



# Quelques Algorithmes classiques de Traitement du Signal dans l'Embarqué et architectures dédiées

Philippe Ravier, enseignant-chercheur Laboratoire PRISME – Polytech Orléans Université d'Orléans









Campus Orléans

Sites IUT Bourges

**INSA CVL** 

Site de Chartres

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES CENTRE VAL DE LOIRE

Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique



Recherche et Ingénierie

√ Systèmes intelligents

√ Mécatronique

- √ Fluides
- ✓ Energie
- ✓ Combustion

## ✓ Propulsion

# Sites IUT Indre + HEA

#### www.univ-orleans.fr/prisme

Directeur du Laboratoire : Azeddine Kourta

Responsables Départements :

Nacim Ramdani et Pascal Higelin

- Multisite
- √ 90 enseignants-chercheurs
- √ 80 doctorants

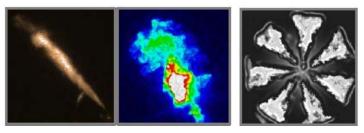




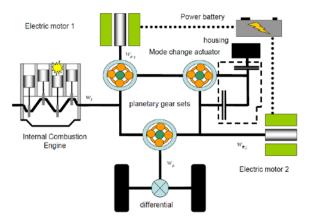
## Fluides Energie Combustion Propulsion

## Amélioration des performances Réduction nuisances et risques

#### **Energie Combustion Moteurs**



Carburants, nouveaux modes de combustion

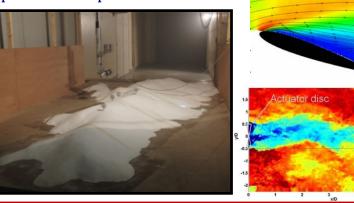


Contrôle et optimisation de rendement moteur Gestion de l'énergie

#### **Ecoulements et Systèmes Aérodynamiques**

Amélioration des performances aérodynamiques

Dispersion des polluants



#### **Combustion et Explosions**





Explosions, déflagrations, détonations Risques Incendies. Approches métrologiques



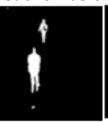
## Systèmes Intelligents et Robotique

Systèmes de Santé. Médecine Personnalisée. Maintien à Domicile. Gestion de l'Energie. Industrie du Futur.

#### **Image et Vision**

Vision Géométrique. Images multimodales. Reconnaissance visuelle. Fusion. Diagnostic.









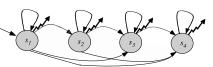




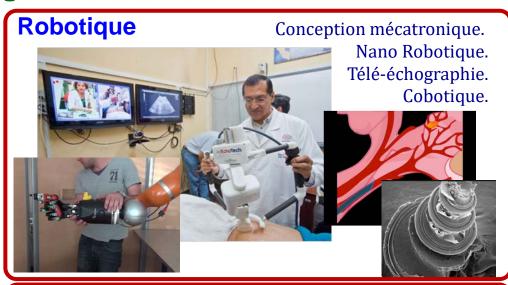


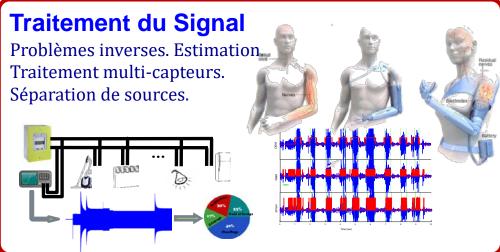
#### **Automatique**

Sureté de fonctionnement. Politique de maintenance. Supervision. Diagnostic. Capteurs logiciels. Commande. Planification.









26/10/2018



## Plateformes embarquées - Axe signal

#### **Dispositif Vicon**

- Système de mesure permettant de localiser de manière précise et en temps réel plusieurs objets dans un environnement de grande dimension.
- Composé de plusieurs **caméras** optoélectroniques fixes, chacune entourée de LEDs émettant un rayonnement infrarouge.
- Localisation dans la scène des **marqueurs** rétroréfléchissants fixés sur le sujet en mouvement.

#### Démo Vicon

- Avantages : liberté de mouvement (marqueurs légers et petits), système très précis.
- Inconvénients : réflexion parasites, salle dédiée (sans source lumineuse importante), au moins 2 caméras doivent voir le marqueur.





## Plateformes embarquées - Axe signal

## **Système TEA**

- Localisation (centrales inertielles)
- Mesures électrophysiologiques (ECG, EMG, impédancemétrie, respiration)
- Eye tracker ambulatoire (TOBII)
- Paramètres d'ambiance physique (bruit, luminosité, t°, hygrométrie, pCO2)
- Logiciel de capture, synchronisation et post traitement CAPTIV

réhabilitation et analyse de la marche

posture, équilibre et contrôle moteur



Vidéo

Projet ECOTECH: caractériser les pertes d'équilibre en contexte

écologique de vie : application à la maladie de Parkinson

Démo





## Le traitement du signal dans l'embarqué

- ✓ **Problématique d'une application :** il faut tenir compte de l'architecture de l'embarqué / de la complexité algorithmique / des contraintes physiques (temps, énergie, encombrement, radiation...)
- ✓ **Adéquation Algorithme-Architecture** : optimisation d'une architecture dédiée à un algorithme avec optimisation de la spécification de cet algorithme pour améliorer son implantation
- ✓ **Objectif**: minimisation de la ressource matérielle => algorithmes 'simples'
- ✓ Les plus classiques :
  - filtres RIF / RII (à coefficients constants)
  - algorithmes adaptatifs LMS, RLS et Kalman (à coefficients évolutifs)
  - la transformée de Fourier (FFT)

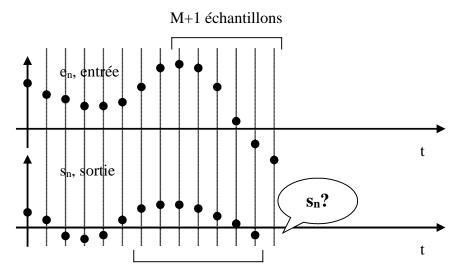




## Algorithmes de TS dans l'embarqué : les filtres



$$\sum_{j=0}^{P} a_{j}.s_{n-j} = \sum_{i=0}^{Q} b_{i}.e_{n-i}$$
 équation aux différences



K échantillons

#### Exemples:

- Correcteur proportionnel :  $s_{n-j} = K.e_n$  (non récursif)
- Dérivateur :  $s_n = \frac{e_n e_{n-1}}{T_e}$  (non récursif)
- Intégrateur :  $s_n = s_{n-1} + T_e$ .  $e_n$  (récursif)

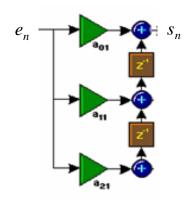


## Algorithmes de TS dans l'embarqué : RIF et RII

#### Les filtres RIF

$$s_n = \sum_{i=0}^{Q} b_i \cdot e_{n-i}$$

#### **Architecture transversale**

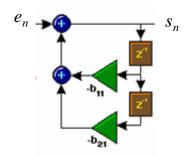


- Avantages : structure stable, phase linéaire
- Inconvénients : nécessiter peut beaucoup de coefficients pour filtrage performant

#### Les filtres RII

$$s_n = \sum_{i=0}^{Q} b_i \cdot e_{n-i} - \sum_{j=1}^{P} a_j \cdot s_{n-j}$$

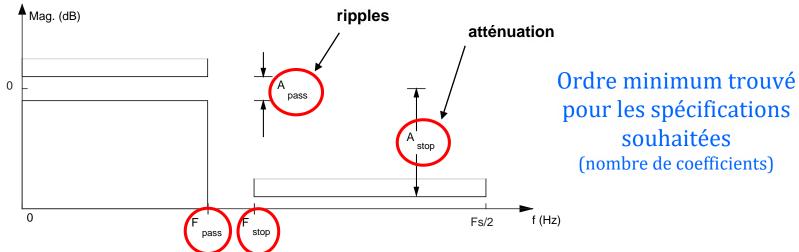
#### Architecture récursive



- Avantages : peu de coefficients car « mémoire » infinie
- Inconvénients : peuvent être instables, sensibles au bruit

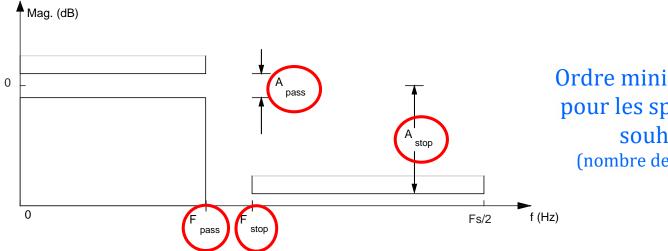


## Filtres RIF et RII : spécifications

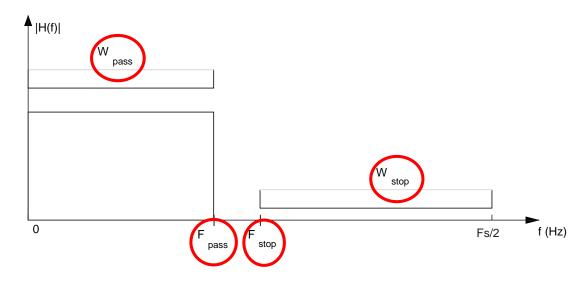




## Filtres RIF et RII : spécifications



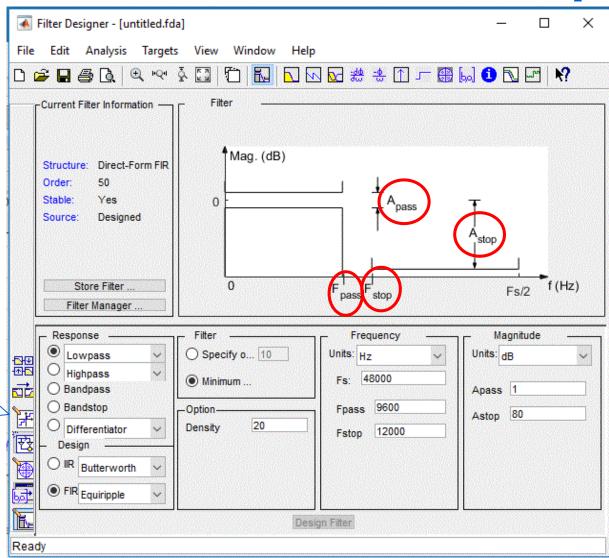
Ordre minimum trouvé pour les spécifications souhaitées (nombre de coefficients)



Ordre spécifié avec flexibilité sur les spécifications



## Filtres RIF et RII: conception



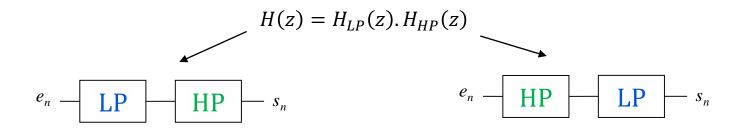
Possibilité d'évaluer l'impact du codage des coefficients sur le gabarit du filtre

Source : interface Matlab de conception de filtres



## Filtres RIF et RII : implémentation

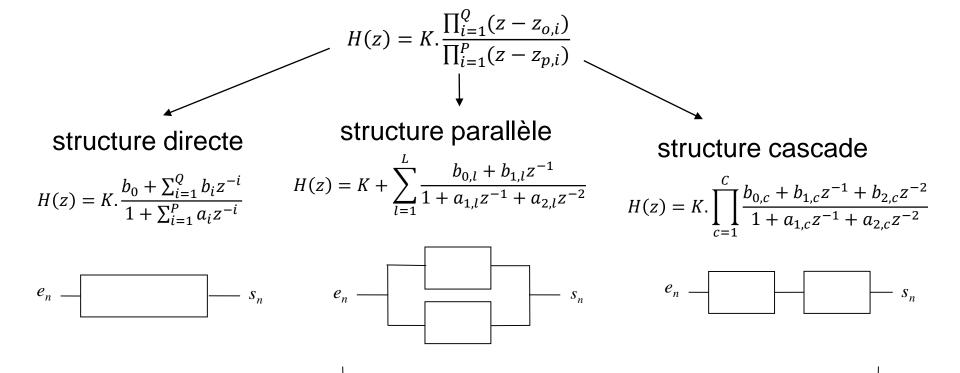
Une même réponse fréquentielle peut être implantée sous différents ordres :





## Filtres RIF et RII : implémentation

Une même réponse fréquentielle peut être implantée sous différentes structures :



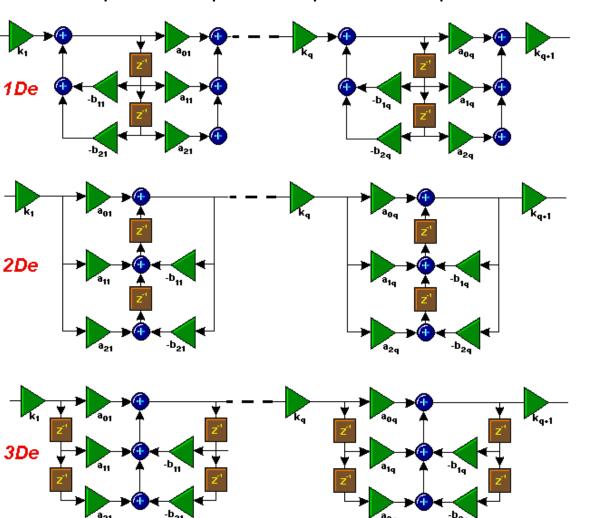
Structures moins sensibles aux variations des coefficients





## Filtres RIF et RII : implémentation

Une même réponse fréquentielle peut être implantée sous différentes topologies :



Exemple de la structure cascade

#### Gestion de la dynamique

Risque de dépassement en sortie + ou x

Dépassement temporaire possible dans une suite de sommations si le résultats final tient dans la dynamique (en complément à 2)

## Mise en place de facteurs d'échelle

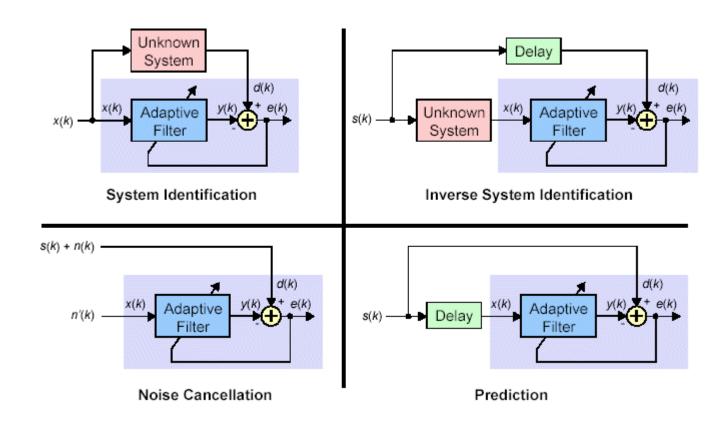
Dynamique gérée

Bruit quantification ajouté



## Algorithmes de TS dans l'embarqué : filtres adaptatifs

#### Architecture de filtres adaptatifs



Objectif : filtrer x(k) de façon à ce que y(k) soit le plus proche possible du signal désiré d(k)

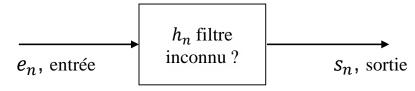






## Algorithmes de TS dans l'embarqué : LMS

#### L'algorithme adaptatif LMS : le gradient stochastique



Hypothèse: filtre RIF 
$$s_n = \sum_{j=0}^{Q} h_j . e_{n-j} = \boldsymbol{h}^T \boldsymbol{e}_n$$

<u>Principe</u>: **h** n'est pas connu et on va chercher à le faire évoluer à chaque instant *n* pour que la sortie du filtre soit celle observée

La sortie est donc estimée  $\hat{s}_n = \mathbf{h}^T \mathbf{e}_n$  avec une erreur  $\varepsilon_n = s_n - \hat{s}_n$ 

<u>Résolution</u>: on utilise le critère  $J(\mathbf{h}) = E\{|\varepsilon_n|^2\}$  à minimiser

#### **Solution bloc**

$$\boldsymbol{h}_n = \boldsymbol{R}_n^{-1} E\{\boldsymbol{e}_n s_n\} \text{ avec } \boldsymbol{R}_n = E\{\boldsymbol{e}_n \boldsymbol{e}_n^T\}$$

#### Solution itérative

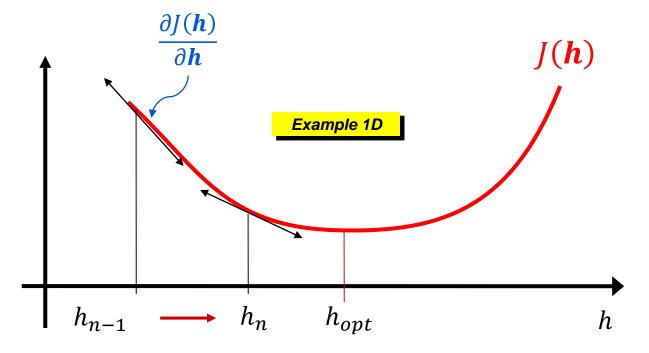
$$\boldsymbol{h}_n = \boldsymbol{h}_{n-1} - \mu \frac{\partial J(\boldsymbol{h})}{\partial \boldsymbol{h}}$$



## Algorithmes de TS dans l'embarqué : LMS

#### L'algorithme adaptatif LMS : le gradient stochastique

Le critère à minimiser est instantané  $J(\mathbf{h}) = |\varepsilon_n|^2$ 

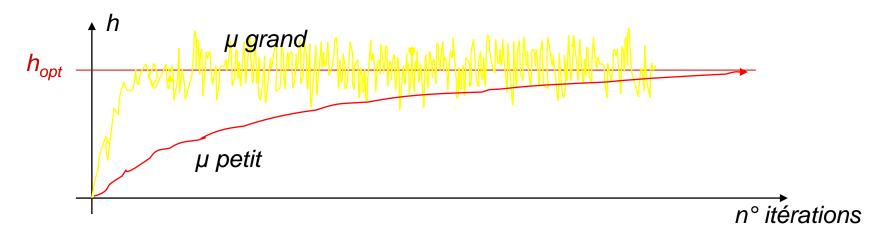


**Solution itérative :**  $h_n = h_{n-1} + 2\mu e_n \varepsilon_n$  avec  $\varepsilon_n = s_n - h_{n-1}^T e_n$ 



## Algorithmes de TS dans l'embarqué : LMS

**Choix du pas d'adaptation** µ



**Convergence** 

$$0 < \mu < \frac{2}{Q.P_s}$$

avec *Q* le nombre de paramètres et P<sub>s</sub> la puissance du signal s

Variantes avec gradients à pas variable, adaptatifs...



## Algorithmes de TS dans l'embarqué : RLS

✓ L'algorithme adaptatif RLS : les moindres carrés récursifs

On considère une version adaptative de chaque matrice de la solution bloc

Solution itérative :  $h_n = h_{n-1} - 2\mu e_n \varepsilon_n$  devient  $h_n = h_{n-1} + G_n e_n \varepsilon_n$ 

Le gain  $G_n$  est mis à jour à chaque itération (fait intervenir  $e_n$  et un gain  $\lambda$ )

- Avantages : convergence rapide du RLS et meilleure qualité que LMS (annulation du bruit de perturbation)
- Inconvénients : complexité du , coût espace mémoire



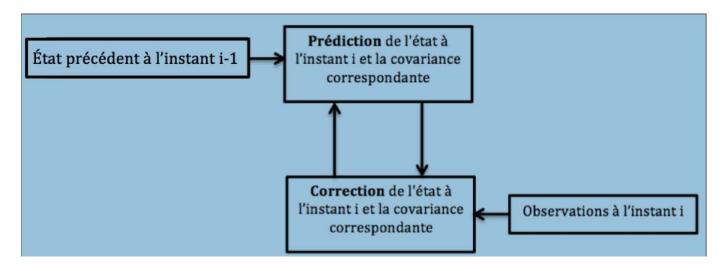
## Algorithmes de TS dans l'embarqué : Kalman

#### ✓ Le filtre de Kalman :

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + w_k$$
$$Z_k = CX_k + v_k$$

Filtre permettant d'estimer l'état optimal d'un système, en fonction de mesures réelles bruitées

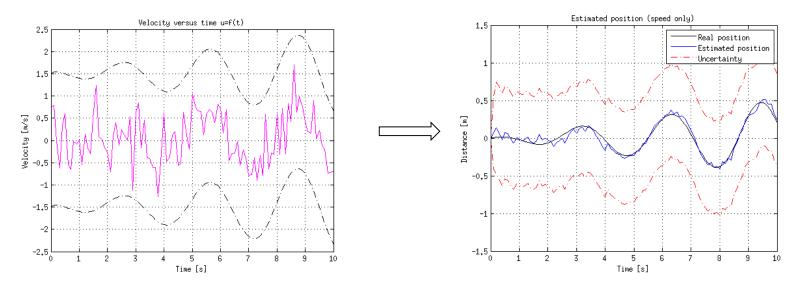
Principe: minimisation de la covariance de l'erreur à posteriori





## Algorithmes de TS dans l'embarqué

#### ✓ Prédiction, estimation, filtrage



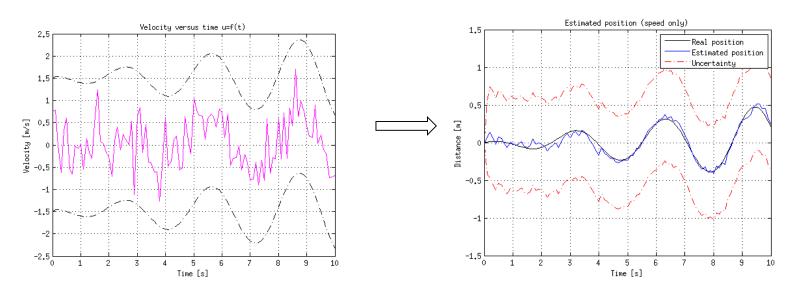
Source https://www.lucidarme.me/exemple-de-filtre-de-kalman/

✓ Souvent utilisé en couplage de systèmes (fusion par sélection des meilleures données et correction mutuelle) pour améliorer la précision Navigation inertielle / GPS /wifi



## Algorithmes de TS dans l'embarqué

#### Prédiction, estimation, filtrage



Source https://www.lucidarme.me/exemple-de-filtre-de-kalman/

- Avantages: filtre optimal (meilleur filtre linéaire, EQM minimale)
- Inconvénients : formalisation des données avec une équation d'état et une d'observation, optimalité sous conditions (bruits blancs gaussiens indépendants et centrés, linéarité)





## Tendances matérielles et cibles actuelles

✓ Rendre les objets communicants et réduire la quantité de traitement embarqué : déport de la complexité vers le concentrateur

**✓** Composants spécifiques ASIC intégrant le traitement, pSoc

**✓** Evolution langages libres : openCV, python...



# **Questions?**