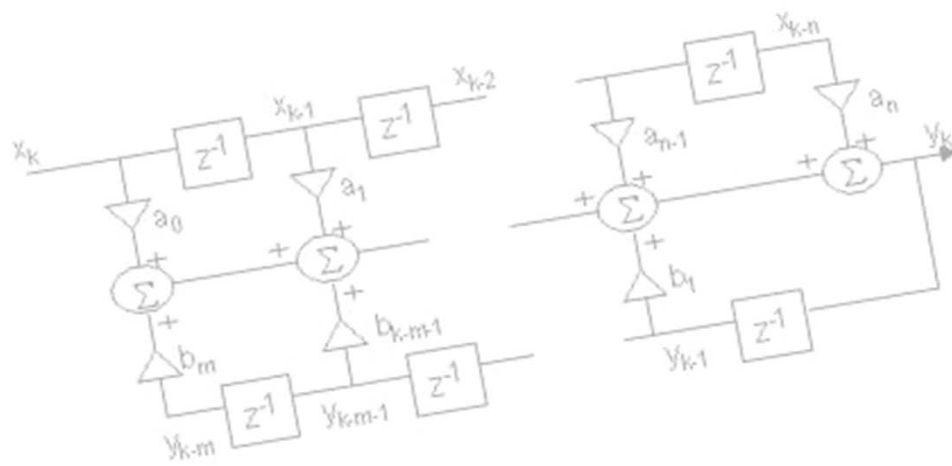
## Aperçu

### Méthode classique de détection

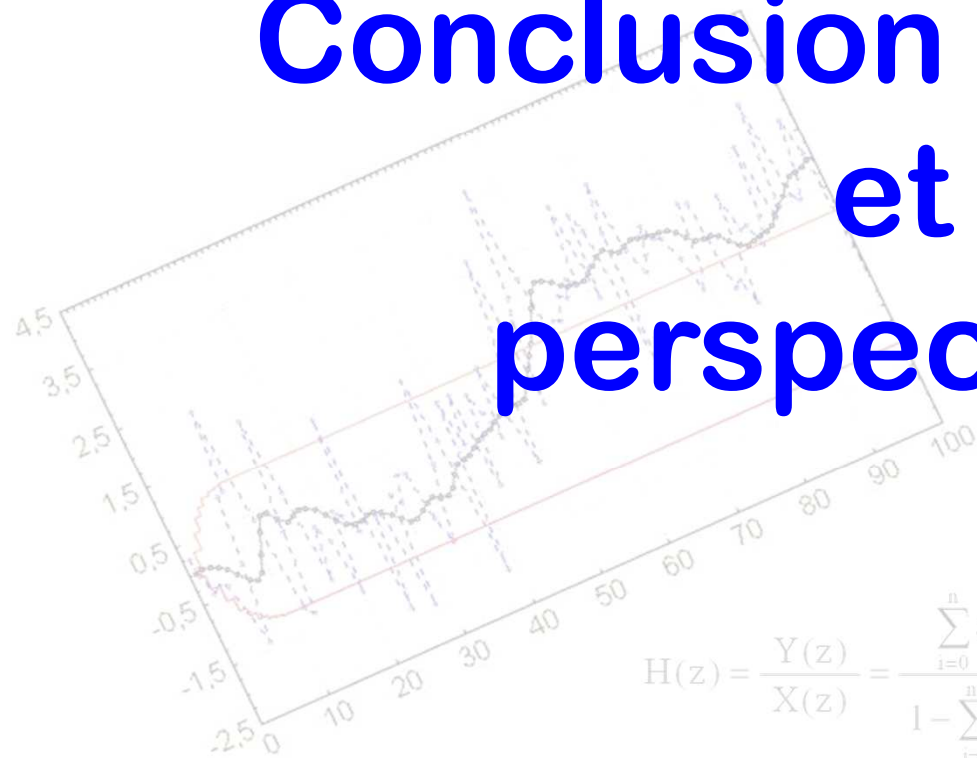


### Méthodologie FNAD

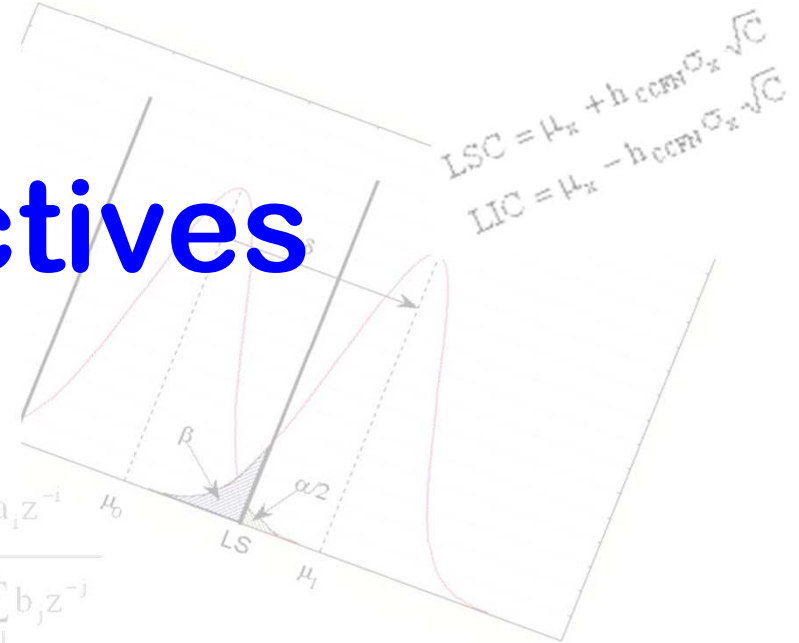
| Obs. | Simulation | Détection |
|------|------------|-----------|
| 101  | Dépôt ↑    | F. Normal |
| 102  | Dépôt ↑    | F. Normal |
| 103  | Dépôt ↑    | F. Normal |
| 104  | Dépôt ↑    | F. Normal |
| 105  | Dépôt ↑    | F. Normal |
| 106  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 107  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 108  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 109  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 110  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 111  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 112  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 113  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 114  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 115  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 116  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 117  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 118  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 119  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 120  | Dépôt ↑    | Dépôt ↑   |
| 121  | F. Normal  | Dépôt ↑   |
| 122  | F. Normal  | Dépôt ↑   |
| 123  | F. Normal  | Dépôt ↑   |
| 124  | F. Normal  | Dépôt ↑   |
| 125  | F. Normal  | F. Normal |
| 126  | F. Normal  | F. Normal |
| 127  | F. Normal  | F. Normal |



# Conclusion générale et perspectives



$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^n a_i z^{-i}}{1 - \sum_{j=1}^m b_j z^{-j}}$$



## Méthodologie FNAD

- **Avantages**

- méthode en temps réel
- intègre les connaissances existantes
- identifie la variable ou les variables hors-contrôle
- non-affectée par la forte corrélation des variables
- non-directionnelle
- en étroite relation avec une démarche d'optimisation
- facile à interpréter et utiliser

- **Inconvénients**

- ne détecte pas les dérèglages de la variance
- nécessite un outil informatique et un logiciel spécialisé

## Nouvelle carte de contrôle

- **Carte de Contrôle Spectrale**
  - analogie temps-fréquence
  - analyse spectrale d'une fenêtre glissante
  - performances supérieures par rapport à la carte EWMA



## Perspectives

- **carte de contrôle spectrale**
  - formule analytique de calcul de la POM
  - modèle multivarié
  - taille optimale de la fenêtre temporelle
- **nouvelles voies à explorer dans la MSP**
  - traitement numérique de signal (filtrage, ondelettes,...)
  - analyse spectrale de signal