

# Méthodes de traitement innovantes pour les systèmes de commande de vol

Soutenance de thèse de Florian Cazes  
28 mars 2013

Directeurs de thèse  
Corinne Mailhes et Marie Chabert

Encadrants industriels  
Philippe Goupil et Rémy Dayre



23 septembre 1913





**7h53m - 730km**

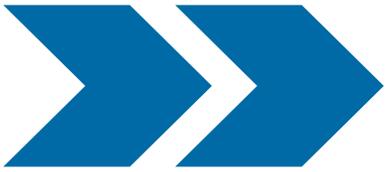


# Préambule



**x1436**

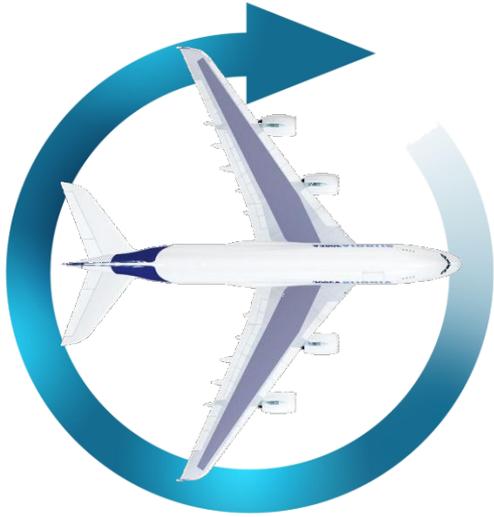


1980  Aujourd'hui

Commandes de vol  
électriques  
(CDVE)

+ Meilleur contrôle

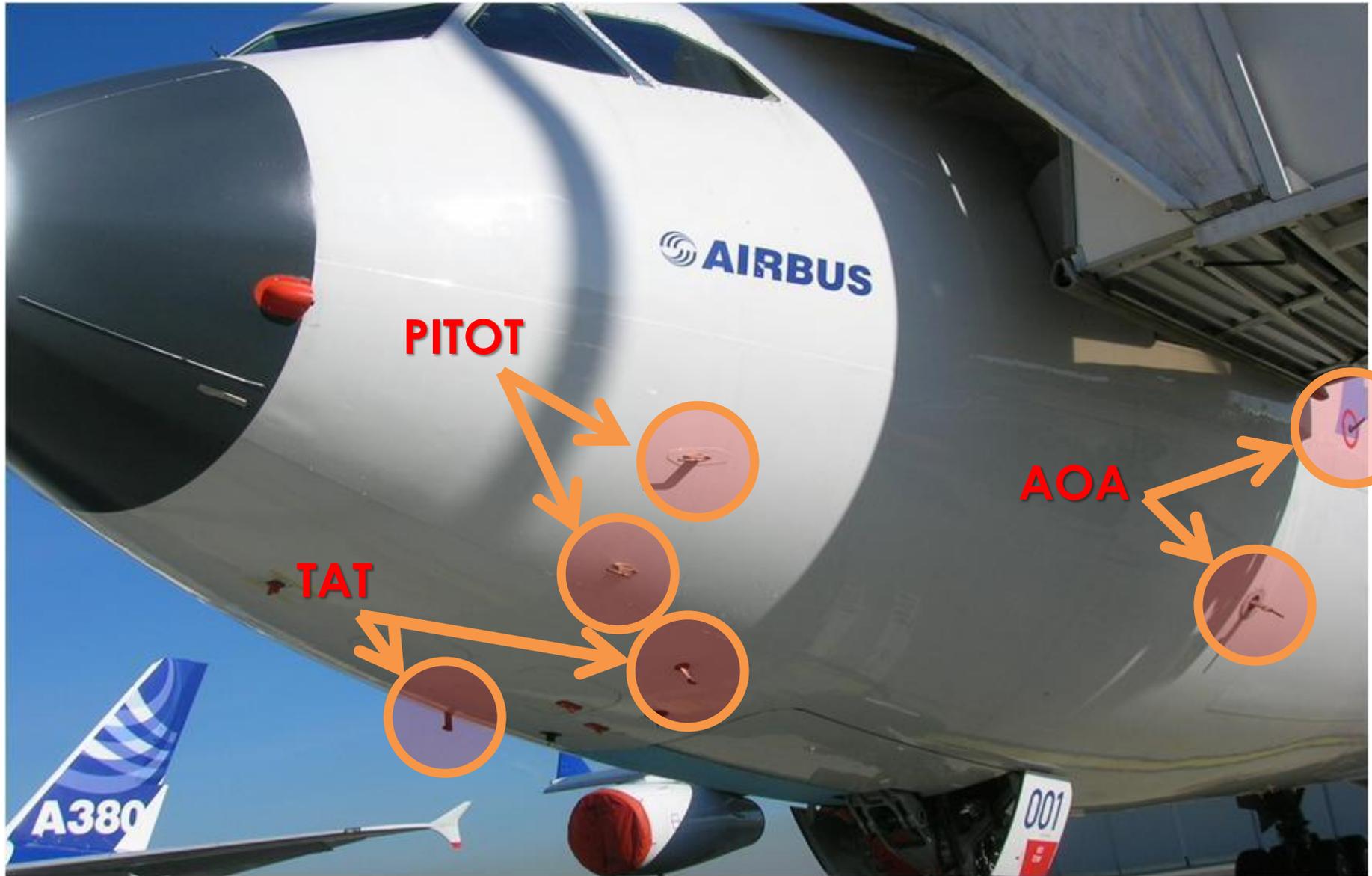
+ Protection enveloppe de vol



Redondance

Redondance  
matérielle

# Préambule



**PITOT**

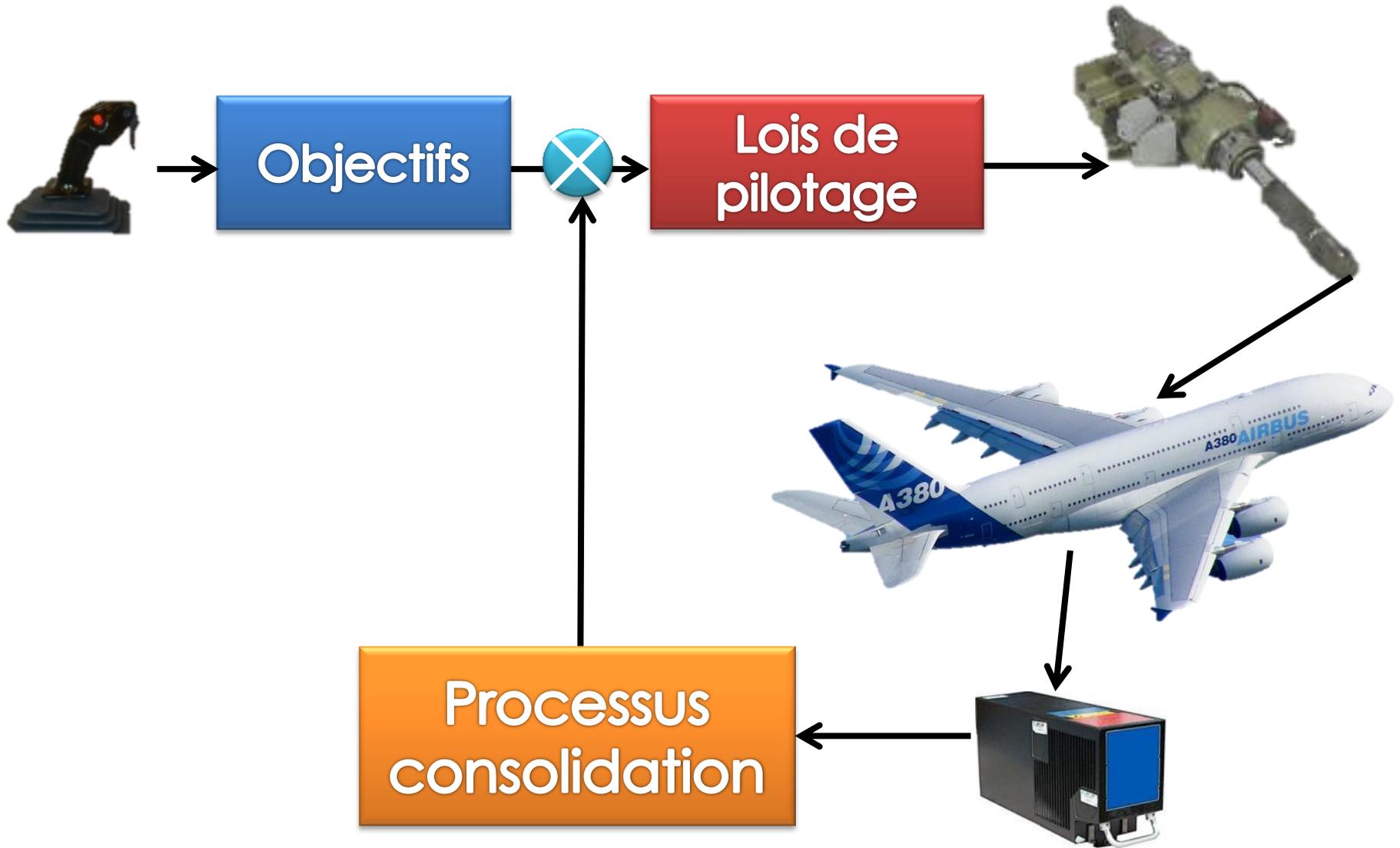
**TAT**

**AOA**

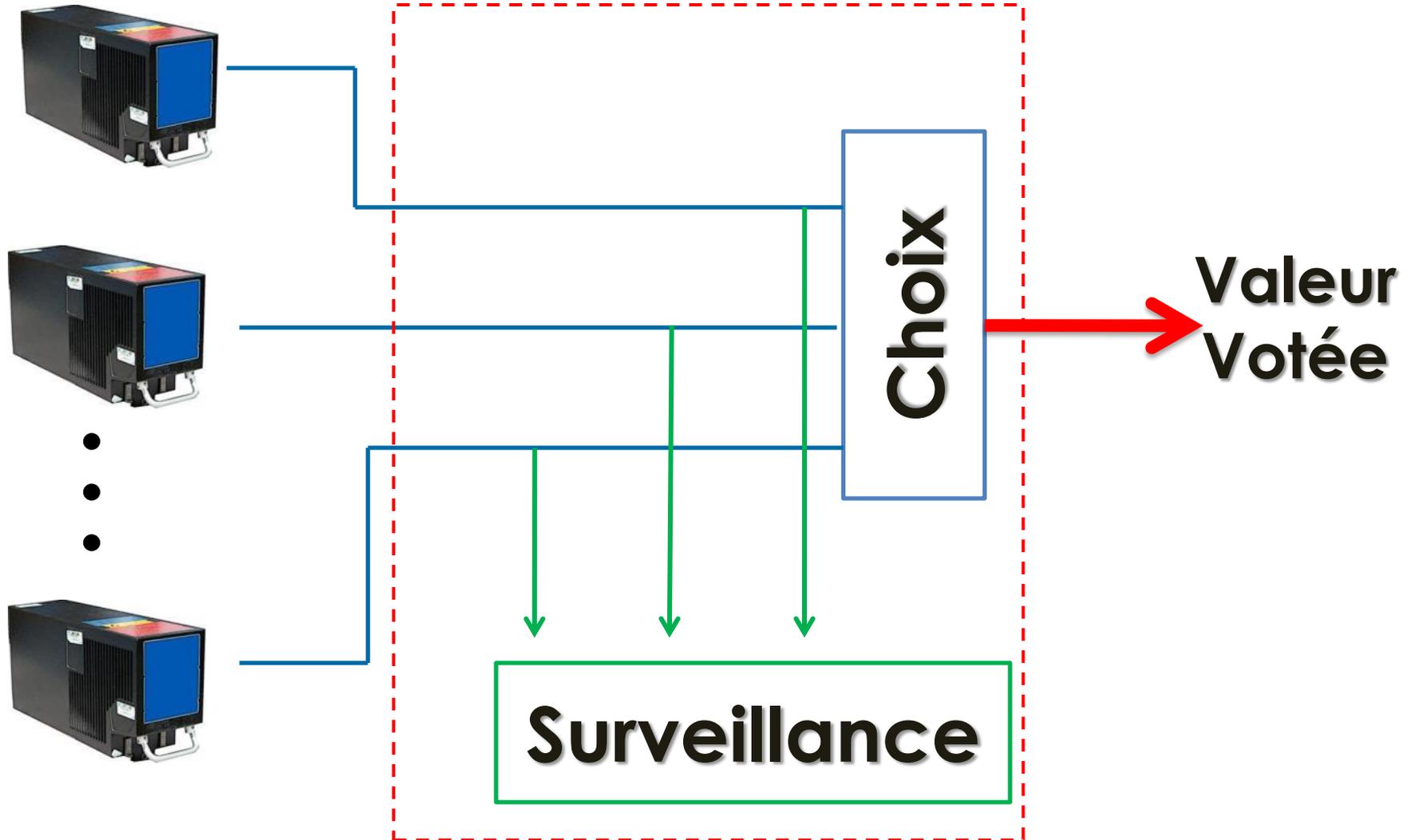
A380

001

# Préambule



## 'Consolidation'



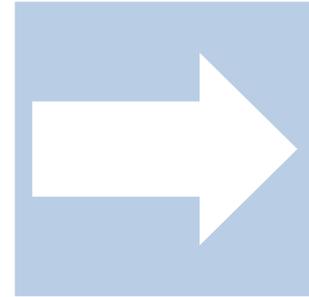
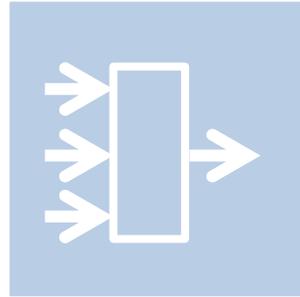
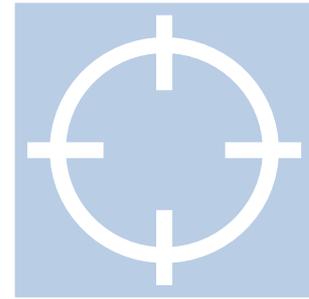
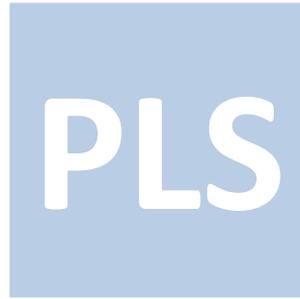
Redondance matérielle

Coûts additionnels  
Maintenance

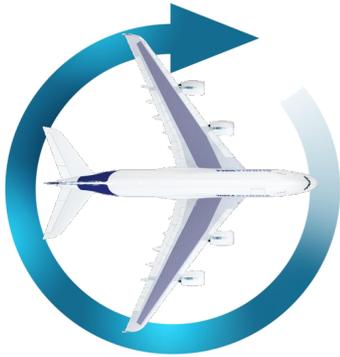
Capteurs « logiciels »

Approche traitement du signal  
Détection de pannes

# Sommaire



## + Extension du domaine du PA



CDVE

## + Avion plus « vert » [projet ADDSAFE]



# Codage et implémentation

+ Logiciels critiques

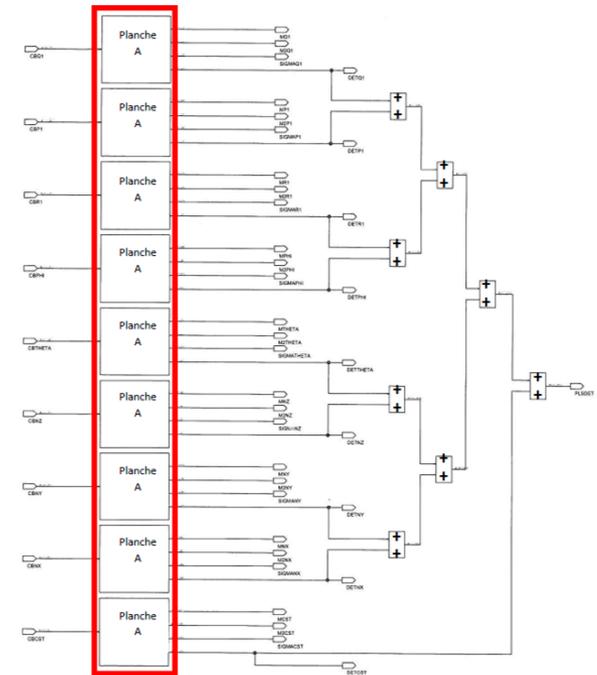
+ Coût calculatoire

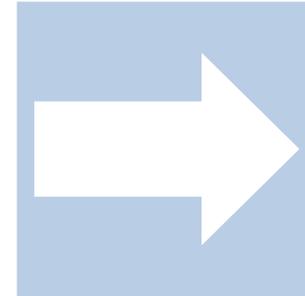
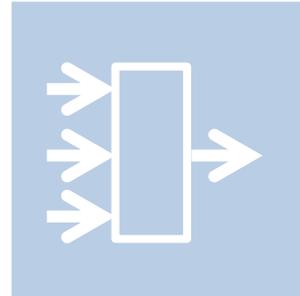
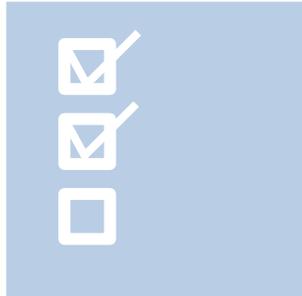
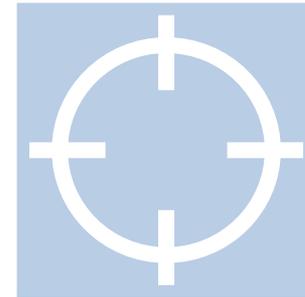
+ Peu de réglages

# Performances

+ Taux de fausses alarmes très bas

+ Taux de non détection très bas





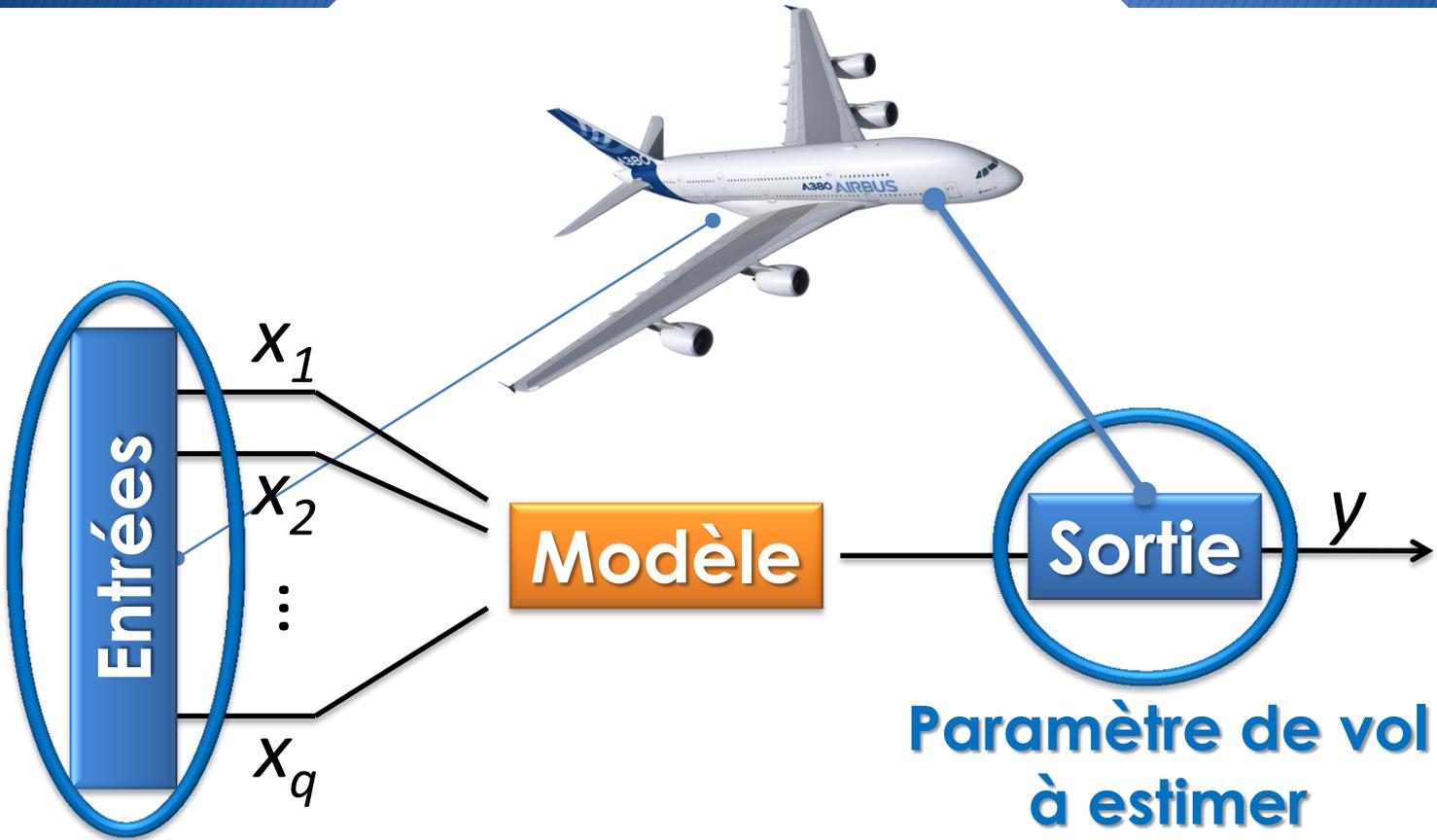
# Estimation et prédiction

Choix du modèle  
Principe général  
Estimation et prédiction



# Estimation et prédiction

Choix modèle



Paramètre de vol  
à estimer

$V_c, \alpha$

Autres paramètres  
dissimilaires

$N_x, N_y \dots$

technologie

Position



Dysfonctionnement

**Modèle**



**Régression linéaire multiple**

+ **Mise en œuvre simple**

+ **Coût calculatoire faible**

+ **Dissimilarité du modèle**

$$y = Xb + \epsilon$$

Paramètre de vol  
à estimer

Autres paramètres  
dissimilaires

Coefficients

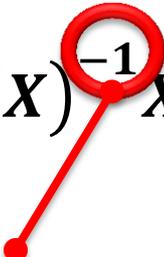
Terme d'erreur

Estimation des paramètres du modèle  $\hat{b}$

+ **Moindres carrés ordinaires (MCO)**

+ **Maximum de vraisemblance**

→  $\hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T y$



**Problème de multicollinéarité**

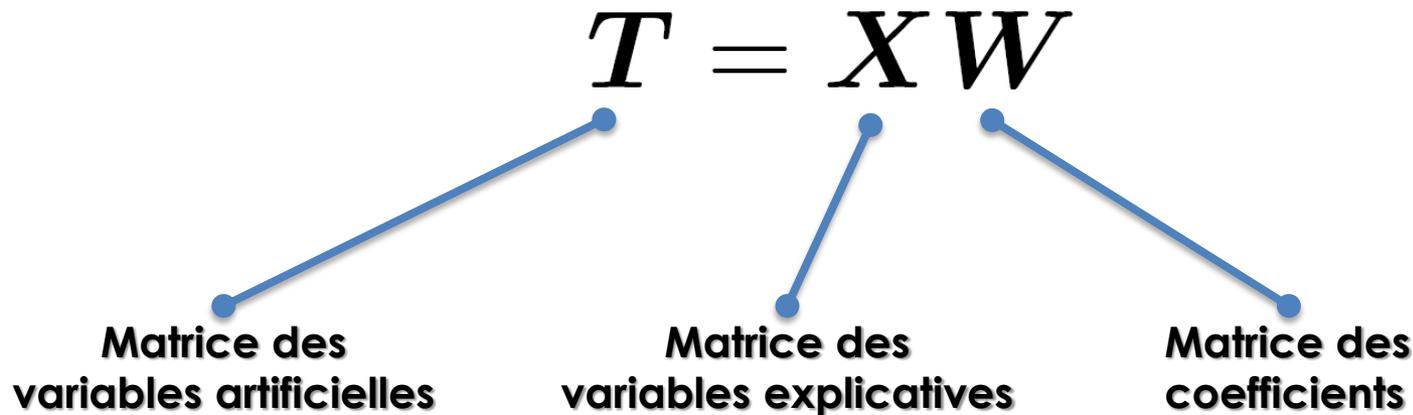
→ **Solutions alternatives**

+ Régression pas-à-pas

+ Régression Ridge

+ Méthodes récursives

→ Perte d'information ou inversion de matrice



+ Régression sur composantes principales

+ Régression PLS

Régression sur composantes principales

+ **Analyse en composantes principales**

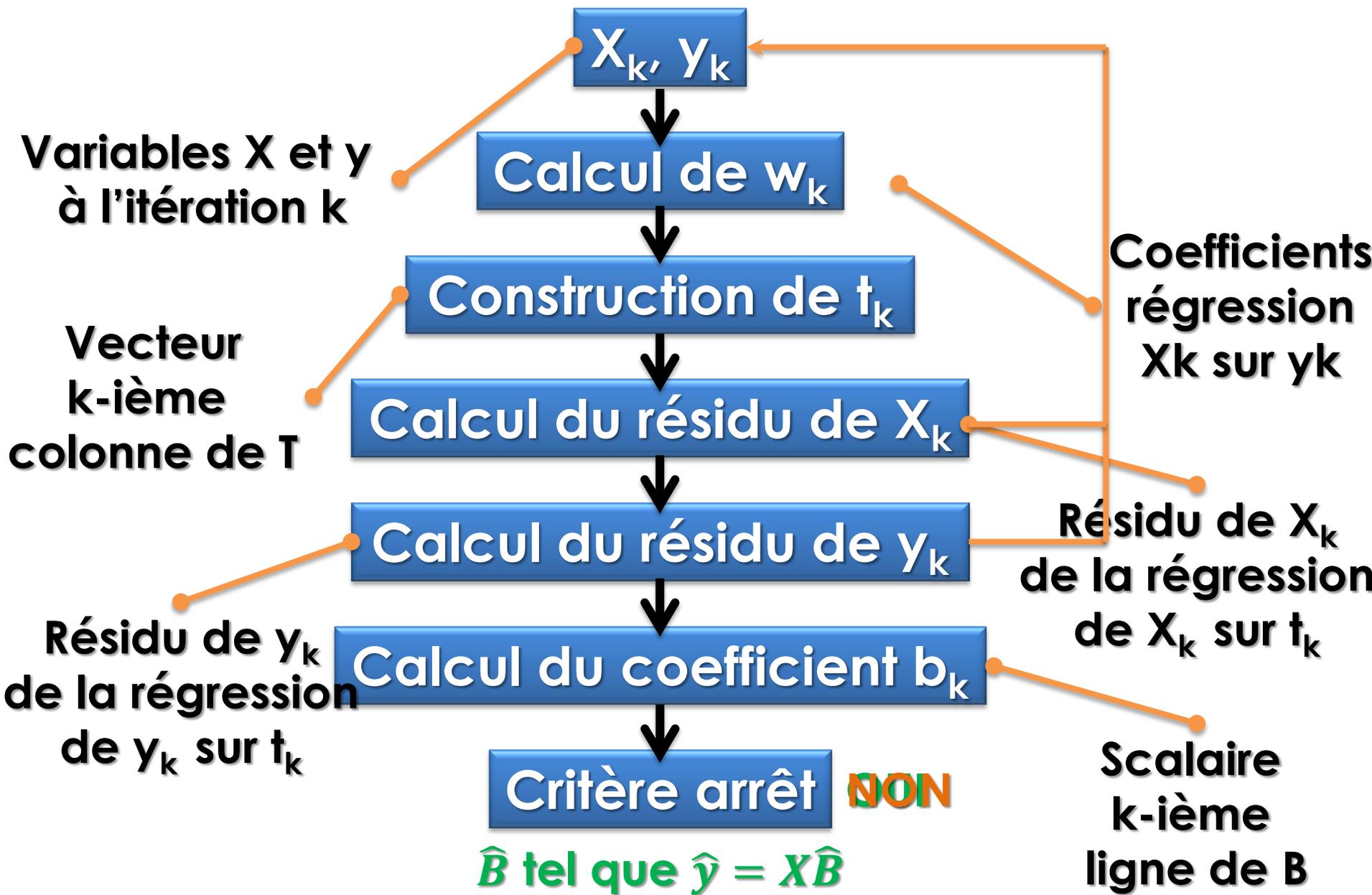
$$T = XW$$

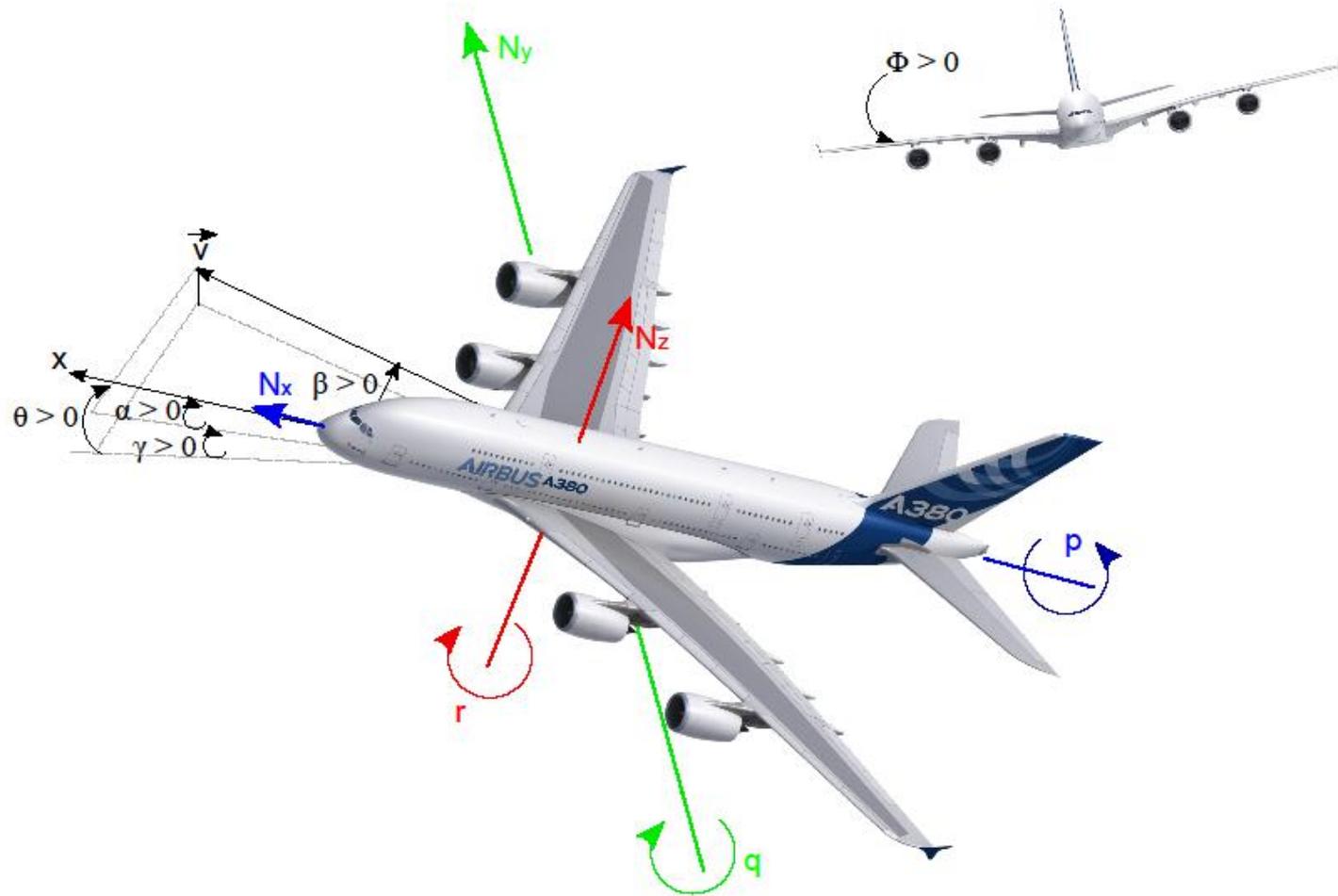
+ **Régression par MCO sur les composantes**

$$\hat{\beta} = (T^T T)^{-1} T^T y$$

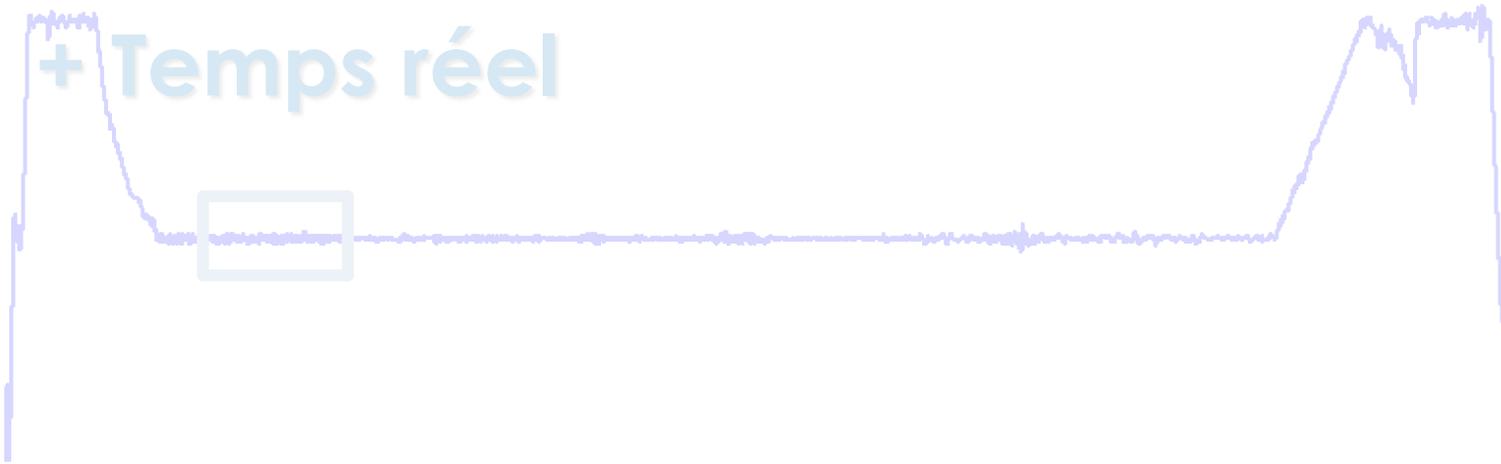
→ Inversion de la matrice utilise trop de ressources

# Régression PLS





$$V_c = b_1 N_x + b_2 N_y + b_3 N_z + b_4 p + b_5 q + b_6 r + b_7 \theta + b_8 \phi$$



## + Variable d'ajustement

→ Centrer les données

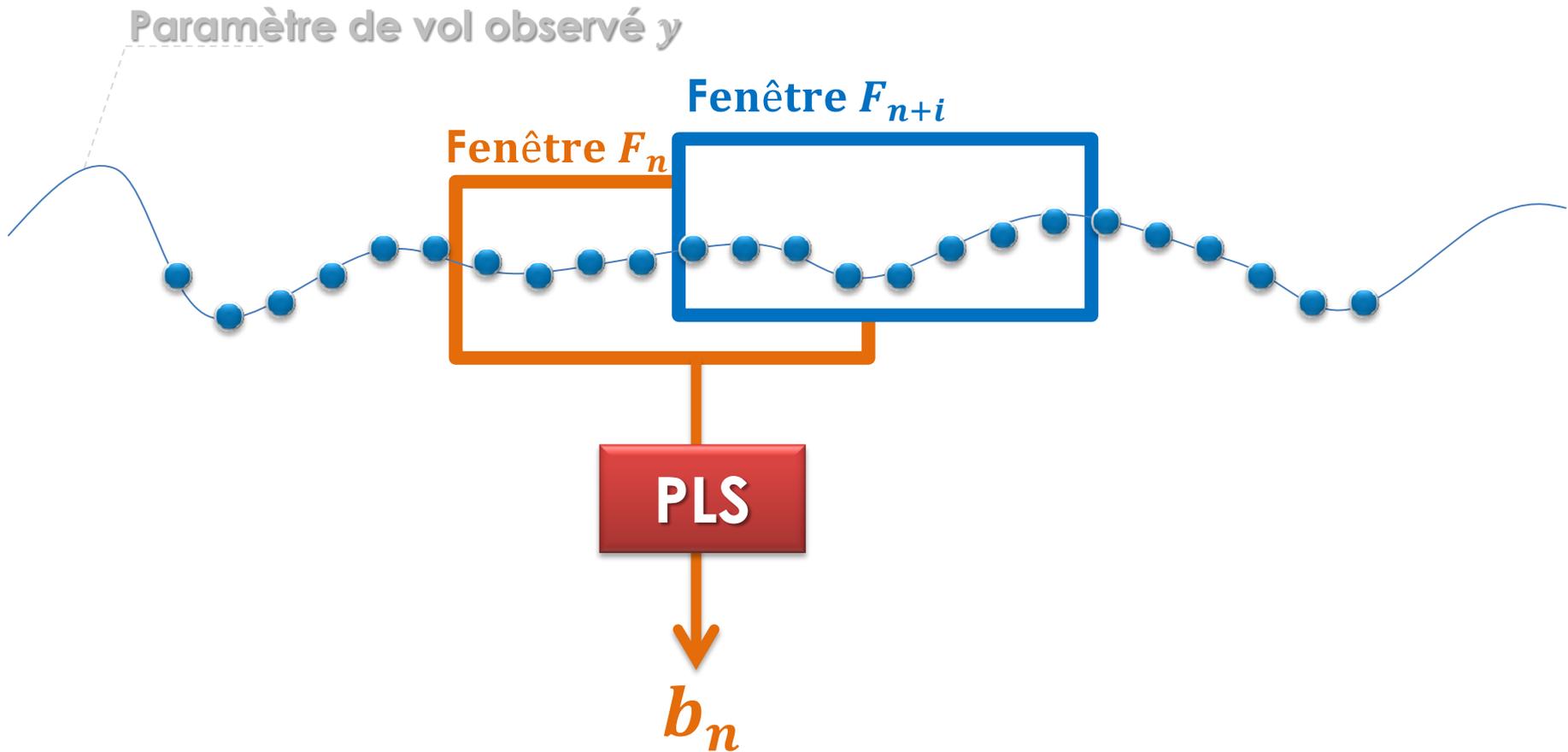
## Mais perte d'information

Centrer  $X$  → Fausses alarmes

Centrer  $y$  → Non-detection

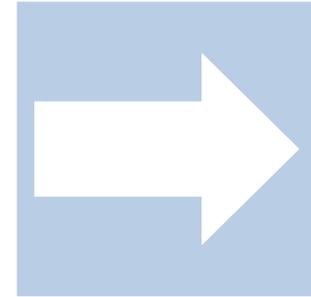
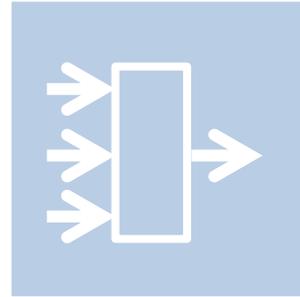
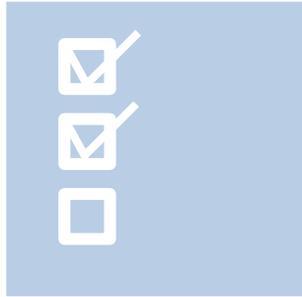
→ Inclure la constante dans les entrées

$$V_c = b_1 N_x + b_2 N_y + b_3 N_z + b_4 p + b_5 q + b_6 r + b_7 \theta + b_8 \phi + b_9$$



**Estimation :**  $\hat{y}_n = X_n b_n$

**Prédiction :**  $\hat{y}_{n+i} = X_{n+i} b_n$



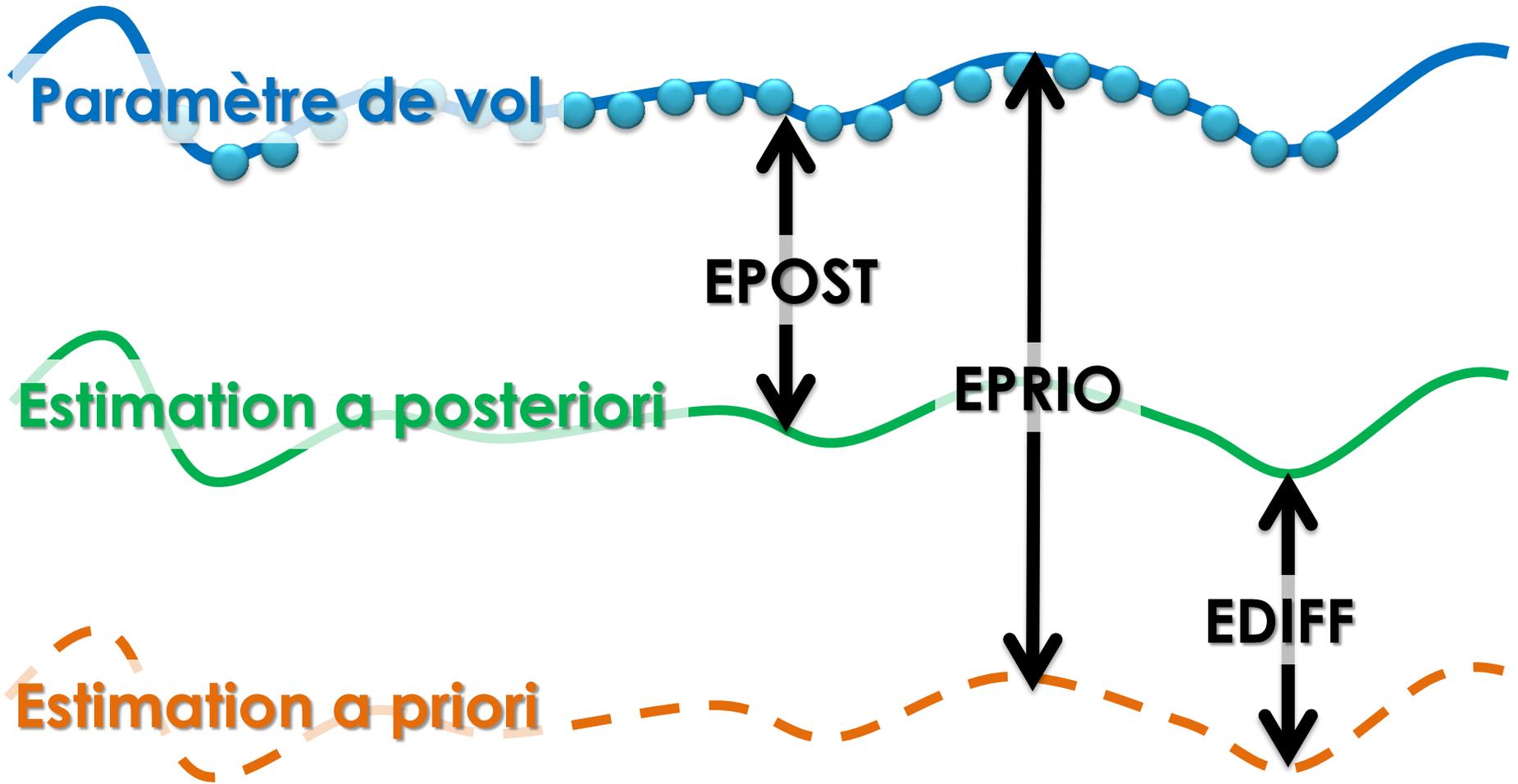
# Stratégies de détection

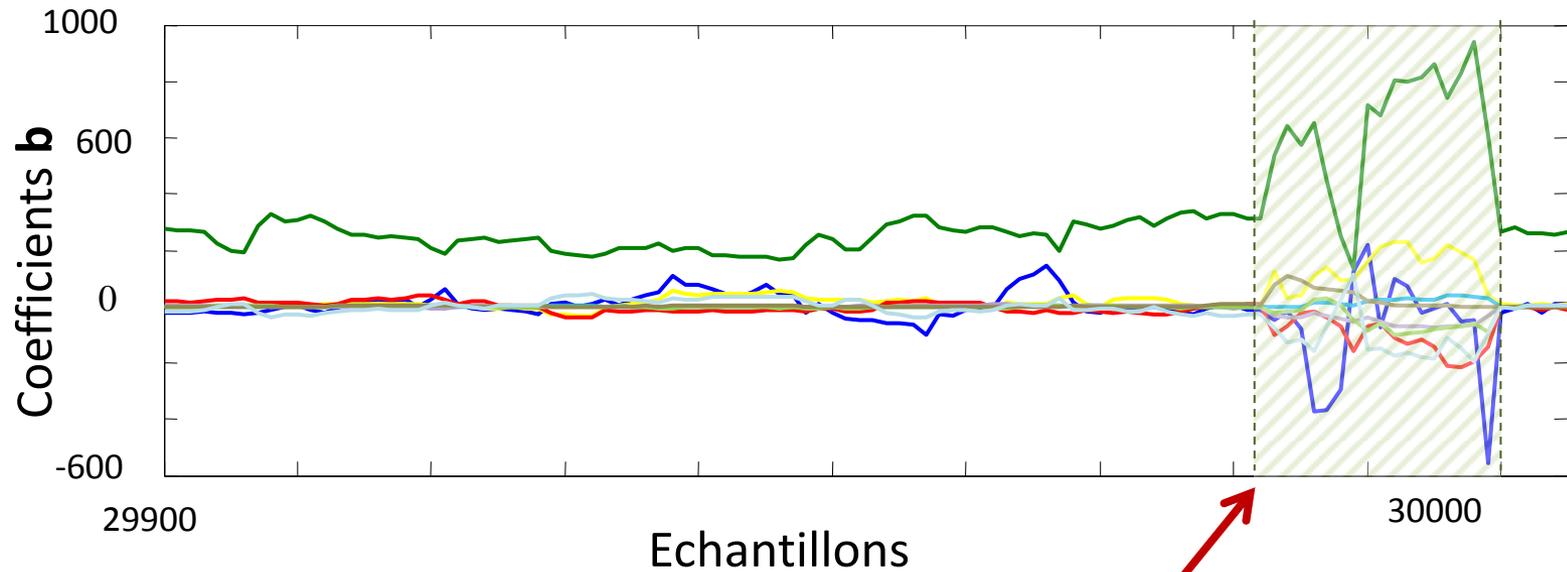
Comparaison des estimations  
Etude des coefficients



# Stratégies de détection

Comparaison

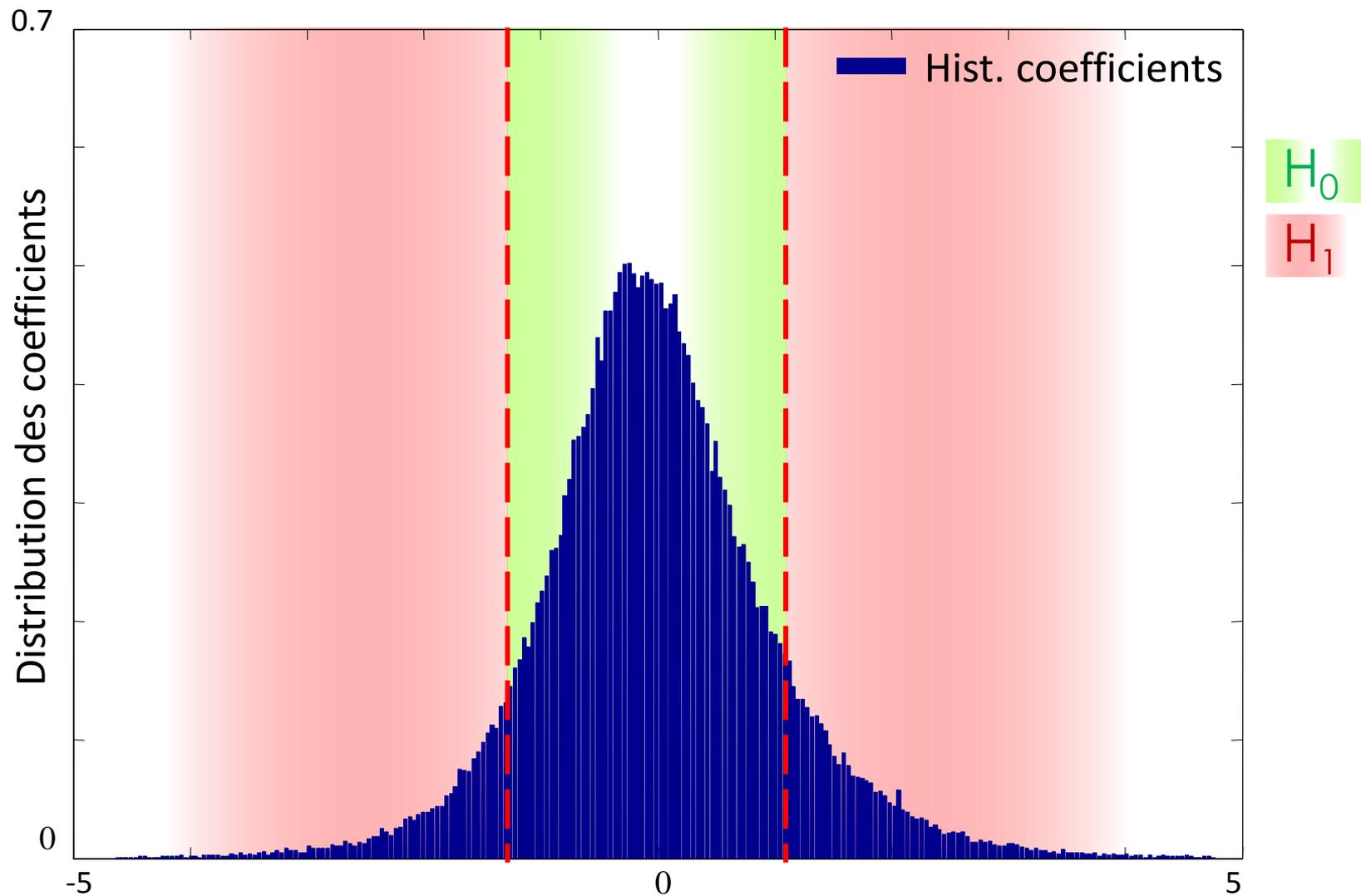




**Apparition du dysfonctionnement**

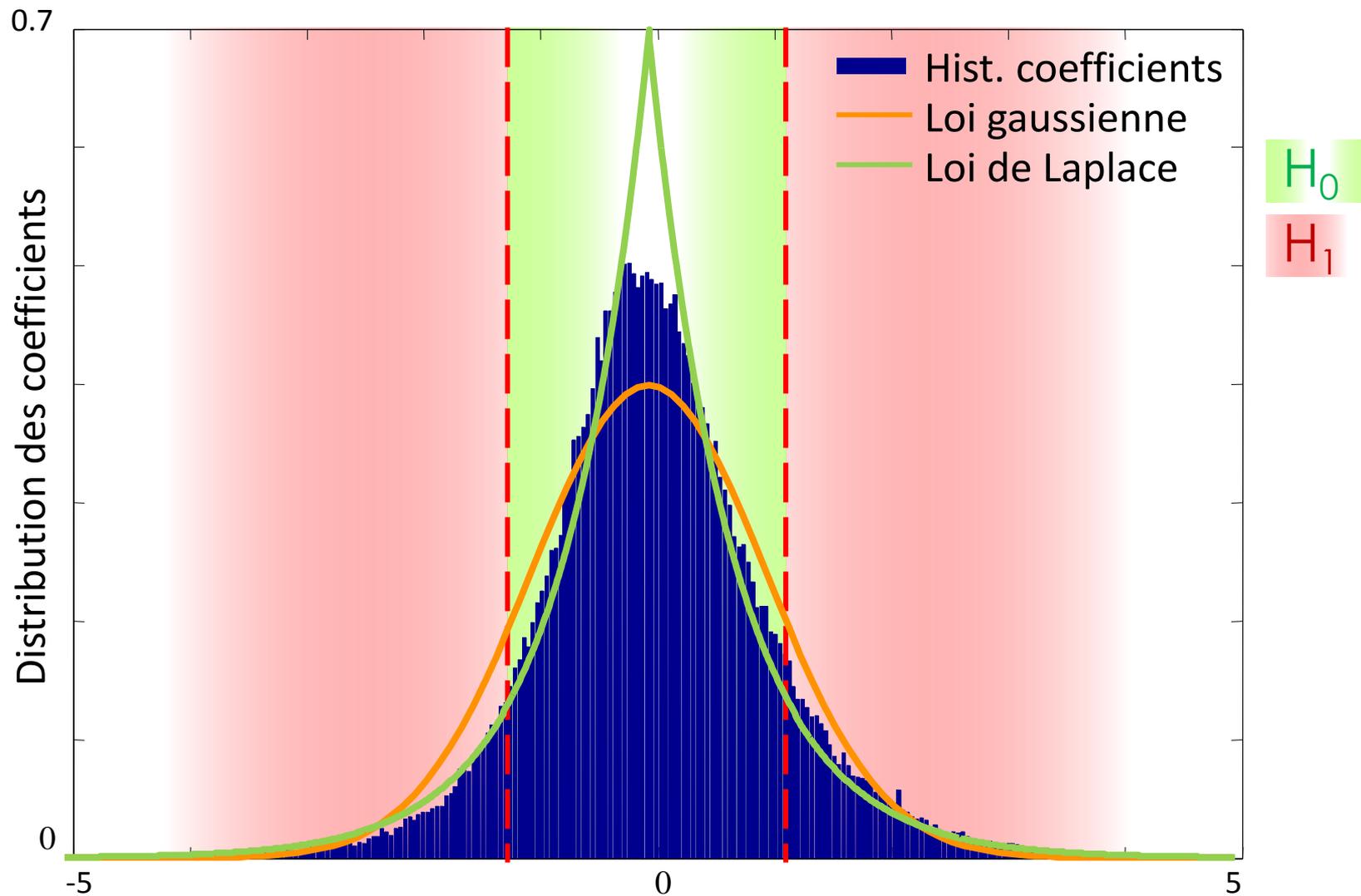
**Capteur sain :  $H_0$**

**Capteur non sain :  $H_1$**



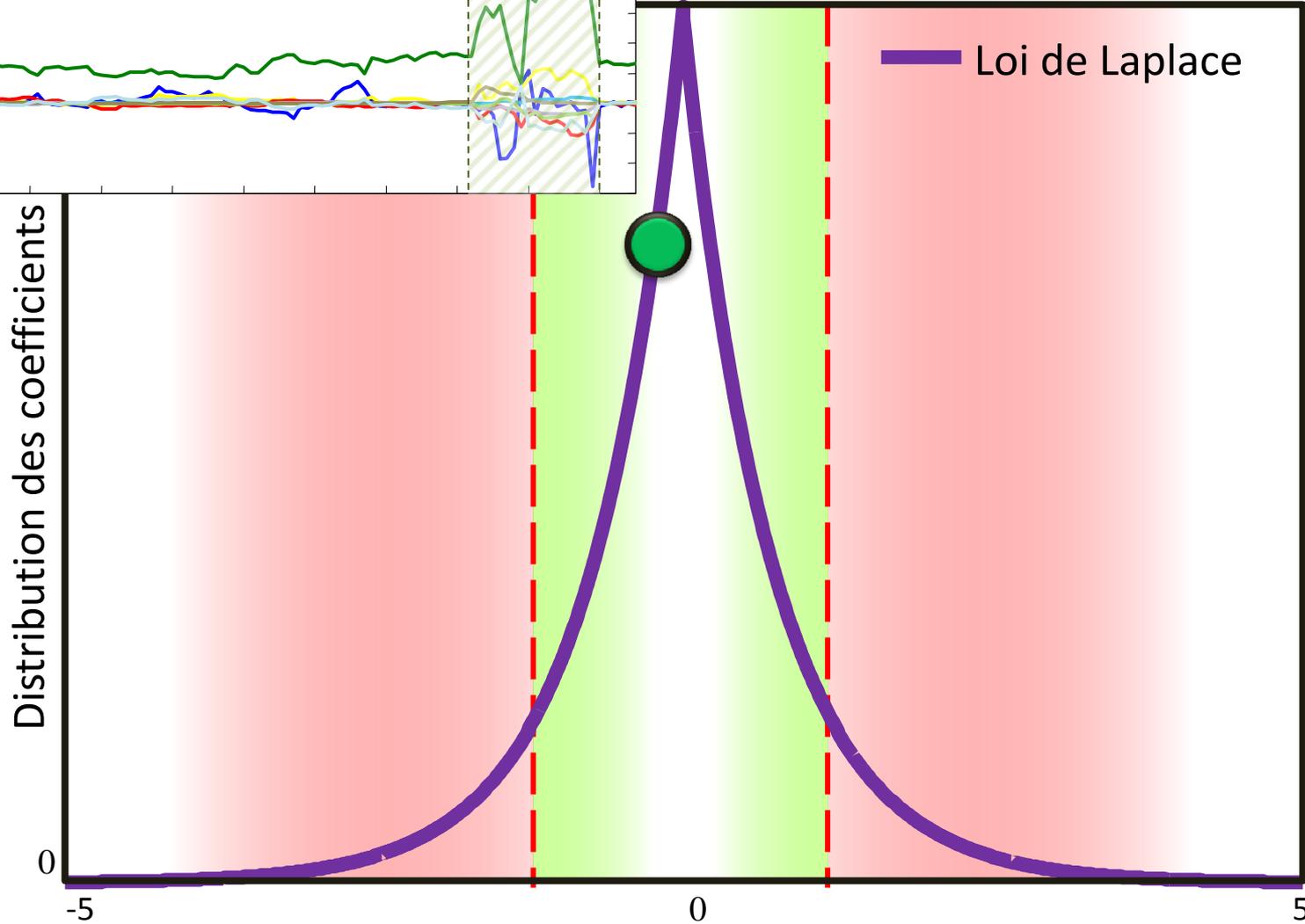
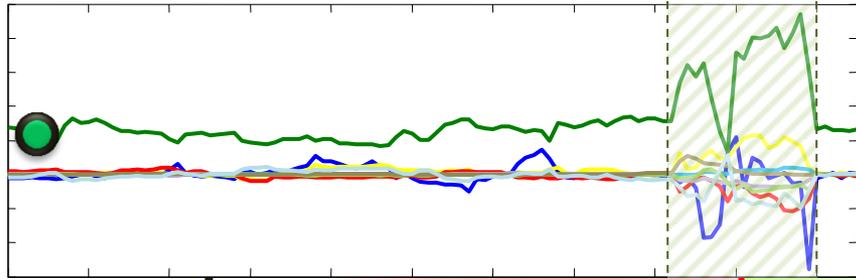
# Stratégies de détection

Etude des coefficients



# Stratégies de détection

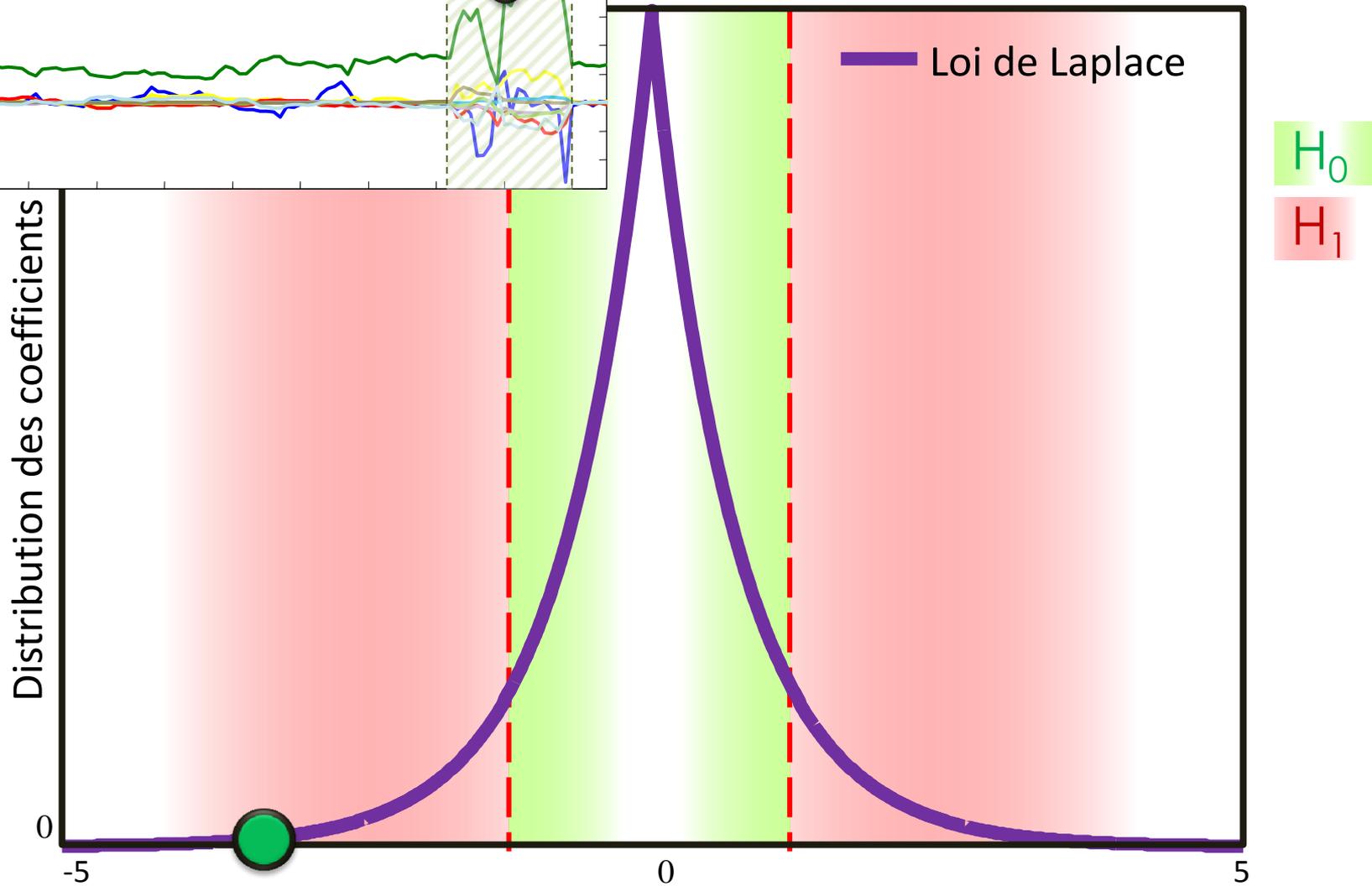
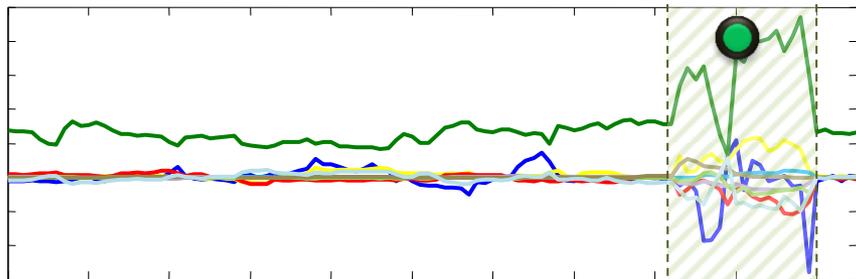
Etude des coefficients



$H_0$   
 $H_1$

# Stratégies de détection

Etude des coefficients



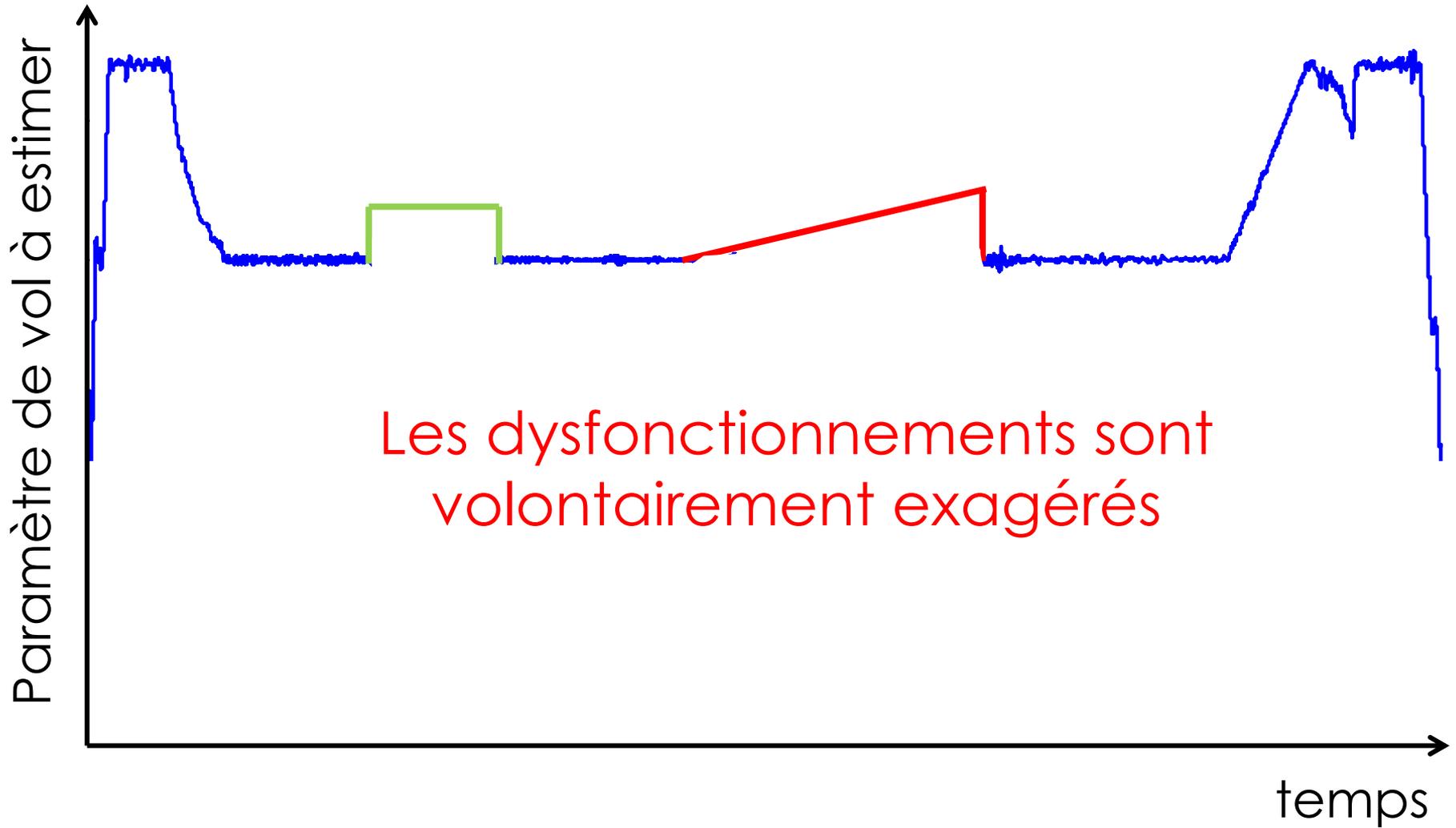
$$\sum_{i=1}^q \ln \left( \sqrt{2} \sigma_{n-1}^{(i)} \right) + \sqrt{2} \frac{|b_n^{(i)} - m_{n-1}^{(i)}|}{\sigma_{n-1}^{(i)}} \underset{H_1}{\overset{H_0}{\geq}} \text{seuil}$$

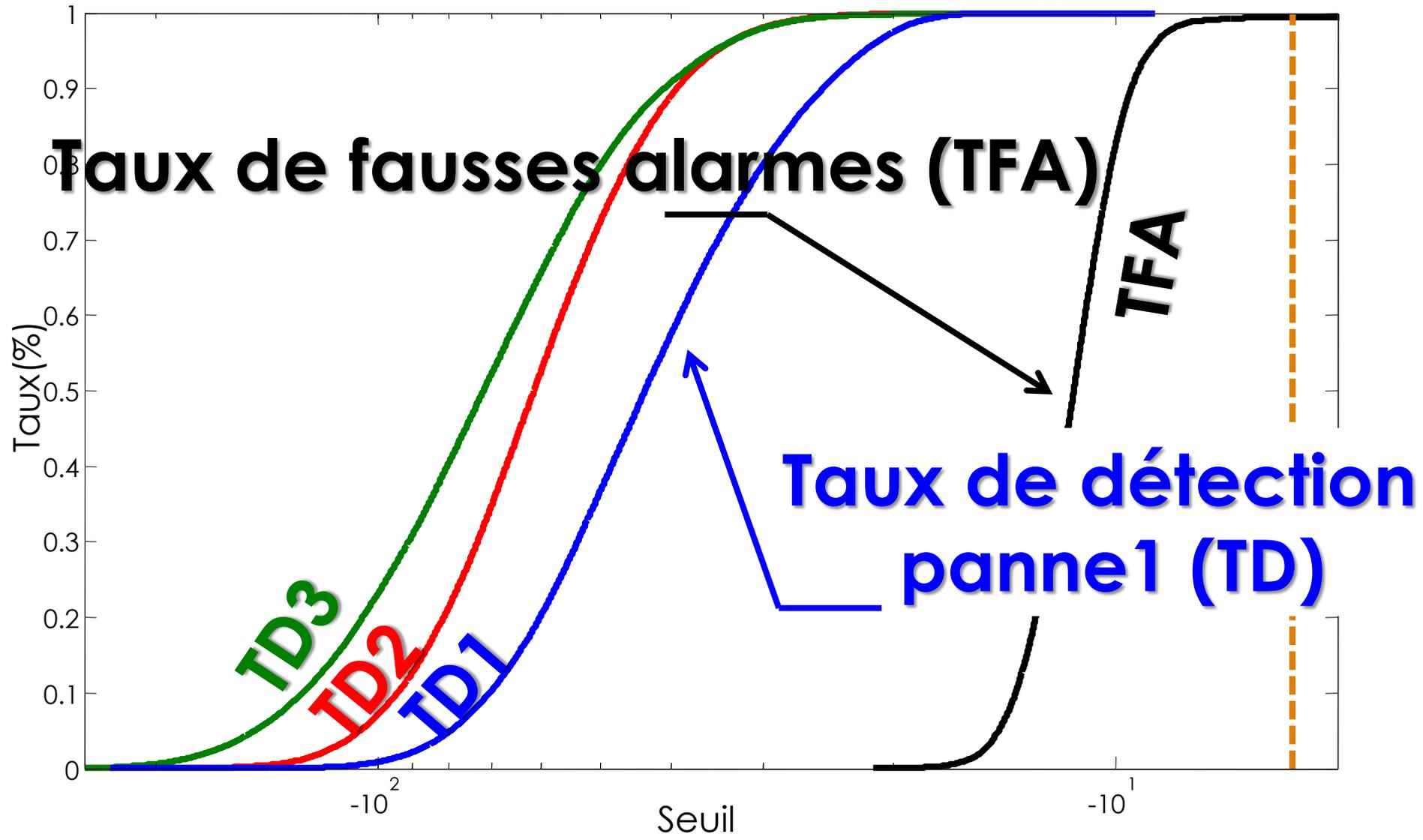
**Step 0** Initialisation

**Step 1** Calcul de  $b_n$

**Step 2** Mise à jour de la moyenne et écart type

**Step 3** Test de décision



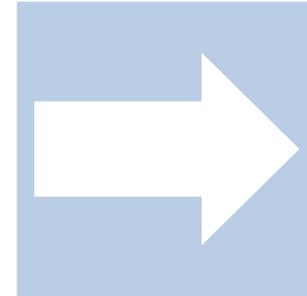
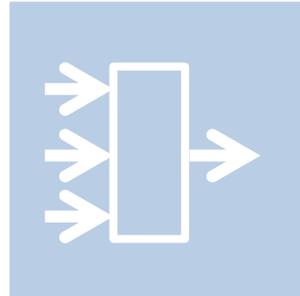
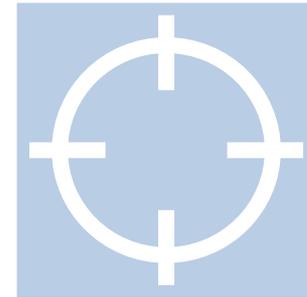




# Stratégies de détection

Etude des coefficients

Stratégies	EPOST	EPRI0	EDIFF	BDISP	BSTAT
Biais 6u	17,00%	6,04%	5,56%	96,65%	99,98%
Biais 16u	99,99%	96,01%	99,65%	99,15%	100%
Dérive 8u/s	48,42%	34,19%	34,19%	80,09%	99,82%
Dérive 16u/s	95,05%	90,81%	89,87%	87,40%	99,99%
Oscillations 0,1Hz, amp = 3u	1,80%	0,90%	0,90%	91,83%	99,25%
Oscillations 1Hz, amp = 3u	99,99%	99,98%	99,98%	96,40%	99,99%
Oscillations 0,1Hz, amp = 8u	65,00%	24,00%	21,36%	88,58%	99,99%
Oscillations 1Hz, amp = 8u	99,99%	100%	100%	99,11%	100%



# Validation industrielle

Environnements de test  
Résultats



## Performances

- + Respect du cahier des charges
- + Simulation de scénarios de pannes

## Robustesse

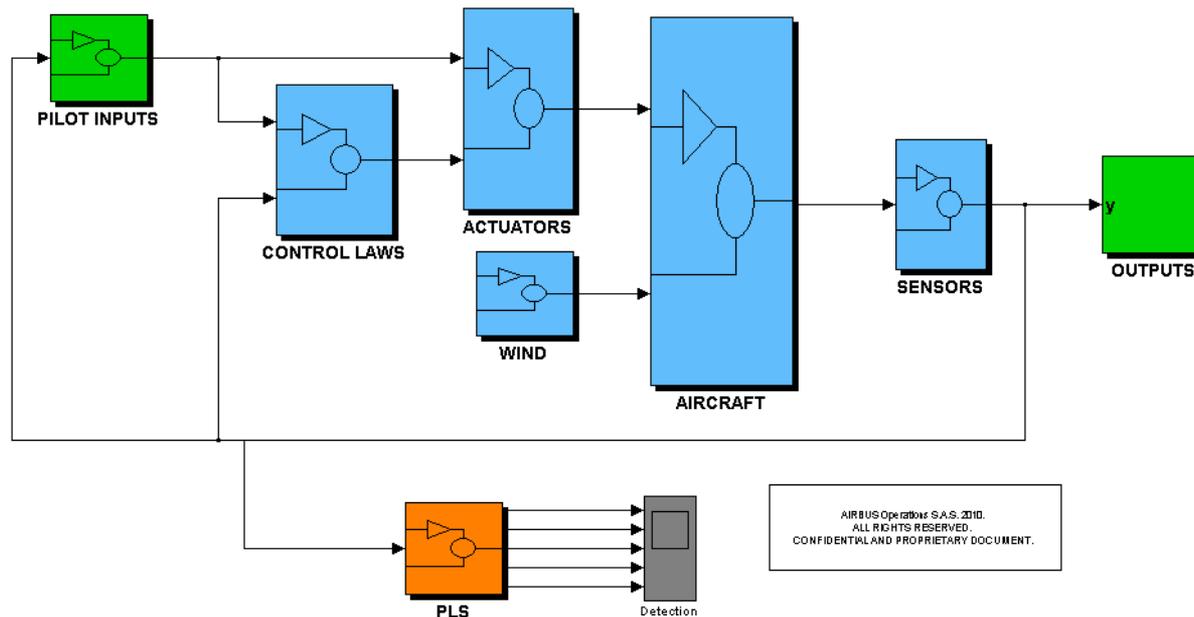
- + Manœuvres
- + Vent

→ Jeux de données de vols réels

→ Vols de 3-4 heures (100 000 échantillons)

→ Banc d'essais AIRBUS

→ Validation de la robustesse



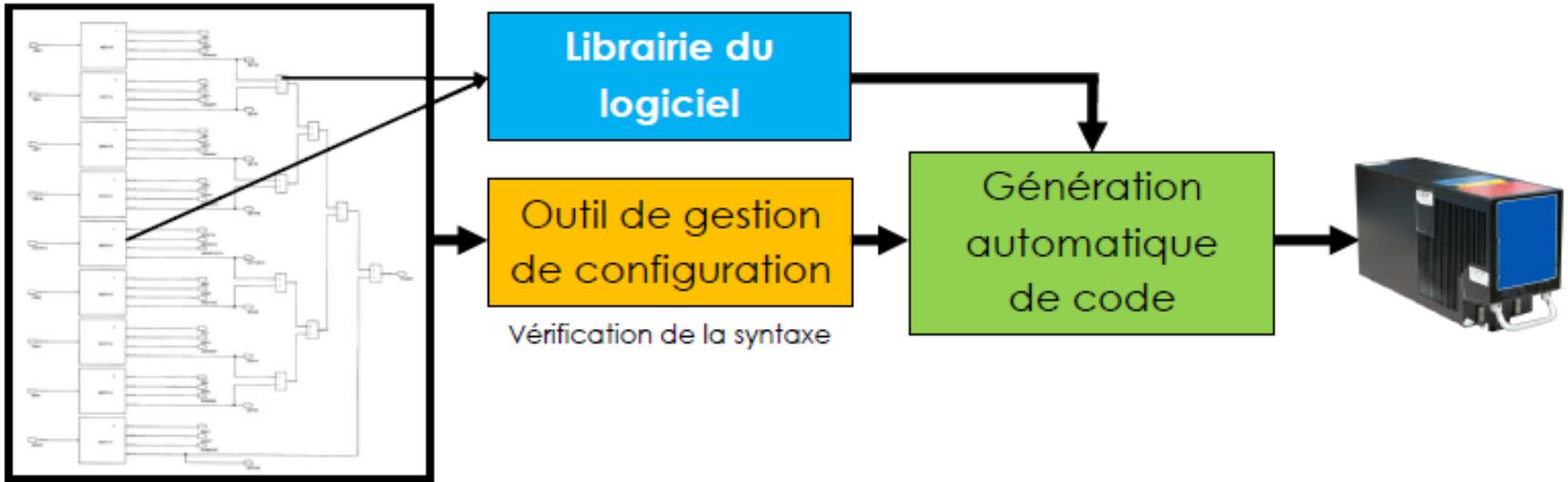


Planche SCADE™

→ **Codage sous SCADE**

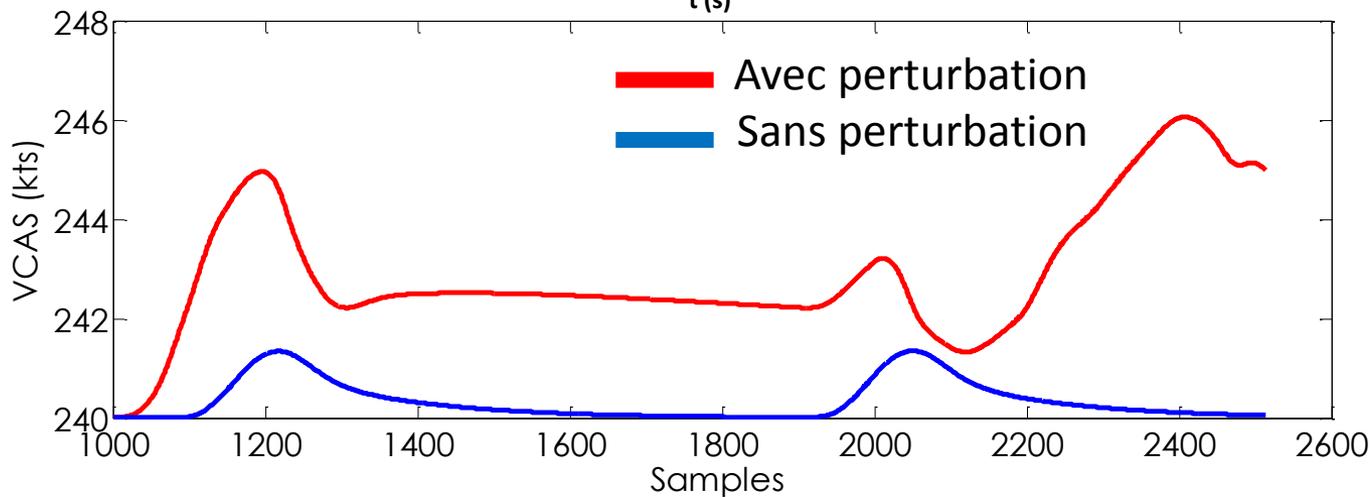
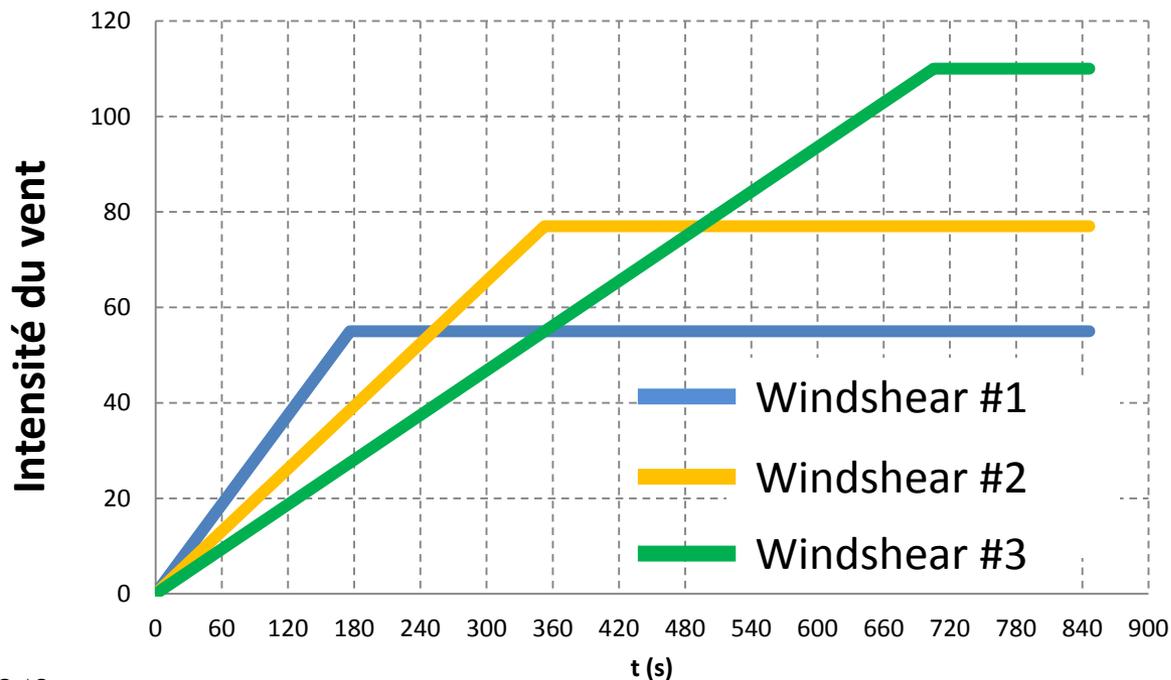
→ **Implémentation de l'algorithme**

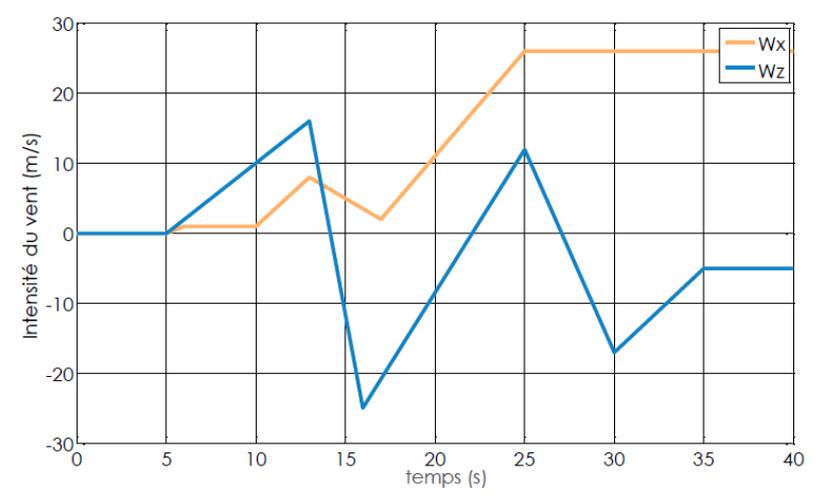
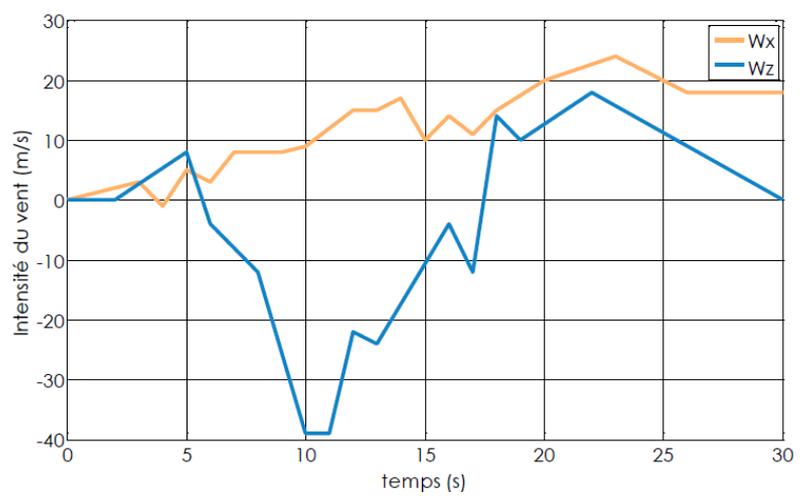
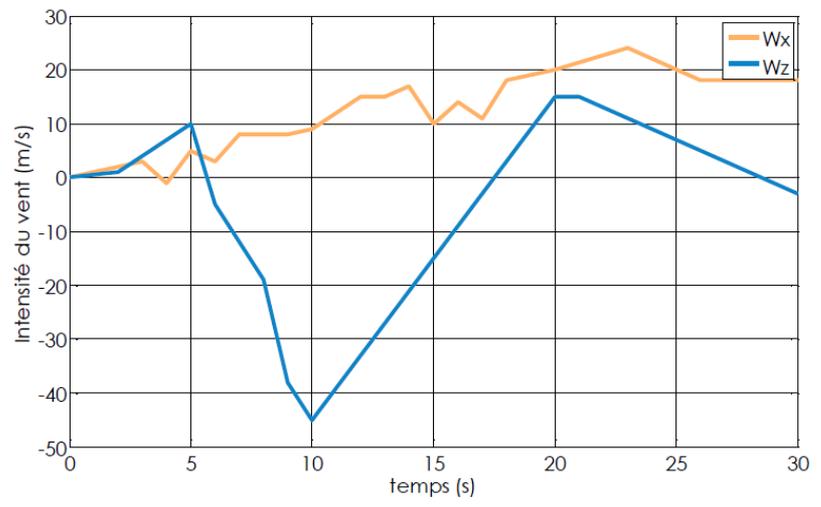
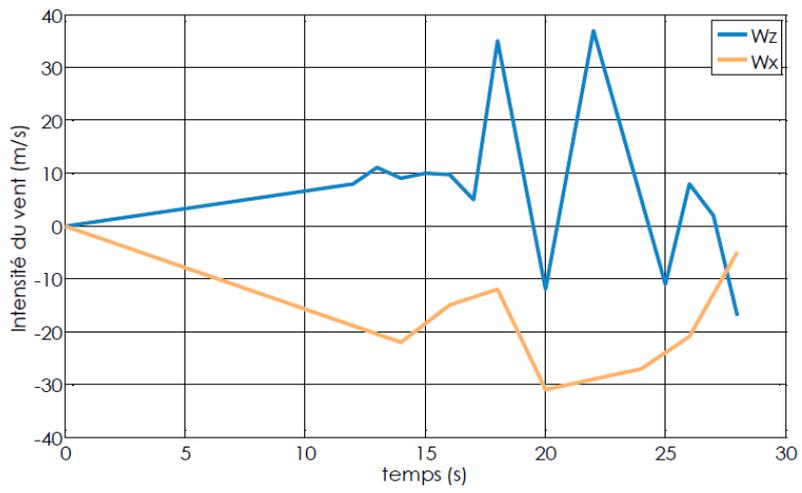


→ **Plateforme OCASIME**

→ **Modèle réaliste de l'avion**

→ **Intégration sur simulateur de vol**





# Performances

Vols	Vol 1	Vol 2	Vol 3
<b>Vol sans dysfonctionnements</b>			
Taux de fausse alarme	0 %	0,4 %	0 %
<b>Pannes représentatives de l'état de l'art</b>			
Biais EDA	100 %	100 %	100 %
Dérive EDA	100 %	100 %	100 %
Oscillations 0,1 Hz, amplitude EDA	100 %	100 %	100 %
<b>Meilleures amplitudes détectables</b>			
Biais minimal détecté à 100 %	0,62 EDA	0,75 EDA	0,50 EDA
Oscillation minimale détectée à 100 %	0,31 EDA, 0,1 Hz	0,37 EDA, 0,1 Hz	0,19 EDA, 0,1 Hz

# Robustesse

Perturbations	Sc.1	Sc. 2	Sc.3	Sc.4
Sans perturbations	0	0	0	0
« Windshear » WX #1	0	0	0	0
« Windshear » WX #2	0	0	0	0
« Windshear » WX #3	0	0	0	0
« Windshear » WY #1	0	0	0	0
« Windshear » WY #2	0	0	0	0
« Windshear » WY #3	0	0	0	0
« Windshear » -WX #1	0	0	0	0
« Windshear » -WX #2	0	0	0	0
« Windshear » -WX #3	0	0	0	0
« Gust » WX 30 kts	0	0	0	0
« Gust » WY 30 kts	0	0	0	0
« Gust » WZ 30 kts	0	0	0	0

Sc.1



Sc.2



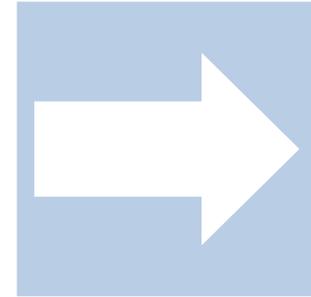
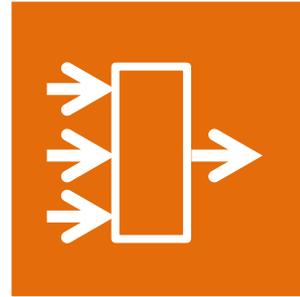
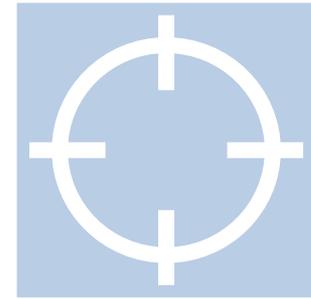
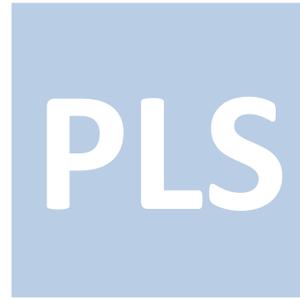
Sc.3



Sc.4



# Sommaire



## Fusion de données

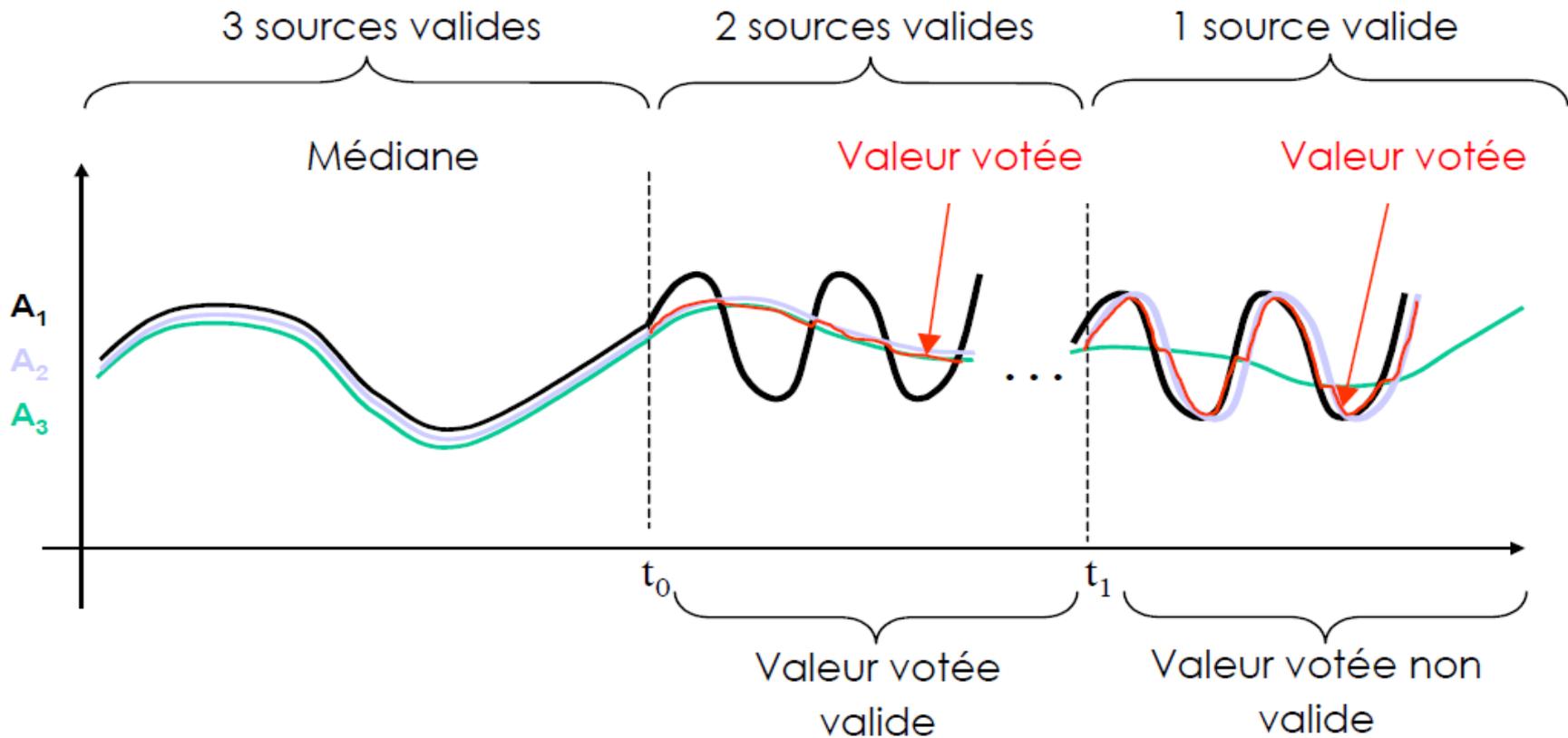
Position problème  
Estimations robustes  
Utilisation de la PLS  
Résultats



# Vote majoritaire

+ Sources évincées

+ ~~Dysfonctionnement simultané~~

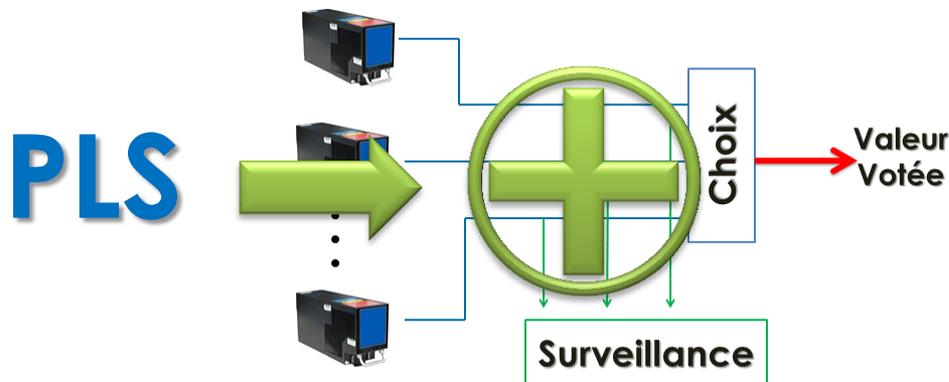


### Vote majoritaire

- + Sources évincées
- + ~~Dysfonctionnement simultané~~

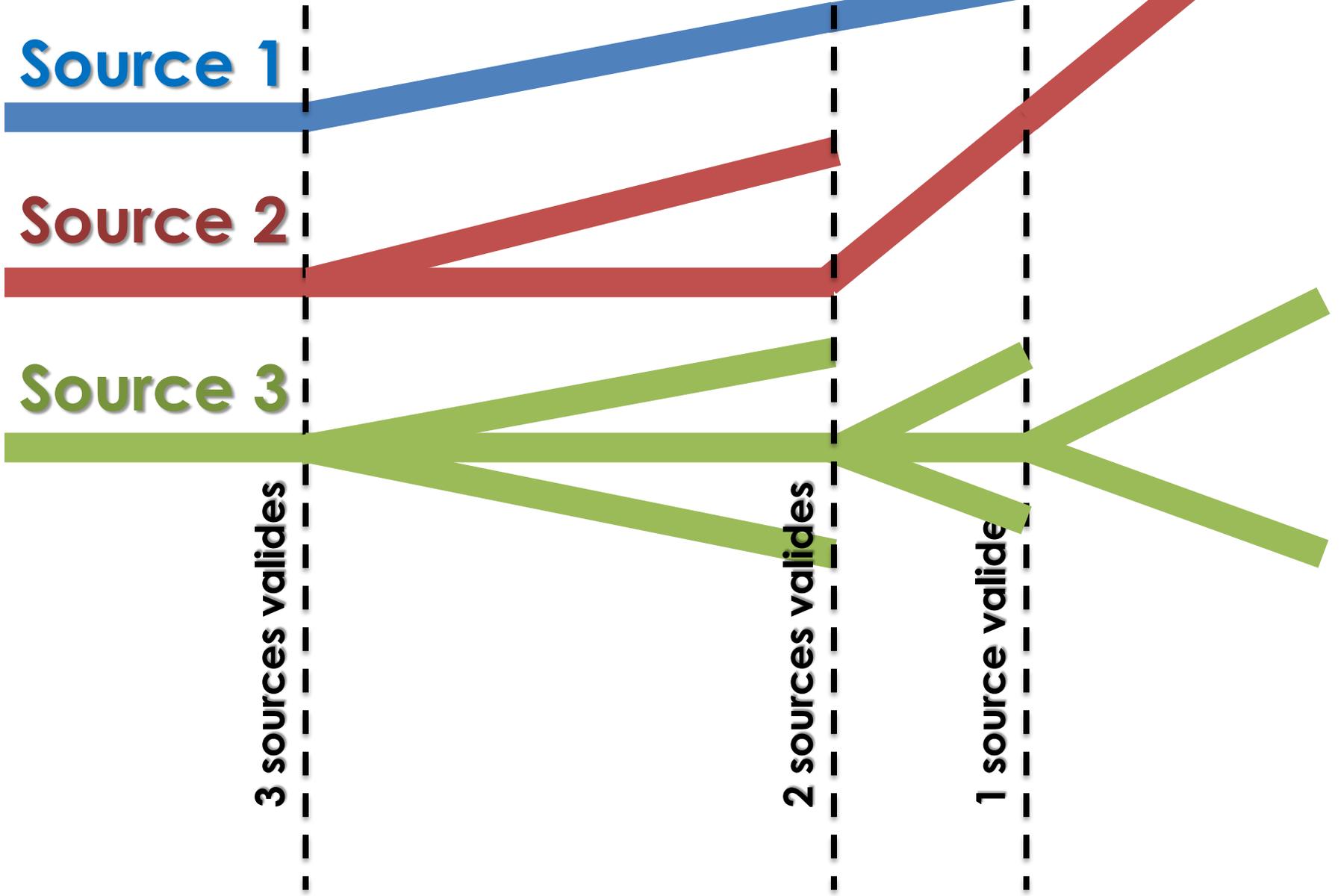
### Utilisation des données PLS

- + Information de validité
- + Capteurs logiciels



# Position du problème

# Fusion de données



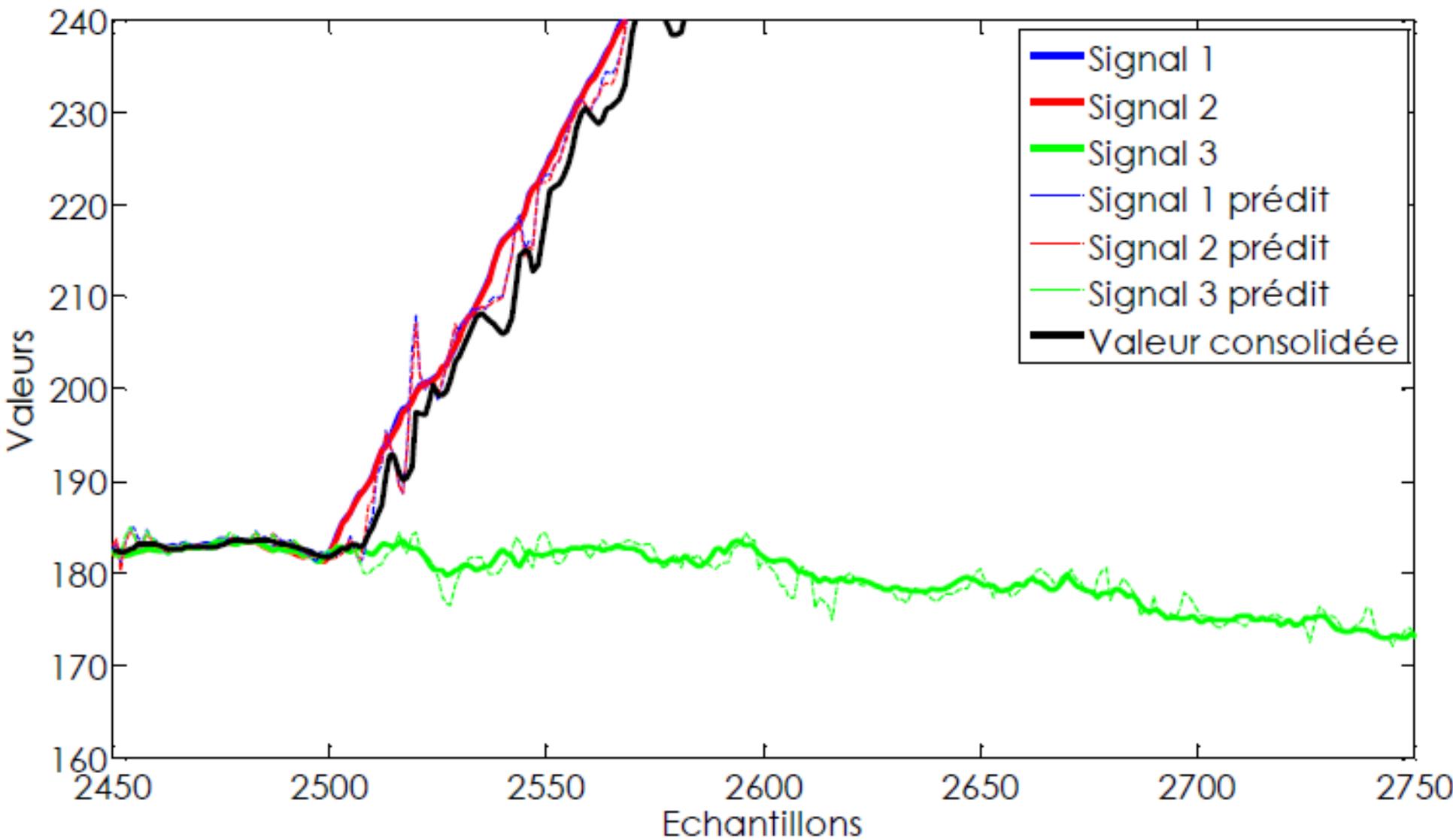
- + Base d'apprentissage non voulue
- + Coût calculatoire faible
- + Trois capteurs + capteurs logiciels

→ **Estimations robustes**

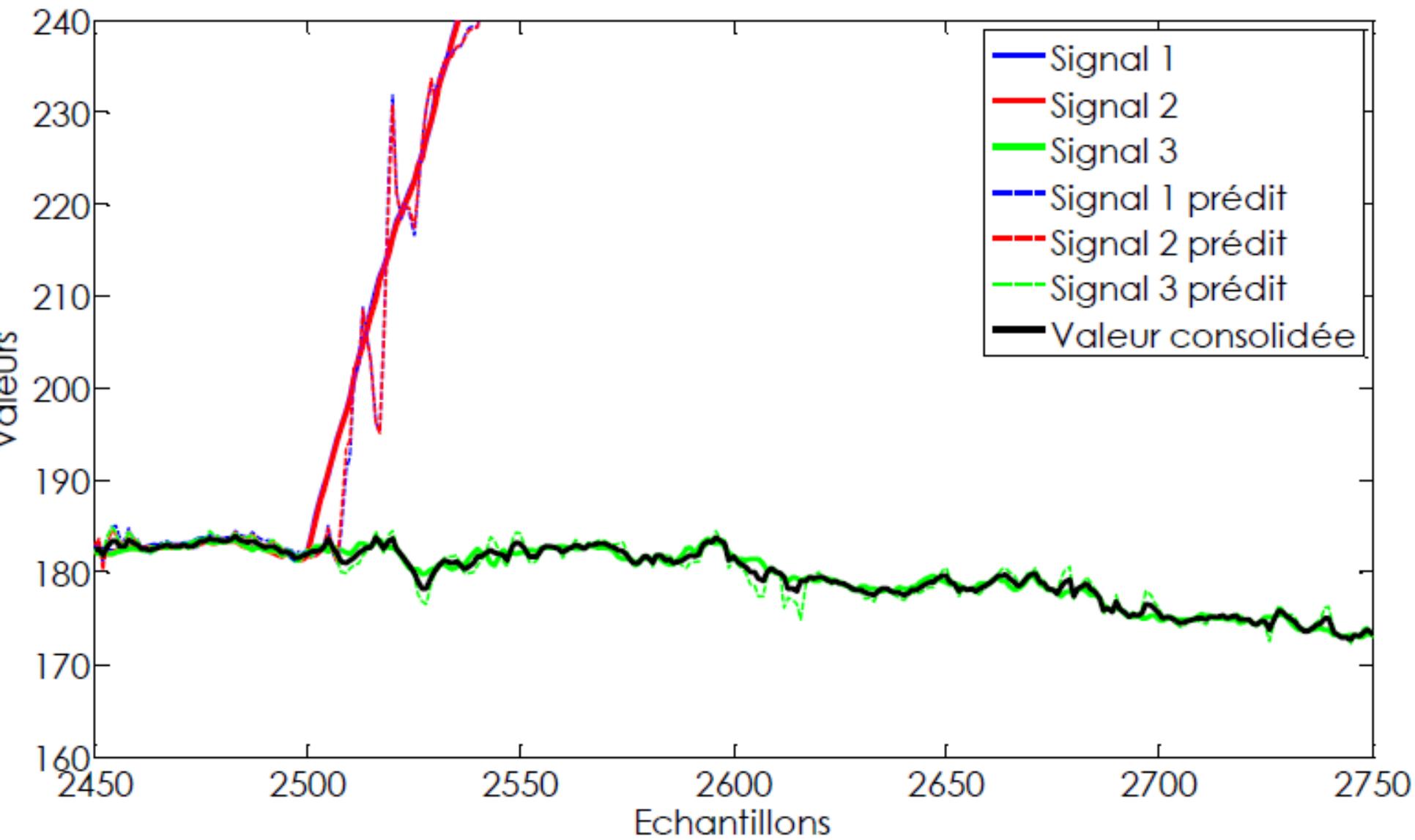
**MCD**

**M-estimation**

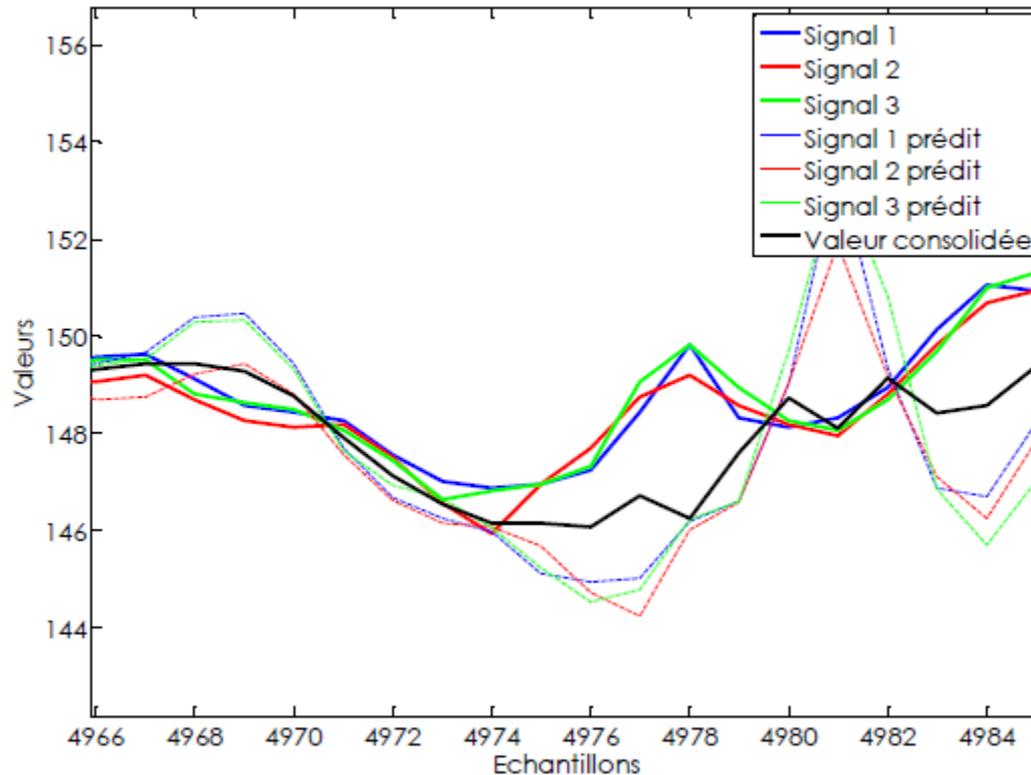
```
graph TD; A[Estimations robustes] --- B[MCD]; A --- C[M-estimation]
```



# Ajout informations PLS



- + Résultats similaires
- + M-estimation plus simple
- + Coût calculatoire trop élevé
- + Valeur fusionnée = moyenne



Source 1



Source 2



Source 3



CHOIX

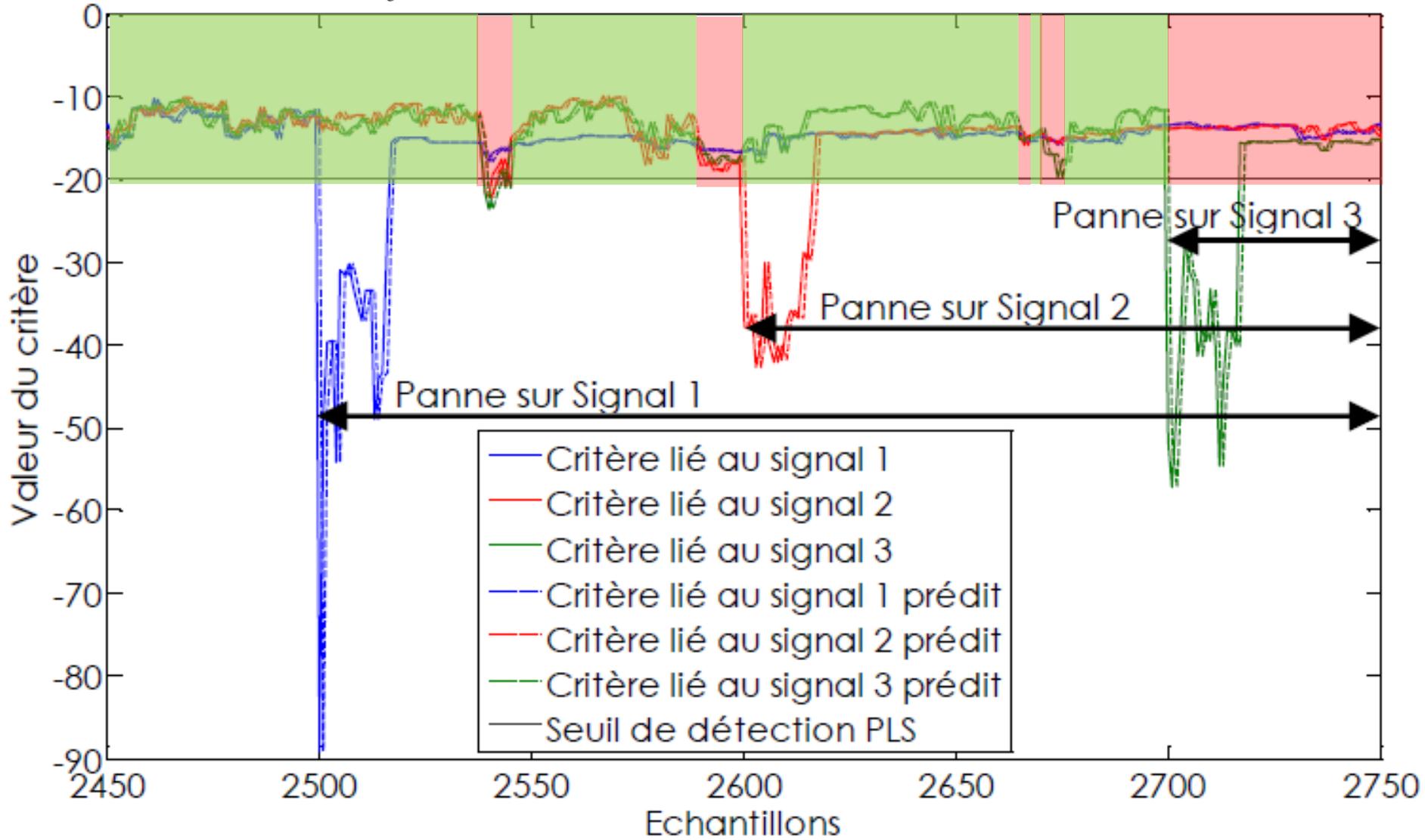
Vote



# Fusion de données

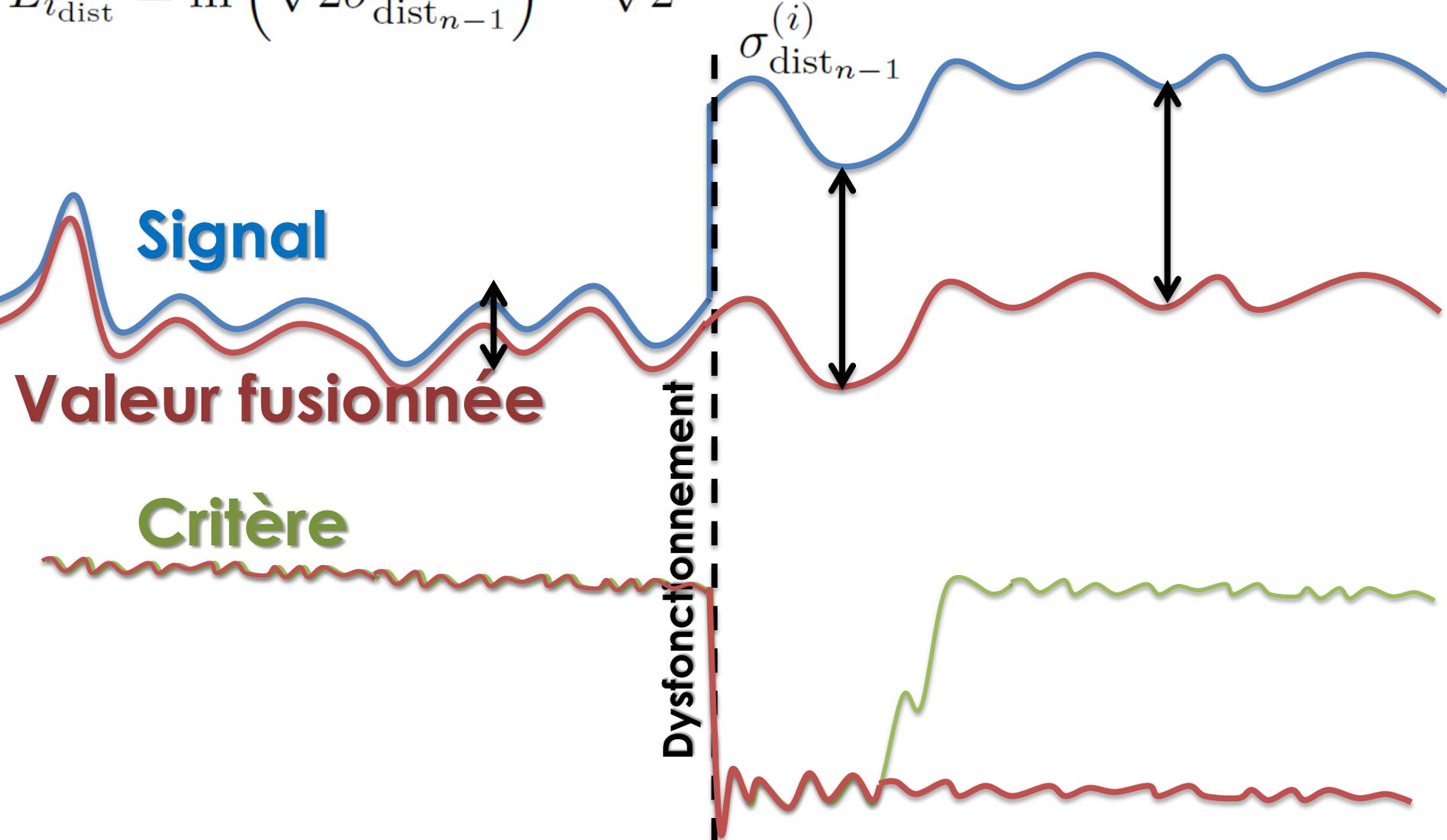
Fusion PLS

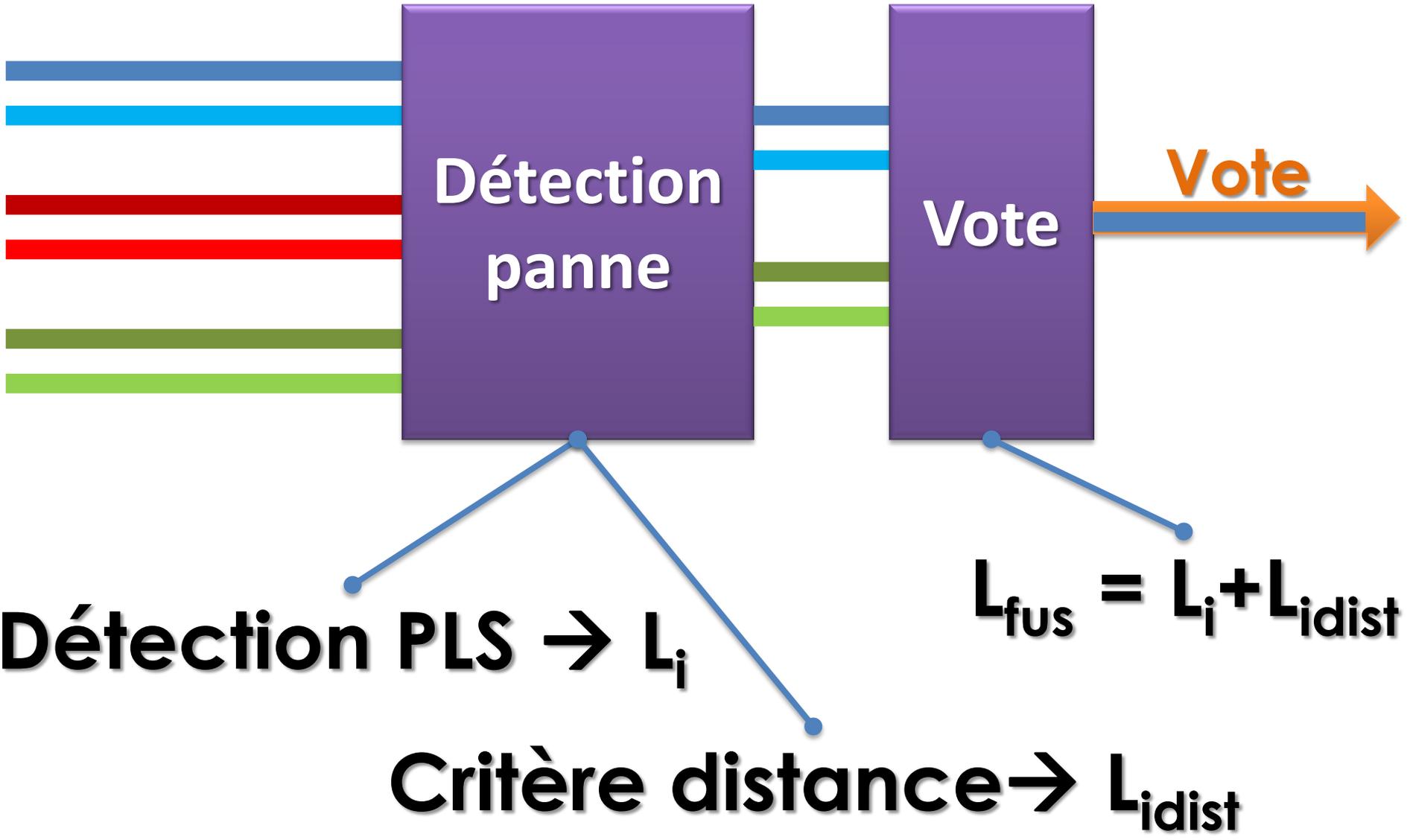
$$L_i = \sum_{j=1}^q \left[ \ln \left( \sqrt{2} \sigma_{n-1}^{(j)} \right) + \sqrt{2} \frac{|b_n^{(j)} - m_{n-1}^{(j)}|}{\sigma_{n-1}^{(j)}} \right]$$



# Utilisation du critère de la distance

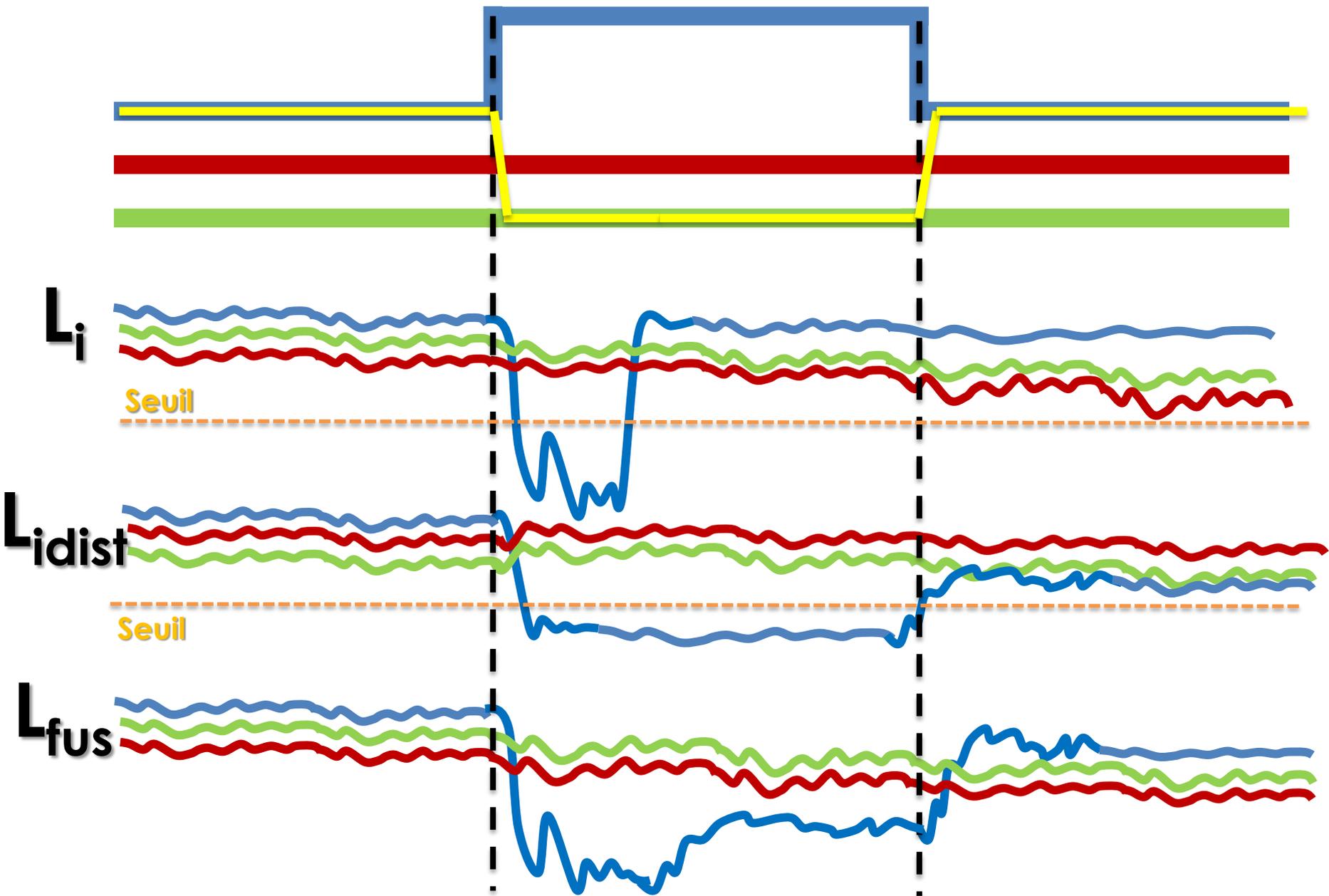
$$L_{i_{\text{dist}}} = \ln \left( \sqrt{2} \sigma_{\text{dist}_{n-1}}^{(i)} \right) - \sqrt{2} \frac{|y_n^{(i)} - y_{n-1}^{(\text{fus})}|}{\sigma_{\text{dist}_{n-1}}^{(i)}}$$





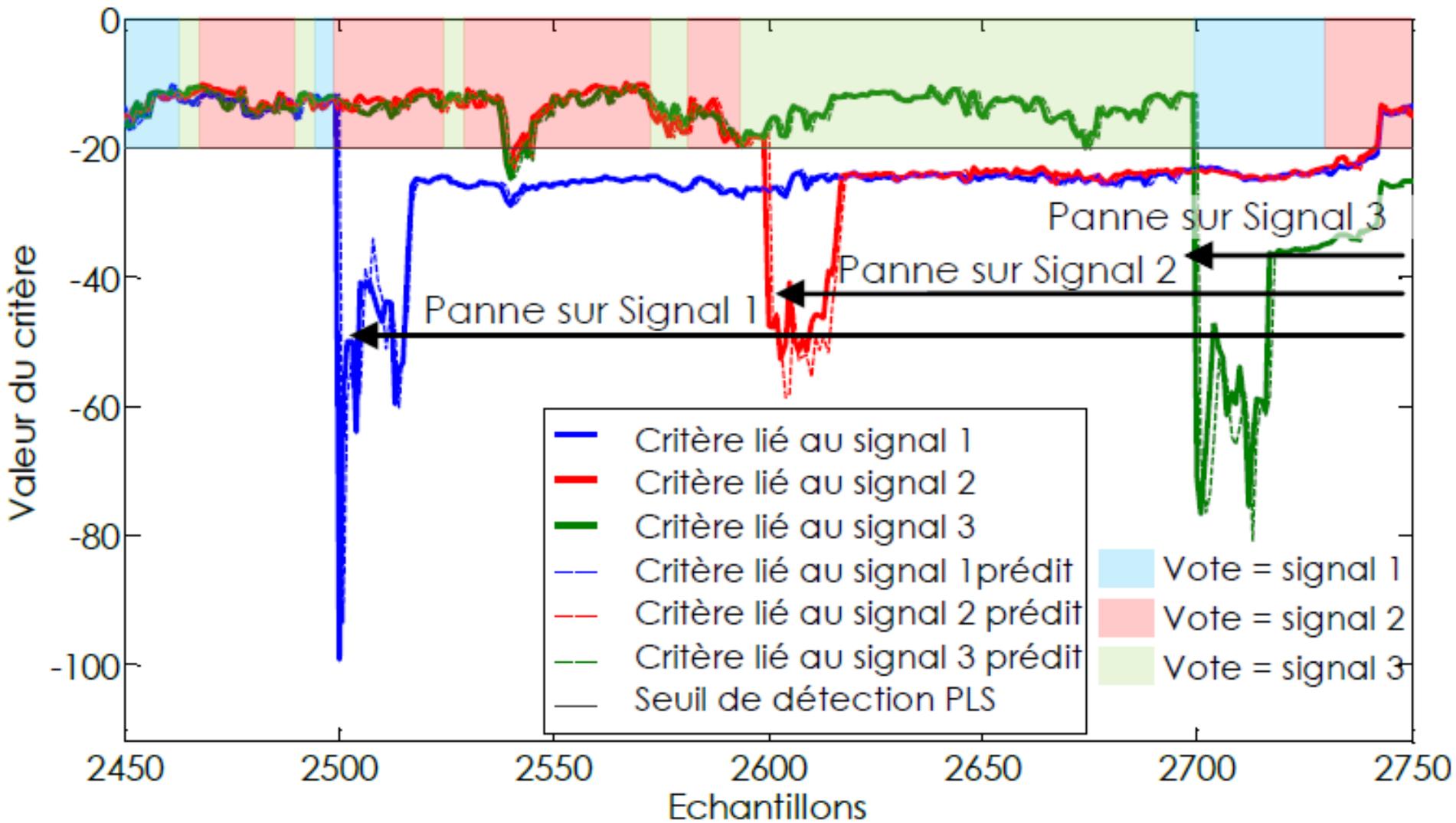
# Fusion de données

Fusion PLS



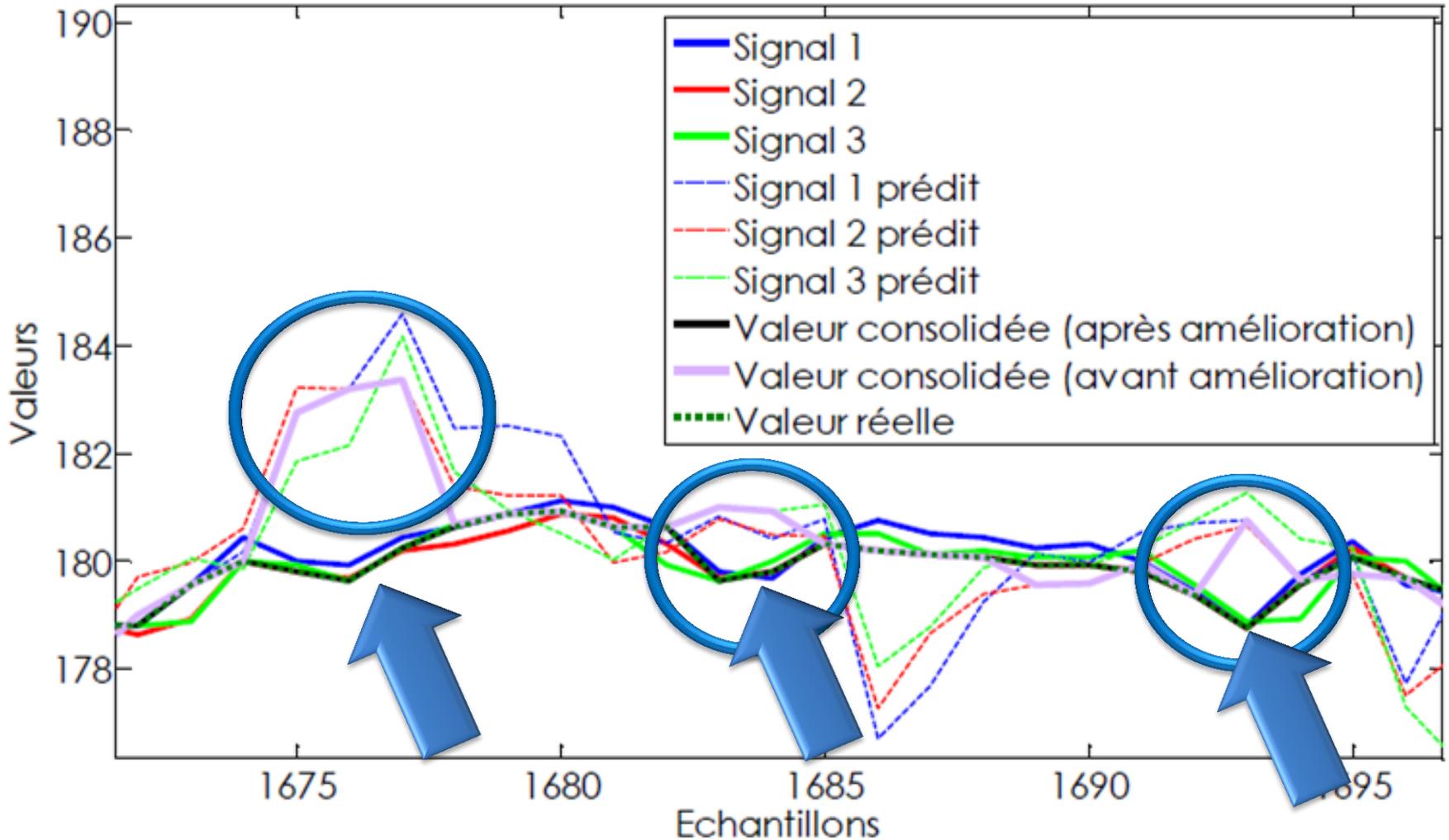
# Fusion de données

Fusion PLS



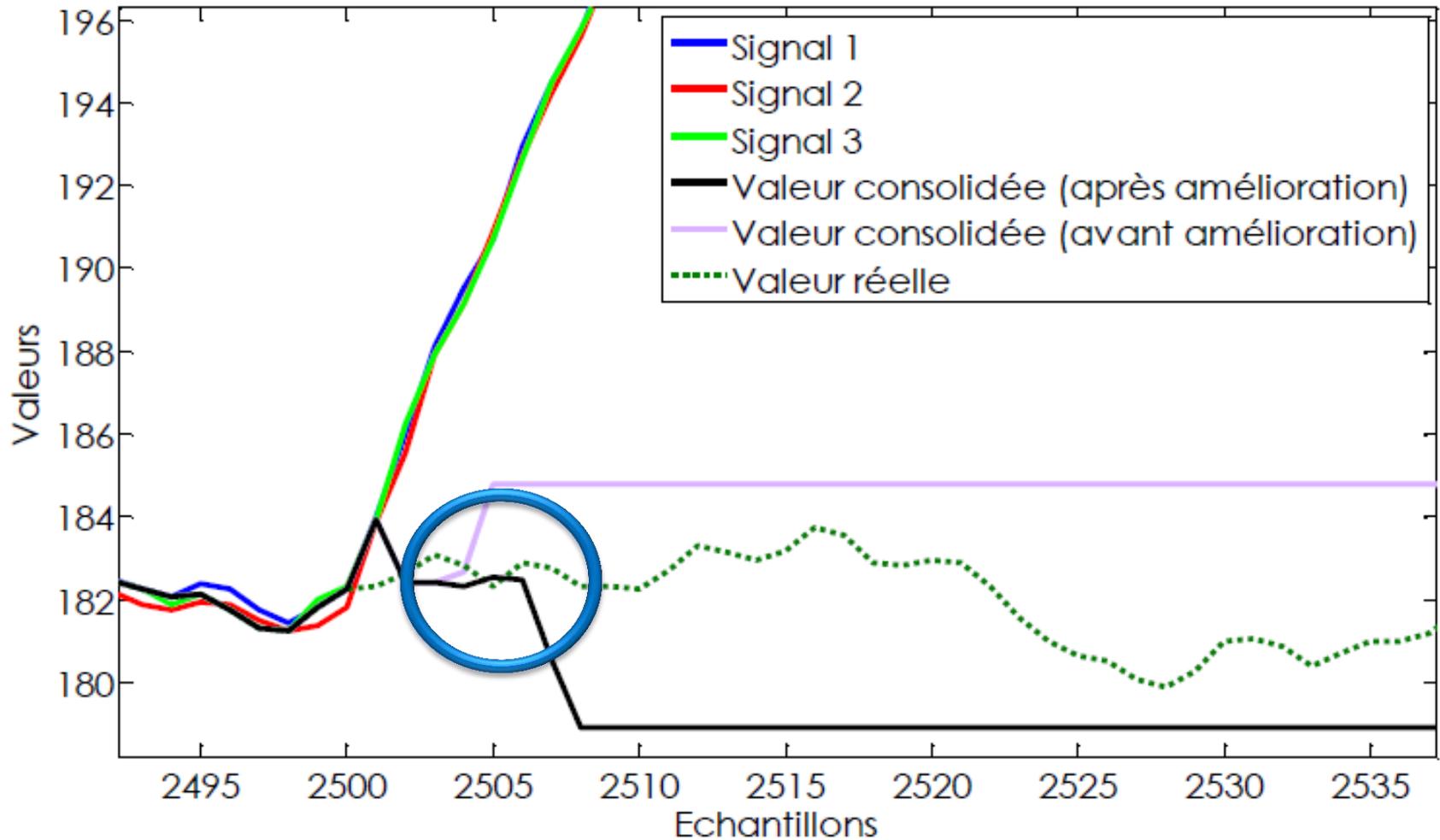
# + Fiabilité des capteurs logiciels

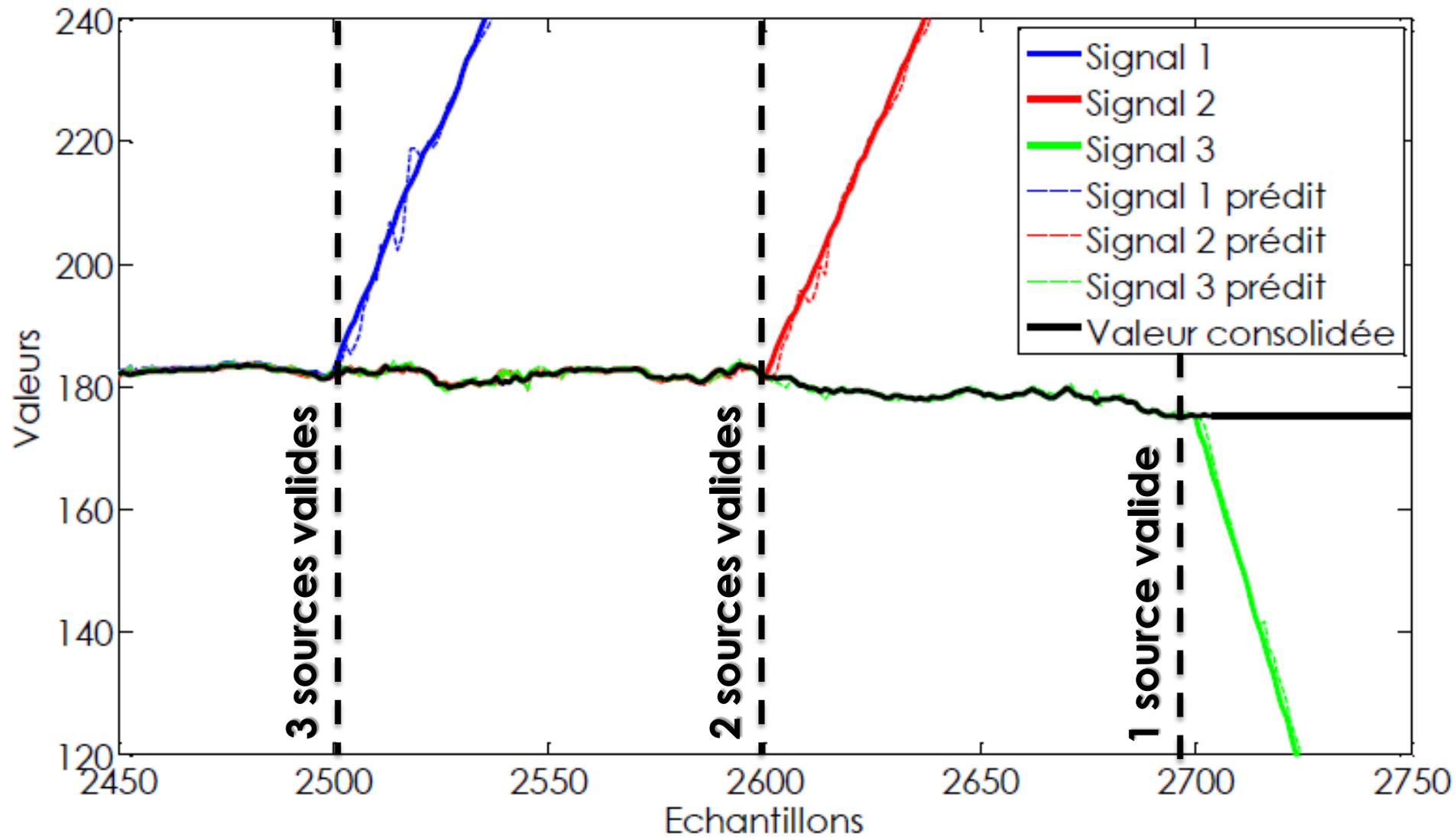
→ **Facteur de confiance**

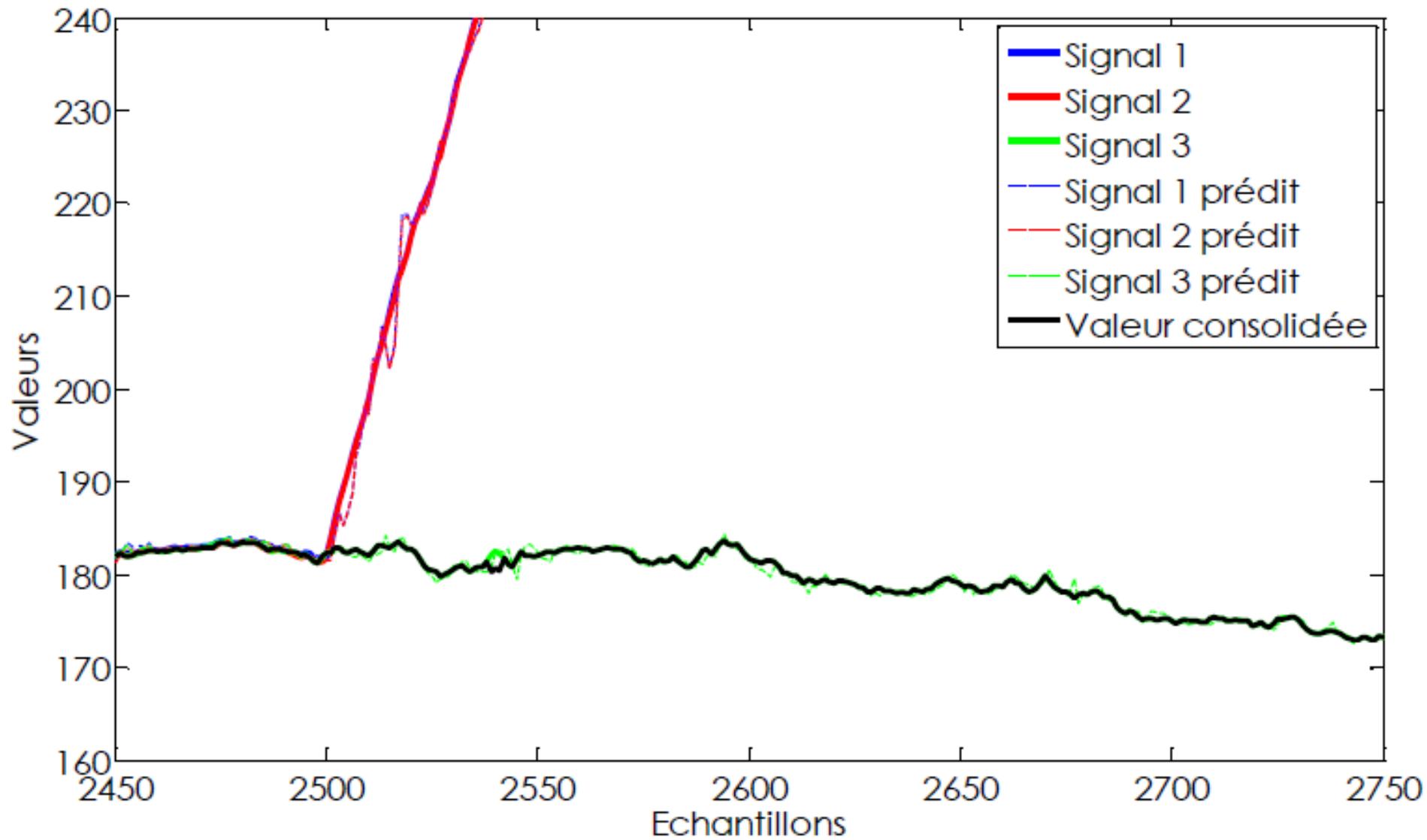


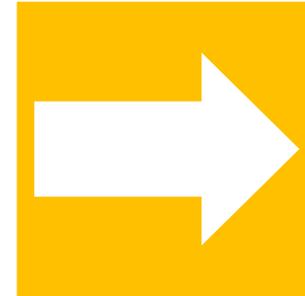
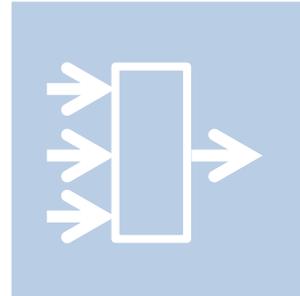
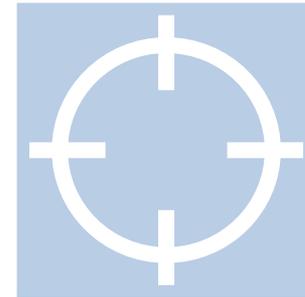
# + Prolonger la validité de la fusion

→ Utilisation de plusieurs prédictions









## Conclusion et perspectives

Détection mono-capteur  
Fusion de données  
Perspectives



## Utilisation de la régression PLS

- + Capteurs logiciels
- + Détection mono-capteur
- + Implémentable
- + Validation industrielle
- + Peu de réglages
- + Adaptable à tout paramètre de vol

## **Amélioration de la consolidation**

- + Utilisation des données PLS**
- + Détection de dysfonctionnements**
- + Choix du meilleur signal**
- + Robuste à trois embarquements**
- + Peu coûteuse**
- + Adaptable à plusieurs capteurs**

### Perspectives

- + **Application PLS à plusieurs sources**
- + **Utilisation de nouveaux paramètres**
- + **Validation industrielle**

# MERCI

