



# Analyse du stabilogramme par Décomposition Modale Empirique

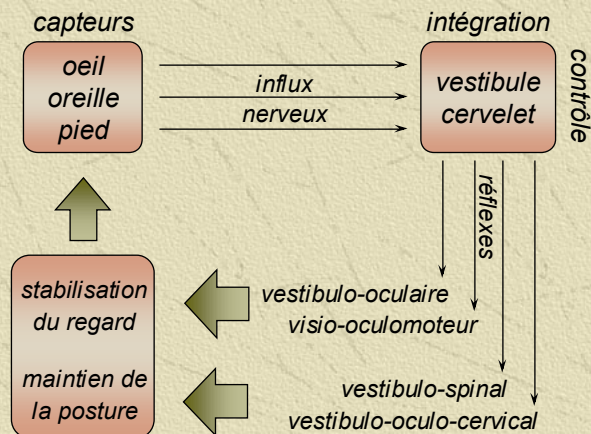
Régis Fournier, Eric Deléchelle, Jacques Lemoine

[rfournier@univ-paris12.fr](mailto:rfournier@univ-paris12.fr)

## Position du problème

### *Le système tonique postural*

*garant d'une posture idéale du corps*



## Position du problème

### *Enjeux*

#### **Investigations oto-neurologiques**

*aide au diagnostic des troubles de l'équilibre*

*choix thérapeutique*

*effets de la rééducation*

#### **Étude du système postural**

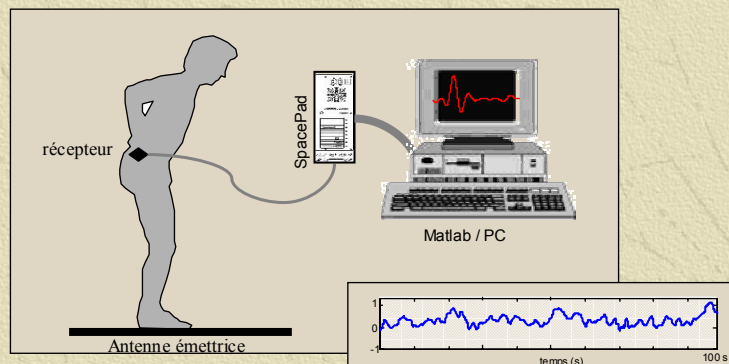
*modélisation*

3

## Position du problème

### *Acquisition du signal stabilométrique*

- mesure de position par capteurs électromagnétiques
- acquisition à 60 Hz sur PC (sous Matlab)
- filtrage 0-5 Hz (Butterworth 6)

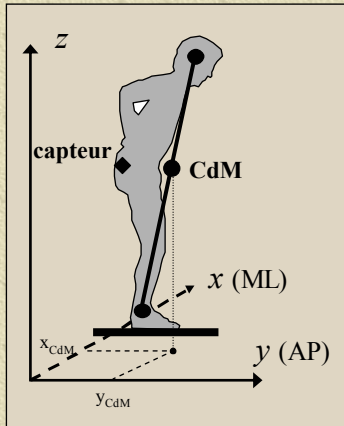


4



## Position du problème

### *Modèle du pendule inversé*



#### Position du Centre de Masse

$(x_{CdM}, y_{CdM})$

modèle du pendule inversé  
équilibre quasi-statique



le capteur mesure les variations de  
position du CdM

5

## Analyse

### *Méthodes d'analyse classiques*

#### Extraction de paramètres posturographiques

##### Mesures statistiques sommaires

- mesures **moyennes** (distance parcourue, vitesse, ...)
- mesures **quadratiques** (surface balayée, variance, ...)
- mesures **fréquentielles, fractales**



**fiabilité** raisonnable



faible **sensibilité** par rapport aux entrées testées



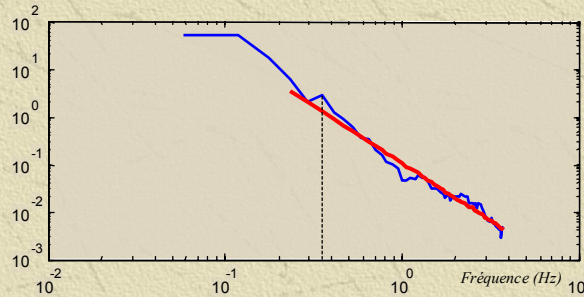
**propriétés dynamiques** non prises en compte

6

## Analyse

### Méthodes spectrales

- le signal stabilométrique est non stationnaire ( $F=2,3$   $p<0,05$ )

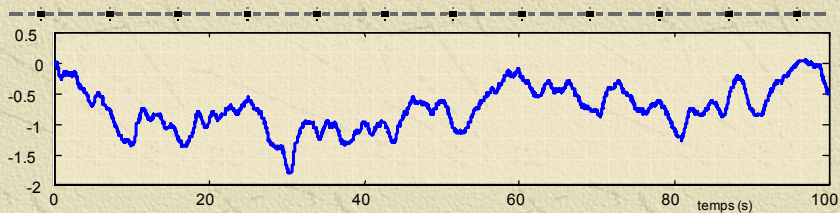


- bande de fréquence de 0 à 3 Hz
- pic de l'ordre de 0,4 Hz (balancements du corps)
- spectre en  $1/f^\beta$  avec  $\beta \approx 2,5$
- ✓ **modélisation par processus stochastique**

7

## Analogie mouvement Brownien

### Fonction de diffusion du signal stabilométrique

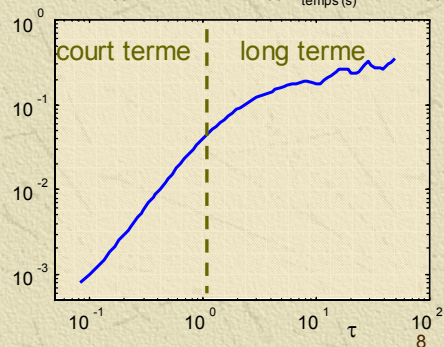


déplacement quadratique entre deux instants:

$$\langle \Delta x^2 \rangle = E \{ [x(t+\Delta t) - x(t)]^2 \}$$

$$\langle \Delta x^2 \rangle = 2D\Delta t^{2H}$$

$H$  = demi-pente de la courbe de diffusion  
en échelle bi-logarithmique





## Décomposition du signal : EMD

***Le comportement multi-échelle  
du signal stabilométrique  
nous invite à chercher une décomposition  
permettant d'isoler  
les processus intrinsèquement  
liés à ces échelles caractéristiques.***

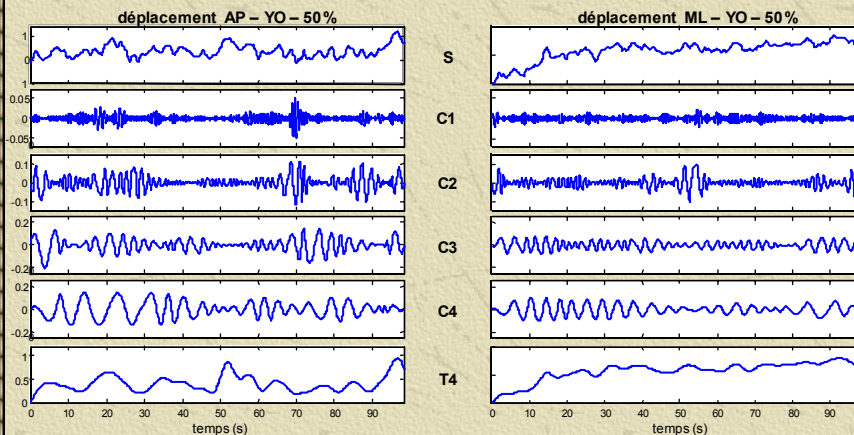
***l'EMD qui ne fait appel à aucun a priori,  
permet une décomposition adaptative du  
signal par extraction de composantes  
intrinsèques.***

9

## Décomposition modale empirique

*Décomposition du signal stabilométrique*

$$S = \sum C_i + T_4 \quad (i=1, \dots, 4)$$



10

## Décomposition modale empirique

### Diffusion d'un mode du signal stabilométrique

#### analyse par modélisation continue

$$\log \frac{\langle f_i^2 \rangle}{\langle f_{i,ref}^2 \rangle} = G_i + \log \left( 1 - \frac{e^{-\zeta_i \omega_i t}}{\sqrt{1 - \zeta_i^2}} \sin(\omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} t + \arcsin \sqrt{1 - \zeta_i^2}) \right)$$

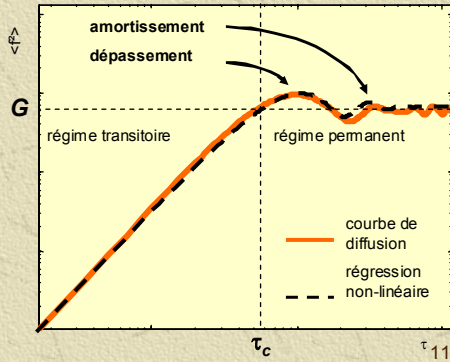
⇒ **paramètres dynamiques**  
**système du second ordre**

$G_i$  = gain du système

$\zeta_i$  = amortissement

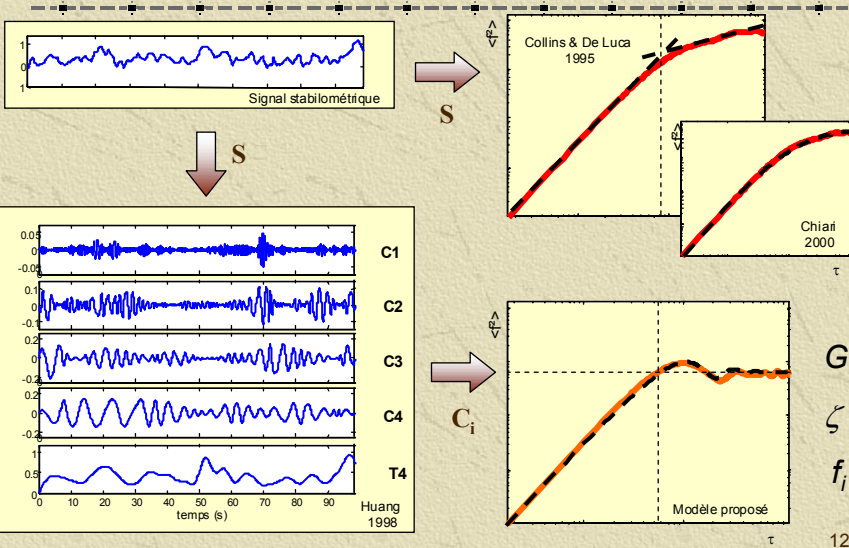
$\omega_i = 2\pi.f_i$  pulsation ( $f_i \sim f_c$ )

courbe estimée & modélisation



## Synthèse

### Résumé des méthodes





## Résultats

### 1/ signaux de synthèse (modèle du pendule inversé)

### 2/ signaux réels (sujets ne présentant pas de troubles apparents de l'équilibre)

13

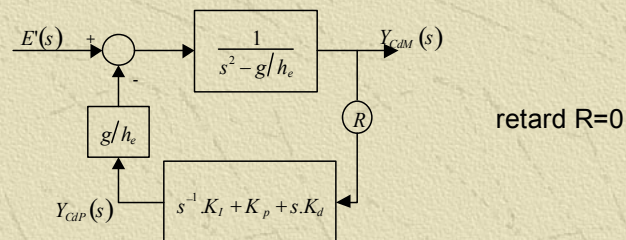
## Résultats

### Signaux de synthèses

#### Modèle du pendule inversé

#### Génération de trajectoire

- fonction de transfert du modèle simplifiée ( $K_i=0$ ,  $K_d$  et  $K_p>1$ )



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h_e} (K_p - 1)}$$

$$\zeta = \frac{K_d}{2} \sqrt{\frac{g}{h_e} \frac{1}{(K_p - 1)}}$$

✓ modèle suffisant (relation CdM-CdP)

14

## Résultats

### Signaux de synthèses

#### modèle du pendule inversé

#### Résultats : différentes relations entre les paramètres

✓  $\log_{10}(G) = \alpha \log_{10}(f) + \beta \Rightarrow G = G_{(1\text{Hz})} / f \quad (\alpha \approx -1)$

✓  $Kp-1 = 10^{\left(\frac{\beta+6,33}{1,84}\right)}$

✓  $G = \frac{A(Kp-1)^2}{f} \quad \text{avec } A \approx 10^{-6,33} \text{ et } \lambda \approx -1,84$

✓ Amortissement : grande variabilité autour de 0,3

15

## Résultats

### Signaux réels

#### signal stabilométrique

protocole expérimentale :

- durée de l'enregistrement 100 secondes
- fréquence d'échantillonnage 60 Hz

différents tests :

- écartement des pieds variables 50% et 100%
- yeux ouverts et yeux fermés
- enregistrements ML et AP

nombre de sujets:

- 30 sujets sains



16



## Résultats

### Signaux réels

#### signal stabilométrique

- ✓ la loi empirique est vérifiée :

$$\log_{10}(G) = \alpha \log_{10}(f) + \beta$$

- ✓  $\alpha$  même ordre de grandeur ( $\alpha \approx -1$ )  
avec une plus grande variabilité en ML qu'en AP

$\alpha$  n'est pas sensible à l'influence  
des entrées proprioceptives et visuelles

17

## Résultats

### Signaux réels

#### signal stabilométrique

- ✓ Étude du paramètre  $\beta$

#### 1- Influence de l'écartement des pieds

👁 l'écartement des pieds entraîne une diminution de  $\beta$

$\beta$  lié à  $K_p$  : élasticité plus importante les pieds écartés

élasticité = contractilité musculaire

augmentation de la raideur apparente de la cheville

⇒ résultats conformes aux données physiologiques  
stabilité générale (d'un point de vue physique) du corps

18

## Résultats

### Signaux réels

#### signal stabilométrique

#### 2- Influence de l'entrée visuelle

👁  $\beta$  est plus faible en situation YO qu'en situation YF

En intégrant le couplage visuel dans le modèle du pendule cela entraîne une augmentation du coefficient de frottement

↗ coefficient de frottement ↗ amortissement ↘ pulsation apparente

$$\Rightarrow \beta_{YO} < \beta_{YF}$$

#### 3- Comparaison entre les enregistrements AP et ML

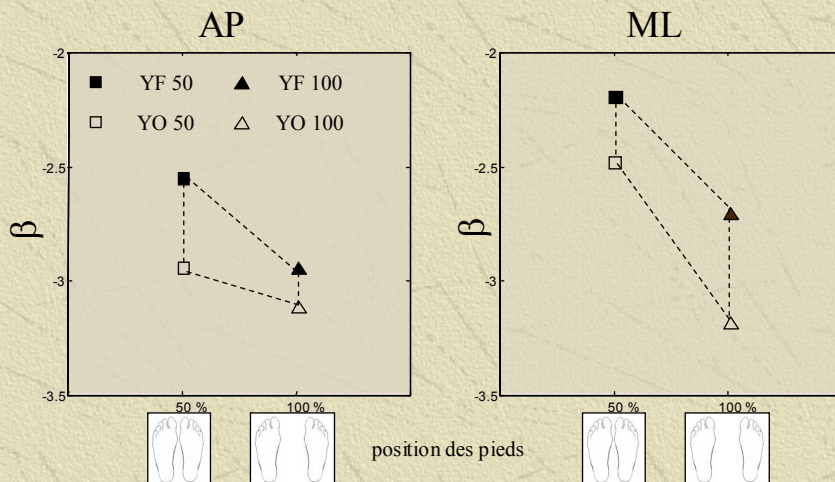
👁 plus grande variabilité des paramètres en ML

19

## Résultats

### Synthèse sur les signaux réels

#### paramètre $\beta$



20



## Conclusion et Perspectives

### Conclusion

Méthodologie proposée

décomposition par EMD

analyse par diffusion



Résultats et Validation

stabilogrammes réels

modèle du pendule inversé



Meilleure compréhension  
de la méthode de Huang

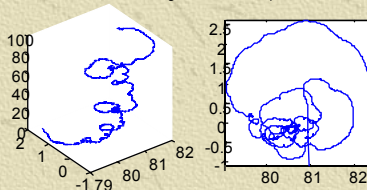
21

## Perspectives

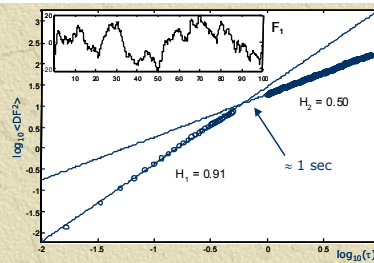
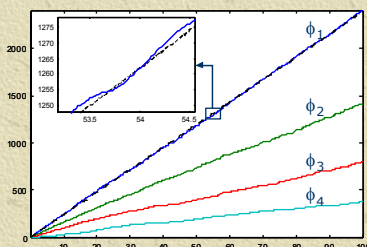
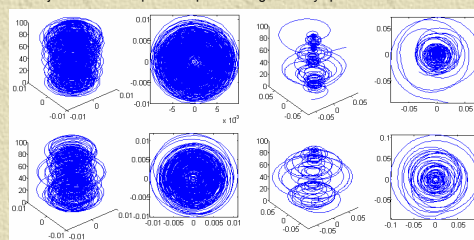
Quelques perspectives...à propos de l'analyse

### Étude des fluctuations de phases par EMD

Trajectoire dans le plan complexe du signal analytique  
associé au signal stabilométrique



Trajectoire dans le plan complexe du signal analytique associé aux modes



22