



Des fractales à la marche...

... il n'y a qu'un pas!







F. Buisseret

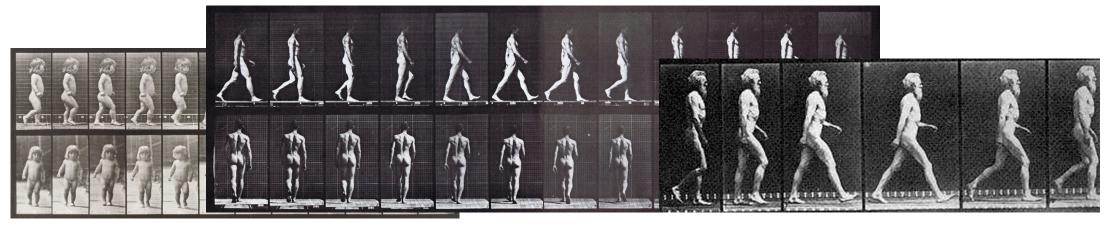


Bienvenue

 "La meilleure façon de marcher C'est encore la nôtre! C'est de mettre un pied d'vant l'autre Et d'recommencer!"



Edweard Muybridge (1830-1904)



- Qu'est-ce que marcher ?
- Qu'est-ce que marcher "normalement" ?
 - Comment répondre à la question ?
 - Pourquoi se la poser ?



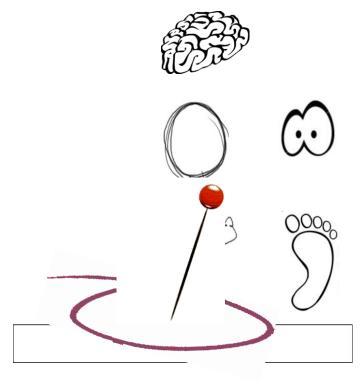
Deep Mind (Google) Juillet 2017



O La marche

Généralités

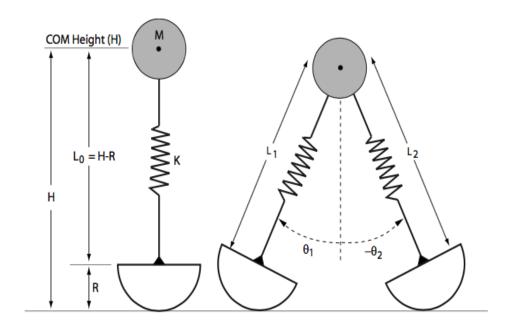
- Marche bipède : au centre de nos activités
- Commun mais pas évident pour autant!
 - Système nerveux central
 - Système nerveux périphérique
 - Mécanique : "pendule inversé" (à stabiliser)



Mécanique

- Périodique ?
 - Pas à 100 %
 - "Bruit" neurologique

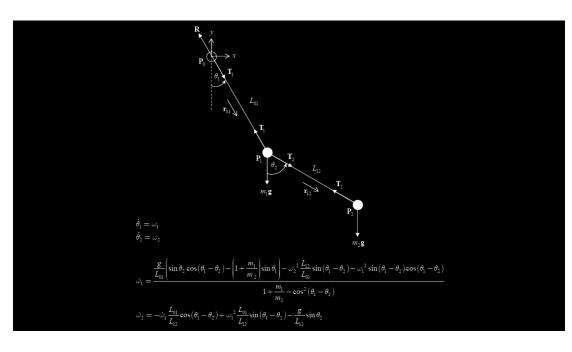
- Quasi-périodique ?
- -Chaotique ??
 - A vérifier



Journal of Biomechanical Engineering

Copyright © 2009 by ASME

JANUARY 2009, Vol. 131 / 011013-1

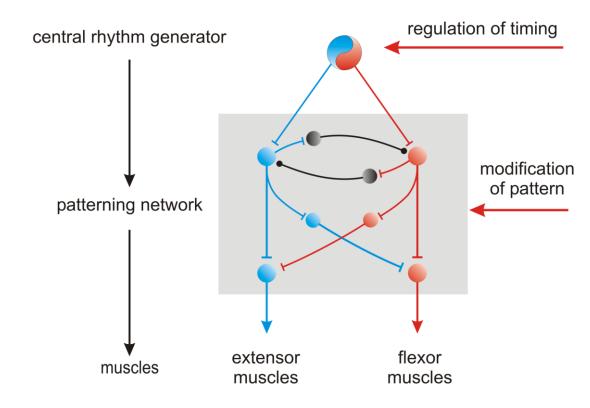




CPG

 Réseaux de neurones localisés dans la moëlle épinière

- Fonctionnement "autonome"
 - Processus automatisés
 - Mouvements rhythmiques
 - ... dont la marche

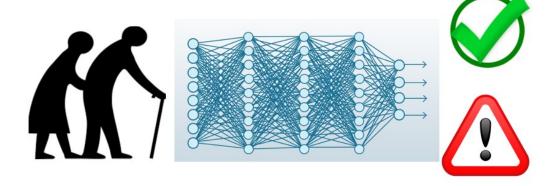


Modified from Lafreniere-Roula & McCrea 2005



Pourquoi?

- Reconnaître la marche normale
 - Intérêt intrinsèque
 - Identifier les pathologies
 - Quantifier l'efficacité d'un traitement
 - Prédire le risque de chute ?
 - Robotique
 - • •







Expériences

- Procédure-type
 - Faire marcher des sujets sains ou pathologiques sur un tapis roulant
 - Paramètres : vitesse, durée, inclinaison,...
 - Mesures: forces au sol, cinématique (vidéo), métabolisme,...

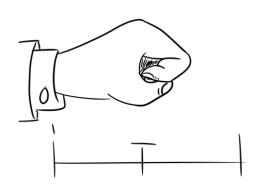
- Premières études à la fin des années 1940
 - Ekickson et al. The energy cost of horizontal and grade walking on the motor-driven treadmill (1946).
 - Environ 100000 résultats pour "walk" dans Pubmed.
 - Sélectionnons!

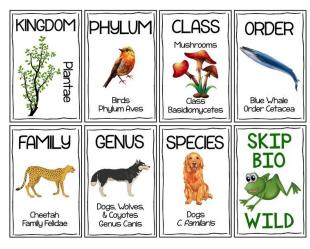


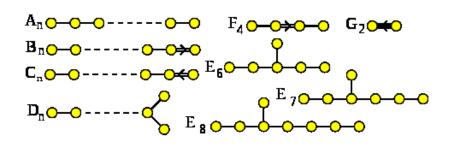


Classification

- Processus central en sciences
 - La marche ne fait pas exception!
- 'Points communs' entre les systèmes
 - Grandeurs "objectives" / quantifiables









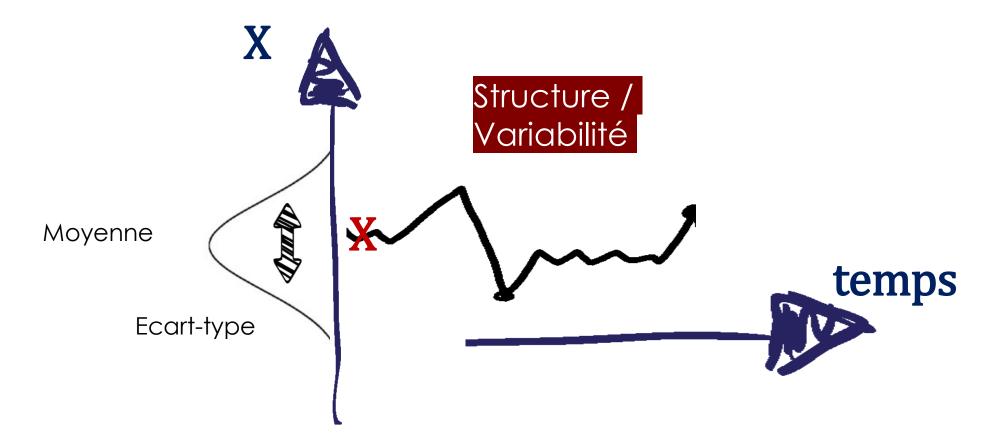


Mathématique



Classification (II)

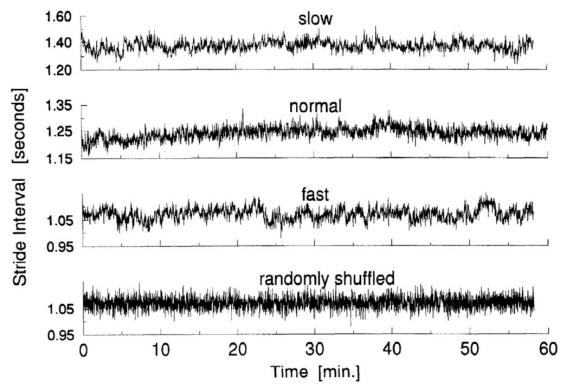
• Où se trouve l'information ?



Propriétés à long terme

Approche relativement récente

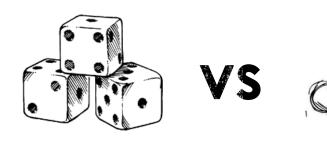
Hausdorff J et al., Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations (1996).



Dynamique chaotique

Fluctuations autocorrélées







- Chaotique = Dynamique à l'évolution temporelle complexe.
 Difficulté à prévoir à long terme mais pertinent.
- Autocorrélé = système dont l'état à un instant dépend significativement de son état antérieur.
- Aléatoire/stochastique : opposition aux précédents termes
- « Hasard vs mémoire » : la variabilité de la marche humaine n'est <u>pas</u> aléatoire.
 - Comment le quantifier ?

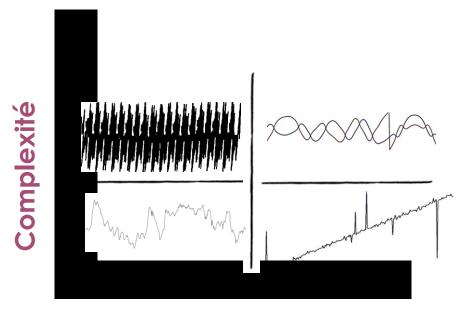


La dynamique...

Est a priori inconnue

$$Etat_{i+1} = Transition(Etat_{j \leq i})$$

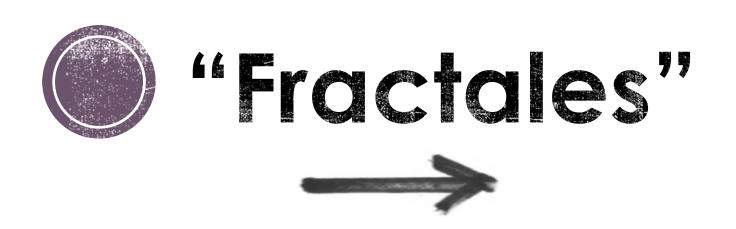
- Tendances de la série temporelle ?
 - "Prévisible" vs aléatoire
 - Complexe vs "lisse"
- Outils mathématiques d'analyse ?



Prévisibilité



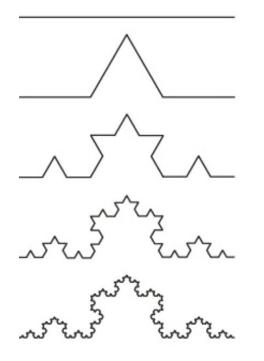
Courbe, surface ou volume présentant une invariance par changement d'échelle

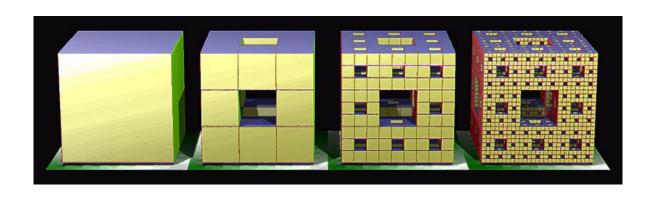


B. Mandelbrot (1924 – 2010). Lire par exemple "The Fractal Geometry of Nature" (1982).

Une recette

 Définir une transformation simple sur un objet et itérer à l'infini



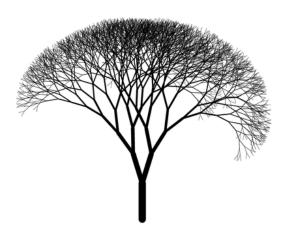


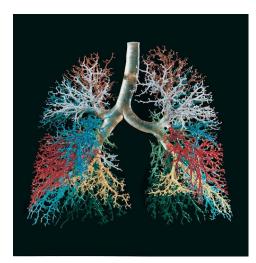
Eponge de Menger







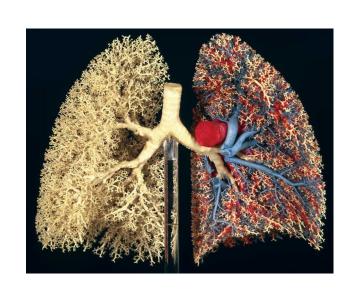




 La Nature suit volontiers cette recette (mais pas à l'infini)



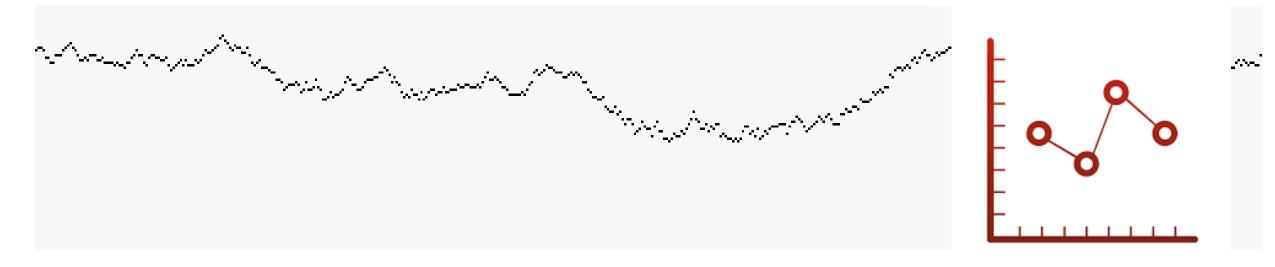






Caractéristiques

Processus de Wiener : marche aléatoire



- Concepts utiles pour quantifier de "vrais" signaux
- Limites: pas de fractale "stricto sensu"



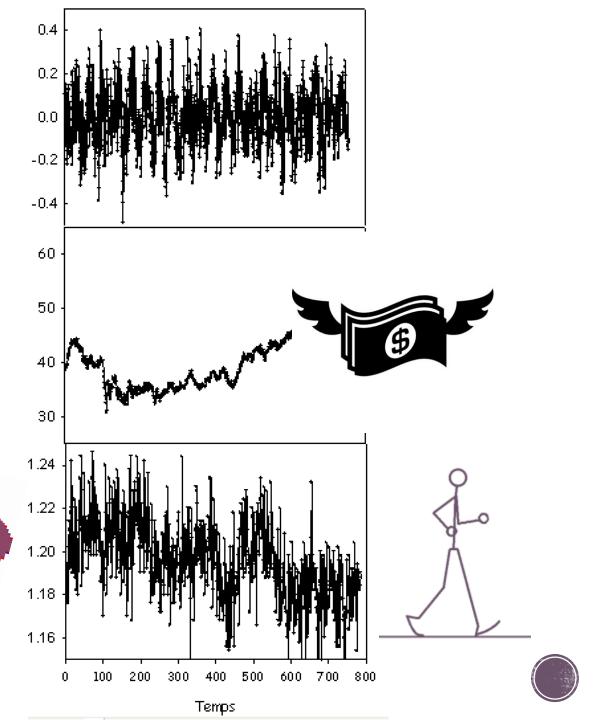
3 exemples

Accélération (g) / temps



Cours d'une action (€)/jour

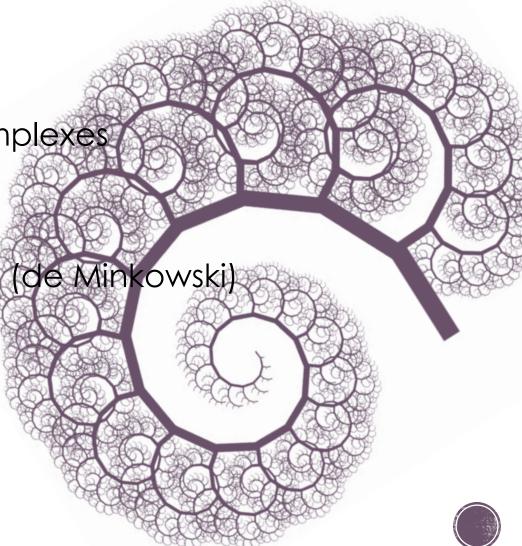
Durée du cycle de marche (s)
 Marche avant sur tapis roulant



Les outils

- Analyse non-linéaire
 - Quantification de comportements complexes
 - Indicateurs "simples".
- Nous présenterons un indice...
 - ... de "complexité", dimension fractale (de Minkowski)
 - ... de "prévisibilité", exposant de Hurst
 - ... parmi tant d'autres!

Kantz H & Schreiber T, Nonlinear Time Series Analysis, Cambridge, 2004.



Dimension fractale

- Box counting
 - Nombre de boîtes de taille &
 nécessaires pour couvrir la figure ?

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D}$$

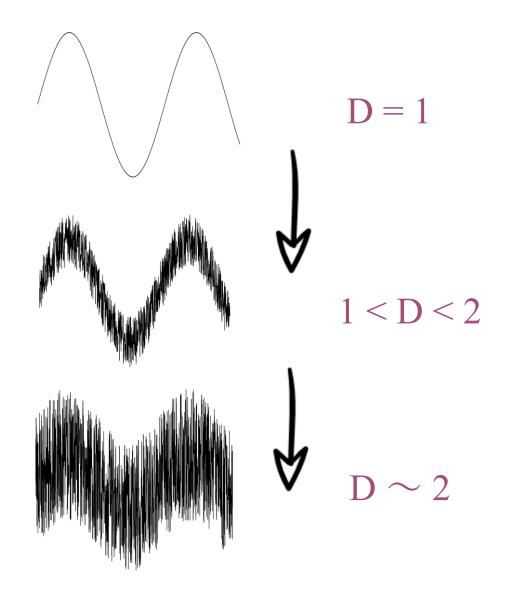
- Peut-être non-naturel
- ...Structures naturelles



Dimension fractale

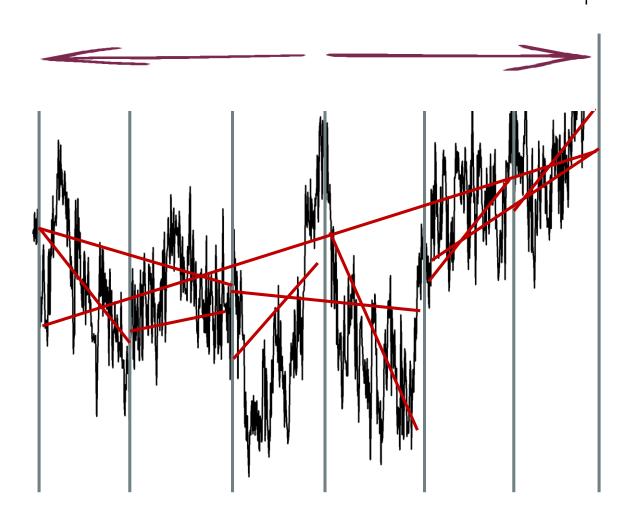
• Que mesure D dans une série temporelle ?

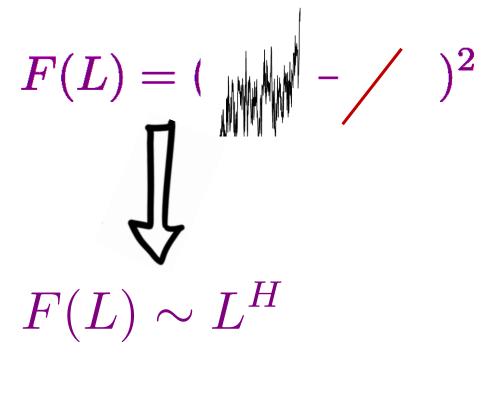
- Complexité / structure des fluctuations relatives d'un instant à l'autre
- "Rugosité apparente" de la courbe





Exposant de Hurst

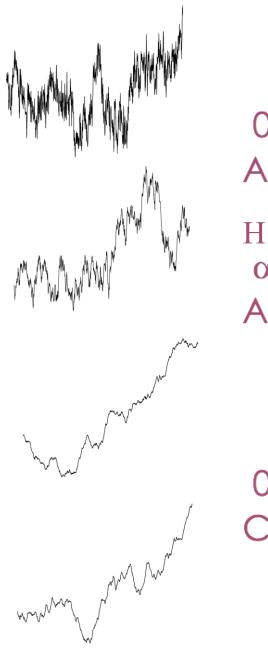






Exposant de Hurst

- Que mesure H dans une série temporelle ?
 - Autocorrélations à long terme
 - "Prévisibilité" de la série de données
 - Mathématiques financières



H0 < α < 0.5 Anticorrélé

H $\alpha = 0.5$ Aléatoire



 $_{\rm H}$ $^{\rm H}$ 0.5 < α < 1 Corrélé





F. Dierick, A.-L. Nivard, O. White, F. Buisseret, Fractal analyses reveal independent complexity and predictability of gait, PLoS ONE 12 (11):e0188711.

F. Dierick, C. Vandevoorde, O. White, F. Buisseret, Long-Range Variability of Healthy and Pathological Walk: What Does It Tell Us After All ?, in preparation.

A. M. Luta, M. Renson, F. Buisseret, F. Dierick, Complexity and predictability of gait in digital natives during cognitive-locomotor interactions are task-dependent, in preparation.

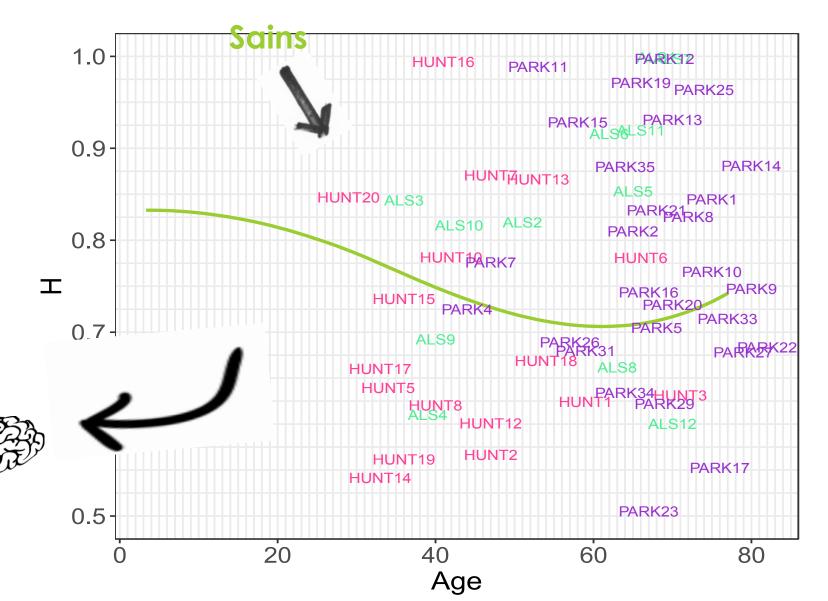
(Pour aller plus loin)

- Hausdorff J, Zmany L, Peng C, Gldberger A, Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children, Journal of applied Physiology 86, 1040 (1999).
- Warlop T et al., Temporal organization of stride duration variability as a marker of gait instability in Parkinson's disease, J Rehabil Med 48, 865 (2016).
- Moon Y, Sung J, An R, Hernandez M, Sosnoff J, Gait variability in people with neurological disorders: a systematic review and meta-analysis, Human Movement Science 46, 197 (2016).

• . . .

Exposant de Hurst

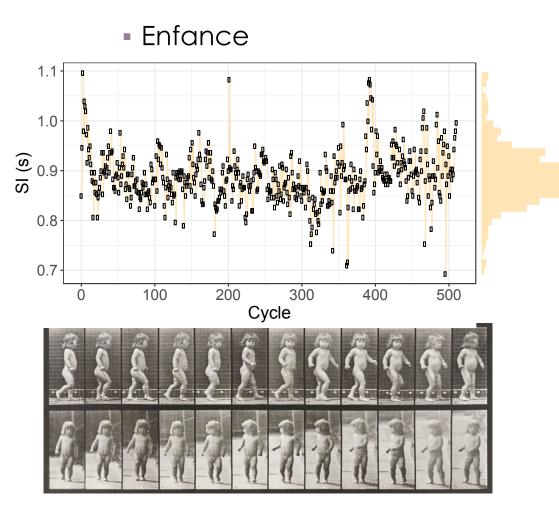
- Diminue avecl'âge
- Sain = "fractal" + autocorrélé
- Sensible aux pathologies du système nerveux central :



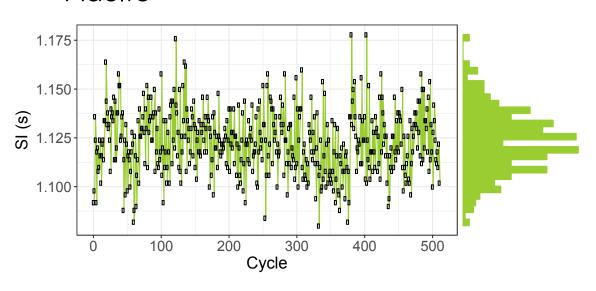
Groupe

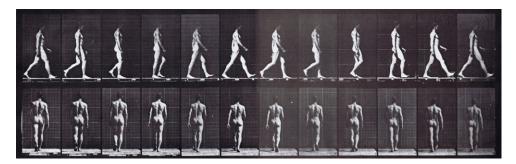
- a ALS
- a HUNT
- a PARK

Influence de l'âge



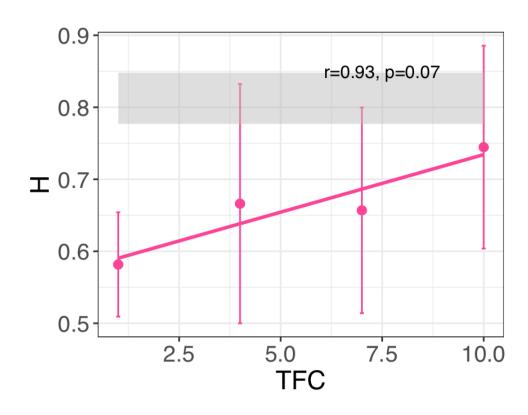
Adulte







Pathologie



- Influence de la gravité de la pathologie.
- Exemple : Huntington
- TFC : Total functional capacity



Dimension fractale



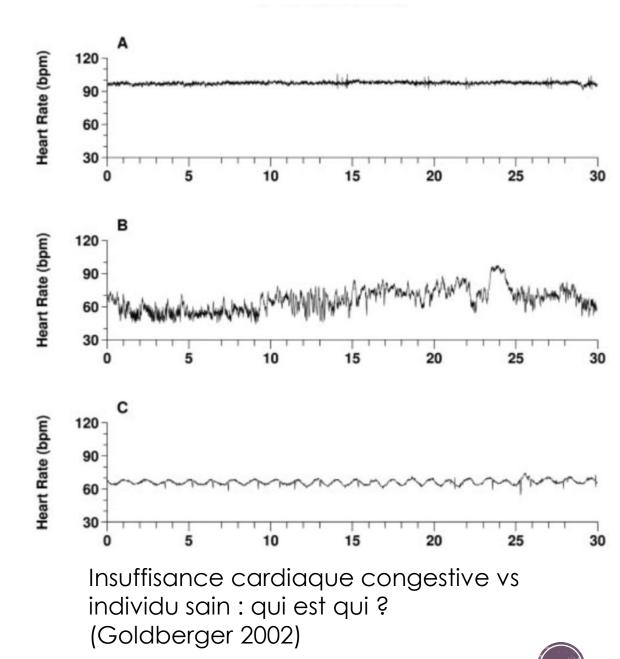


Ce qui se dessine

Marche = phénomène quasi-p

- L'individu sain réalise
 - un maximum de complexité / add
 - un optimum de prévisibilité

Pourquoi l'analyse fractale ?





Indicateurs fractals

- Résumé en quelques chiffres de comportements complexes
- Calculs standardisés
- Bon discriminants des différents types de marche et autres signaux physiologiques
- Propriétés à long terme : nouvelle définition de "l'individu sain?"



- Liens avec des mecanismes neurophysiologiques
 - Origine encore à clarifier
 - Modifications probables des CPGs dans le cas de la marche





"Dans un monde toujours plus complexe, les scientifiques ont besoin des deux outils : des images aussi bien que des nombres, de la vision géométrique aussi bien que de la vision."



B. Mandelbrot, 2005.