

Evaluation de l'équilibre postural suite à la réalisation d'un pas selon trois méthodes d'estimation de l'exposant de Hurst

H. AMOUD, M. ABADI, V. MICHEL, D. J. HEWSON, M. DOUSSOT, J. DUCHÊNE¹

¹ Institut des Sciences et Technologies de l'Information de Troyes (ISTIT), Équipe M2S, FRE CNRS 2732, Université de Technologie de Troyes (UTT), 12 Rue Marie Curie, BP 2060, 10010 TROYES Cedex

hassan.amoud@utt.fr

Résumé – L'objectif de cet article est de comparer les méthodes d'estimation de l'exposant de Hurst (H), i.e. rescaled range analysis (R/S), detrended fluctuation analysis (DFA) et stabilogram diffusion analysis (SDA), dans le but de déterminer la méthode la plus robuste pour caractériser l'évolution de l'équilibre postural d'une personne. Des sujets témoins (90 sujets ; âge moyen = 19.7 ± 0.9 ans) ont été analysés sur une période de maintien postural précédée d'un mouvement de montée sur une plate-forme de forces qui constitue une perturbation de l'équilibre. Les méthodes DFA et R/S apparaissent plus performantes pour suivre l'évolution de H en fonction du temps et permettent de mettre en évidence deux phases : une période d'instabilité posturale suivie d'une période de stabilité. La perspective de cette étude sera d'appliquer ces méthodes sur des sujets présentant un déficit de l'équilibre postural tel que les sujets âgés.

Abstract – The aim of this article is to compare different methods used to estimate the Hurst exponent (H), i.e. rescaled range analysis (R/S), detrended fluctuation analysis (DFA) and stabilogram diffusion analysis (SDA), to determine the most reliable method to characterize the evolution of postural equilibrium. Ninety healthy subjects (average age 19.7 ± 0.9 years) were analyzed for a period of static posture immediately after the movement of stepping onto a force plate which disturbs the subjects' balance. DFA and R/S were better able to follow the evolution of H over time, with two distinct periods able to be identified : an initial period of postural instability followed by a period of postural stability. The methods used in this study will be applied to subjects with postural deficits, such as elderly subjects.

1. Introduction

L'étude de la posture statique présente un grand intérêt pour l'analyse du déficit du contrôle de l'équilibre qui peut être lié à la pathologie, au vieillissement, ou aux contraintes environnementales. Une méthode d'analyse de l'équilibre est d'utiliser une plate-forme de forces qui permet d'extraire le déplacement du centre des pressions du sujet selon les directions antéropostérieure (AP) et médiolatérale (ML). La représentation des coordonnées du centre des pressions en fonction de temps constitue le stabilogramme. A partir du stabilogramme, les paramètres qui caractérisent l'équilibre de la posture statique sont extraits. Parmi eux sont identifiés les paramètres temporels (moyenne, RMS), fréquentiels (fréquence médiane), spatio-temporels (surface de l'ellipse) [8], et récemment les paramètres liés aux systèmes physiologiques sous-jacents [1, 3]. Ces derniers mettent en évidence les corrélations à long terme et l'auto-similarité des systèmes de contrôle physiologiques et donc de la position du centre des pressions. L'exposant de Hurst (H) [5] fait partie de cette famille de paramètres. Il donne des indications sur la corrélation et l'auto-similarité. Une valeur plus élevée de H signifie une auto-similarité plus importante rendant compte d'un mouvement mieux contrôlé [4].

L'estimation de cet exposant est faite par plusieurs méthodes : rescaled range analysis (R/S) [3], detrended fluctuation analysis (DFA) [3, 7] et stabilogram diffusion

analysis (SDA) [1, 3]. L'ensemble de ces méthodes est fondé sur la relation d'Einstein modélisant un processus de mouvement Brownien, généralisé par Mandelbrot et Van Ness [6] (mouvement Brownien fractionnaire) et Hurst [5] :

$$\langle \Delta x^2 \rangle \propto \Delta t^{2H} \quad (1)$$

où Δx est la différence entre deux positions séparées par un temps Δt et H est l'exposant de Hurst.

Jusqu'à présent, SDA est la seule méthode utilisée pour l'étude de la posture [1, 3]. Cependant, pour SDA, Delignières et al. [3] ont constaté des erreurs dans la méthodologie de Collins et al. Le principal défaut est qu'ils ne prennent pas en compte le fait que les séries physiologiques sont bornées, ce qui aboutit à deux exposants de Hurst (exposants à court terme et à long terme).

L'objectif de cet article est de comparer ces trois méthodes d'estimation de l'exposant de Hurst dans le but de déterminer la méthode la plus robuste pour caractériser l'évolution de l'équilibre suite à une perturbation. Dans cette étude, les sujets sains sont analysés sur une période de maintien postural précédée d'un mouvement de montée sur une marche, induisant une perturbation de l'équilibre.

2. Méthodes

2.1 Protocoles et acquisition

Quatre-vingts dix sujets adultes dont 57 hommes et 33 femmes (âge moyen = 19.7±0.9 ans) ont participé à l'expérimentation réalisée de la manière suivante : le sujet adopte une position érigée et confortable, ses bras sont disposés le long de son corps et sa tête maintenue droite. Au signal de l'expérimentateur, il monte sur la plate-forme de forces (4060-80, Bertec Corporation, Etats Unis) sans chaussures et fixe une cible située à 2 mètres du centre de la plate-forme de forces pendant 45 secondes. Durant cette période, le sujet a pour consigne de rester le plus immobile possible tout en regardant la cible. L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'une carte NiDaq 6036E (National Instruments, Natick, Etats-Unis), à la fréquence de 100Hz. Les signaux sont ensuite filtrés en utilisant un filtre passe bas de type Butterworth de fréquence de coupure 10Hz et d'ordre 8.

2.2 Rescaled range analysis (R/S)

Pour décrire la dépendance à long terme du niveau d'eau dans les fleuves (Nil), Hurst [5] définit une méthode sensible pour montrer les corrélations de longue durée pour des processus aléatoires. La série $x(t)$ est divisée en intervalles contigus de longueur n . Chacun de ces intervalles est ensuite transformé en série intégrée $X(t,n)$ définie par l'équation suivante :

$$X(t, n) = \sum_{k=1}^t \{x(k) - \langle x \rangle_n\} \quad (2)$$

où $\langle x \rangle_n$ correspond à la moyenne des n données. L'étendue R est définie comme la différence entre les valeurs maximales et minimales de la série intégrée $X(t,n)$. Elle est calculée pour chaque intervalle :

$$R = \max_{1 \leq t \leq n} X(t, n) - \min_{1 \leq t \leq n} X(t, n) \quad (3)$$

L'étendue est ensuite normalisée pour chaque intervalle par l'écart type local (S) de la série originale $x(t)$. Ce calcul est réitéré pour chacun des intervalles constituant la série. Ensuite, la moyenne des étendues normalisées R/S est calculée. Hurst [5] a montré que R/S est liée à la grandeur de l'intervalle de temps n par la relation suivante :

$$R/S \propto n^H \quad (4)$$

où H est l'exposant de Hurst.

2.3 Stabilogram Diffusion Analysis (SDA)

Collins et De Luca [1] proposent de modéliser la trajectoire du centre des pressions par un système de marche aléatoire couplé et corrélé. Le mouvement peut être alors considéré comme le résultat d'une combinaison de mécanismes déterministes et stochastiques. En utilisant la relation (1) de Mandelbrot et Van Ness [6], Collins et De Luca [1] ont remarqué que pour un stabilogramme $x(t)$, $y(t)$, il était possible de trouver deux régimes : un pour lequel $H > 0.5$, correspondant aux faibles valeurs de Δt (court terme, persistance) et un pour lequel $H < 0.5$, correspondant aux grandes valeurs de Δt (long terme, anti-persistance).

La méthode de calcul de $\langle \Delta x^2 \rangle$ pour Collins et De Luca [1] est :

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} (x_{i+\Delta t} - x_i)^2 \quad (5)$$

où N est le nombre total de points du vecteur x et m l'intervalle entre deux valeurs exprimées en nombre de points. Collins et De Luca [1] ont calculé H pour les zones à court (HS) et à long terme (HL) à partir des pentes de la courbe (Δt , $\langle \Delta x^2 \rangle$) exprimée en échelle logarithmique.

2.4 Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

Introduite par Peng et al. [7], cette méthode cherche à mettre en évidence les processus d'auto-similarité dans les séries temporelles. Dans une première étape, la série originale $x(i)$ $i=1 \dots N$ est intégrée ; les données $x(i)$ sont remplacées par la somme cumulée des écarts à la moyenne :

$$y(k) = \sum_{i=1}^k \{x(i) - \langle x \rangle\} \quad (6)$$

Ensuite, $y(k)$ est divisé en fenêtres égales de longueur n . Si N n'est pas un multiple de n , N sera ajusté, i.e. N sera la plus grande valeur multiple de n inférieure à la longueur de la série initiale. Dans chaque fenêtre de taille n , une tendance linéaire locale est estimée par la méthode des moindres carrés qui est notée $y_n(k)$. La fluctuation de l'intégrale indéfinie $y(k)$ autour de sa tendance $y_n(k)$ est calculée par :

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{y(k) - y_n(k)\}^2} \quad (7)$$

La valeur α de la pente de la régression sur l'échelle logarithmique de $F(n)$ en fonction de n est calculée et correspond à une estimation de l'exposant H .

2.5 Analyse de données

A partir des données acquises depuis la plate-forme de forces, les coordonnées du centre des pressions dans les directions AP et ML, et la résultante (RD) sont calculées à partir de l'instant du poser du deuxième pied sur la plate-forme de forces (FC2). Des fenêtres glissantes de tailles de 20, 10 et 5 secondes, de FC2 jusqu'à ce que le milieu de la fenêtre soit situé en FC2+20 s, ont été analysées avec un pas de glissement de 1 s. L'exposant de Hurst (H) a été calculé pour chaque fenêtre en utilisant les méthodes R/S, DFA et SDA (HS et HL). Des tests de normalité (asymétrie, aplatissement et Kolmogorov-Smirnov) ont été appliqués sur tous les exposants obtenus. Après avoir vérifié la normalité des données, les tests statistiques qui ont été réalisés utilisaient une analyse de la variance (ANOVA) à mesures répétées avec un ajustement de Bonferroni pour les contrastes. Les tests ont été considérés comme significatifs pour $p < 0.05$.

3. Résultats

En ce qui concerne la direction AP, les résultats montrent une évolution de H estimé par DFA et R/S pour les 3 tailles de fenêtre ($p < 0.05$; cf figure 1a). Par contre, la méthode SDA ne permet pas de détecter une évolution sauf pour HS avec une fenêtre de 5s ($p < 0.05$).

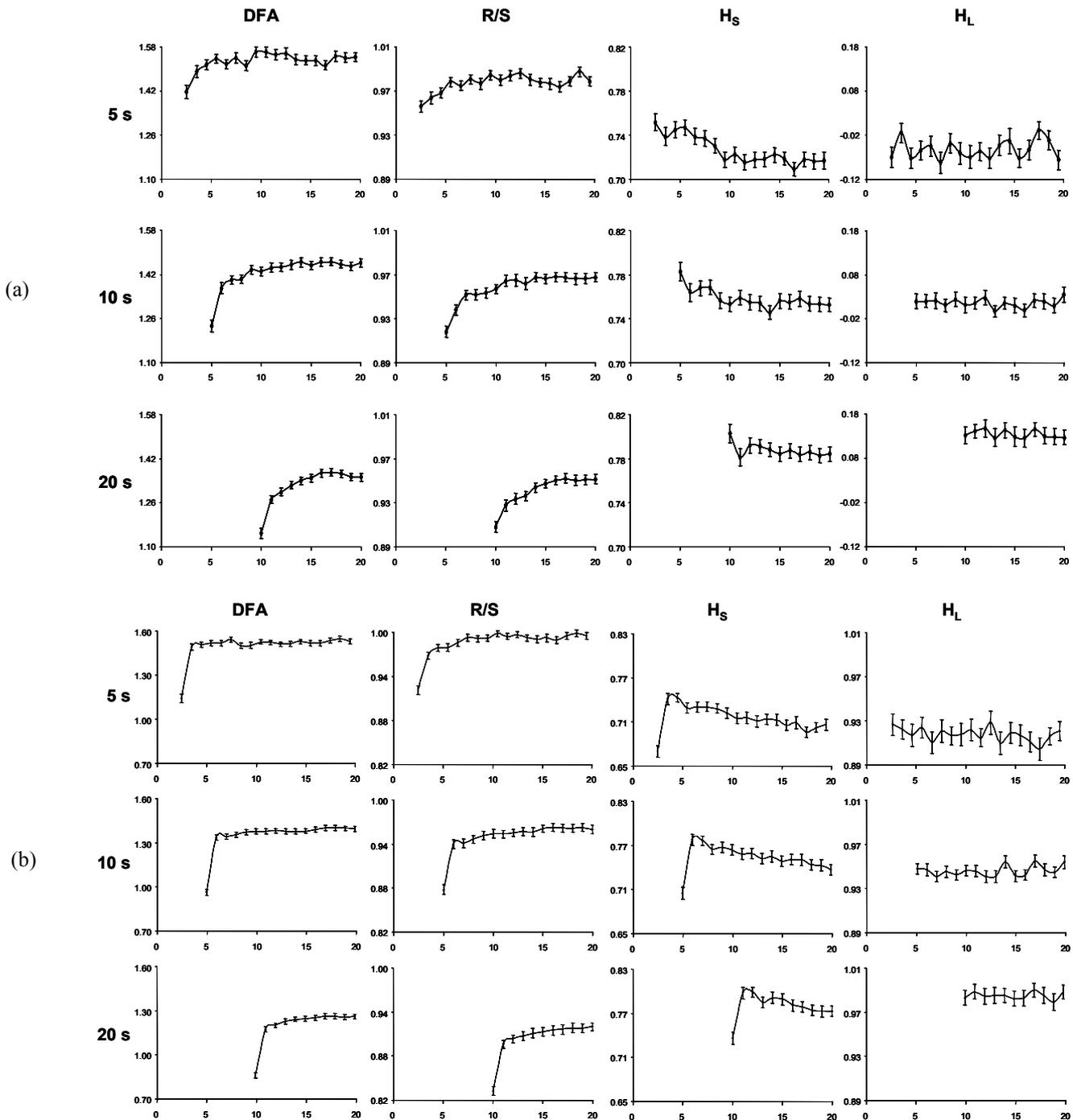


Figure 1 : évolution des exposants de Hurst estimés par les 3 méthodes pour les 3 tailles de fenêtres pour les directions antéro-postérieures (a) et médio-latérales (b). Les données sont exprimées en moyenne et écart-type. L'axe des ordonnées représente les valeurs de l'exposant de Hurst et l'axe des abscisses représente le temps exprimé en seconde. L'abscisse 0 correspond à l'instant FC2 et l'abscisse de chaque point correspond au milieu de la fenêtre de calcul.

Alors que dans la direction ML, et en raison de grands déplacements durant le posé du deuxième pied (FC2), l'analyse débute à partir de l'instant FC2+1. Les résultats montrent une évolution, en fonction de temps, de H estimé par DFA et R/S pour les fenêtres de 20 s et par R/S pour les fenêtres de 5 s ($p < 0.05$; cf figure 1b). Par contre, la méthode SDA, montre une évolution pour H_S avec les 3 tailles de fenêtres.

4. Discussion

Les méthodes DFA et R/S apparaissent les plus performantes pour suivre l'évolution de H en fonction du temps. La figure 1 montre deux phases d'évolution de H : dans un premier temps les valeurs de H progressent vers des valeurs plus élevées jusqu'à la quatrième fenêtre puis dans un deuxième temps elles se stabilisent. La première phase serait assimilée à une période d'instabilité posturale alors que la

deuxième phase correspondrait à une période où la posture est mieux contrôlée [4].

Concernant la méthode SDA, l'absence de résultat significatif permet de reconsidérer l'utilisation de cette méthode dans l'étude de la posture, renforçant ainsi les doutes postulés par Delignières et al. [3].

Une taille de fenêtres de 5 s est suffisante pour caractériser l'évolution de l'équilibre. En effet, l'analyse de la fenêtre de 5 s, qui correspond à une série de données de 500 points, montre une faible variabilité inter-sujets de 1% et 0.5% de la moyenne respectivement pour DFA et R/S. Ce résultat est en contradiction avec les résultats de la littérature qui proposent qu'une petite série de données entraîne une fluctuation importante [2].

5. Conclusion

Les méthodes DFA et R/S ont permis d'identifier une période d'instabilité posturale chez les sujets adultes qui doivent gérer une légère perturbation de l'équilibre. Une des perspectives de cette étude sera d'appliquer ces méthodes à une population présentant un déficit de l'équilibre postural tel que le sujet âgé. A ce jour, l'analyse d'un sujet âgé chuteur (75 ans) par les méthodes DFA et R/S donne des résultats encourageants pour l'étude du contrôle postural. En effet, chez ce sujet âgé la variabilité est dix fois plus importante que chez les adultes testés pour cette étude. De plus, il ne présente pas de phase de stabilisation de la posture suite à la réalisation du pas.

Remerciements

Cette étude a été financée dans le cadre du projet PARACHUTE (Personnes Agées et Risque de Chute), soutenu par le Réseau National Technologies pour la Santé (RNTS), le Fonds Social Européen, le Fonds Européen de Développement Régional, le Conseil Régional Champagne-Ardenne, et l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.

Références

- [1] J.J. Collins et C.J. De Luca, Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Exp Brain Res*, 1993. 95: pp. 308-18.
- [2] I. De la Fuente, L. Martinez et al., R/S analysis in strange attractors. *Fractals*, 1998. 6: pp. 95-100.
- [3] D. Delignieres, T. Deschamps et al., A methodological note on nonlinear time series analysis: is the open- and closed-loop model of Collins and De Luca (1993) a statistical artifact? *J Mot Behav*, 2003. 35: pp. 86-97.
- [4] A.L. Goldberger, L.A. Amaral et al., Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002. 99 Suppl 1: pp. 2466-72.
- [5] H. Hurst, R. Black et al., Long-term storage in reservoirs: an experimental study. *Trans Am Soc Civ Eng*, 1951. 116: pp. 770.
- [6] B. Mandelbrot et J. Van Ness, Fractional Brownian motion, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 1968. 10: pp. 422-437.
- [7] C.K. Peng, J. Mietus et al., Long-range anticorrelations and non-Gaussian behavior of the heartbeat. *Phys Rev Lett*, 1993. 70: pp. 1343-6.
- [8] T.E. Prieto, J.B. Myklebust et al., Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Trans Biomed Eng*, 1996. 43: pp. 956-66.