

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/263098823>

# The Functional Reach Test: Strategies, performance and the influence of age

ARTICLE in ANNALS OF PHYSICAL AND REHABILITATION MEDICINE · MAY 2014

DOI: 10.1016/j.rehab.2014.03.003 · Source: PubMed

CITATIONS

2

READS

4

7 AUTHORS, INCLUDING:



[Eric Watelain](#)

Université de Toulon

62 PUBLICATIONS 428 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Vinciane Pardessus](#)

Centre Hospitalier Régional Universitaire d...

38 PUBLICATIONS 236 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Vincent Tiffreau](#)

Université du Droit et de la Santé Lille 2

92 PUBLICATIONS 322 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[André Thevenon](#)

Centre Hospitalier Régional Universitaire d...

247 PUBLICATIONS 1,417 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Original article / Article original

# The Functional Reach Test: Strategies, performance and the influence of age

## *Functional Reach Test : stratégies, performance et influence de l'âge*

L. de Waroquier-Leroy<sup>a</sup>, S. Bleuse<sup>b</sup>, R. Serafi<sup>a</sup>, E. Watelain<sup>d</sup>,  
V. Pardessus<sup>a</sup>, A.-V. Tiffreau<sup>a,c</sup>, A. Thevenon<sup>a,\*,c</sup>

<sup>a</sup> Physical and Rehabilitation Medicine department, hôpital Swynghedauw, 59037 Lille cedex, France

<sup>b</sup> Neurophysiology department, hôpital Salengro, CHRU, 59037 Lille cedex, France

<sup>c</sup> Université Nord-de-France, 59000 Lille, France

<sup>d</sup> UVHC, LAMIH, 59313 Valenciennes, France

Received 27 February 2012; accepted 14 March 2014

### Abstract

**Background.** – The Functional Reach Test (FRT) is a clinical assessment of the risk of falls in elderly or disabled subjects. However, the FRT is complex (involving the leg, hip and trunk joints) and previous studies have shown that several different strategies can be used to complete the test. **Objectives.** – To describe the strategies used by healthy, adult subjects when performing the FRT and to assess the influence of age on choice of the strategy.

**Method.** – This was a pilot study in which 29 non-fallers (18 under-50s and 11 over-75s) were asked to perform the FRT on a force platform in a motion analysis laboratory. A total of 18 reflective markers were placed on the body. The main outcome measures were the FRT score, the centre of pressure (CoP) excursion, and kinetic and kinematic test data. The two age groups were compared using a non-parametric, two-sample Mann-Whitney U test. A cluster analysis of the entire population grouped subjects together according to their functional similarities.

**Results.** – The older subjects displayed a smaller CoP anteroposterior displacement ( $P < 0.01$ ), greater backwards displacement of the pelvis ( $P < 0.05$ ) and less trunk rotation during the FRT ( $P = 0.024$ ) than the younger subjects. The cluster analysis split the population into two groups, which differed in terms of age, FRT score, pelvis translation, and CoP displacement.

**Conclusion.** – Our results suggest that at the moment of trunk flexion, elderly subjects use pelvic translation in order to limit forward displacement of the CoP and prevent forward imbalance.

© 2014 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

**Keywords:** Functional Reach Test; Fall; Balance; Elderly

### Résumé

**Contexte.** – Le Functional Reach Test (FRT) est une méthode d'évaluation clinique du risque de chute de la personne âgée ou handicapée. Cependant le FRT est un test complexe mettant en jeu les articulations des membres inférieurs et du tronc, et de précédentes études ont montré que différentes stratégies pouvaient être utilisées pour réaliser le test.

**Objectifs.** – Décrire les stratégies de réalisation du FRT utilisées par des personnes adultes et saines et évaluer l'influence de l'âge dans le choix de la stratégie.

**Méthode.** – Il s'agissait d'une étude pilote. Il était demandé à 29 personnes, non chuteuses (18 de moins de 50 ans, 11 de plus de 75 ans), de réaliser le FRT sur une plateforme de force dans un laboratoire d'analyse du mouvement. Dix-huit marqueurs réfléchissants étaient placés sur le corps. Les principales mesures prises en compte étaient le score au FRT, le déplacement du centre de pression (CdP) et les données cinétiques et cinématiques enregistrées au cours du test. Les deux groupes d'âge étaient comparés en utilisant le test non paramétrique de Mann-Whitney. Une analyse par cluster sur la population totale a permis de grouper les sujets en fonction de similarités fonctionnelles.

\* Corresponding author. Tel.: +33 32 04 45 830; fax: +33 68 50 78 559.

E-mail address: [andre.thevenon@chru-lille.fr](mailto:andre.thevenon@chru-lille.fr), [maryvonne.lestouquoy@chru-lille.fr](mailto:maryvonne.lestouquoy@chru-lille.fr) (A. Thevenon).

**Résultat.** – Les sujets les plus vieux produisaient un plus petit déplacement antéro-postérieur du CdP ( $p < 0,01$ ), un plus grand déplacement vers l'arrière du bassin ( $p < 0,05$ ) et moins de rotation de tronc ( $p = 0,024$ ) durant le FRT que les sujets plus jeunes. L'analyse par cluster a permis de séparer la population en deux groupes qui différaient en âge, en score de FRT, en déplacement du bassin, en déplacement du CdP.

**Conclusion.** – Nos résultats suggèrent qu'au moment de la flexion du tronc, les sujets plus âgés utilisent une translation du bassin afin de limiter le déplacement du CdP pour prévenir un déséquilibre vers l'avant.

© 2014 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

**Mots clés :** Functional Reach Test ; Chute ; Équilibre ; Personne âgée

## 1. English version

### 1.1. Introduction

Postural instability is frequent in the elderly and its consequences constitute a major public health issue. The detection, analysis and understanding of alterations in balance and gait are part of routine clinical practice. Many different fall-risk screening tests have been introduced; one of the most common is the Functional Reach Test (FRT) [1].

The FRT evaluates the forward stability of a standing subject who voluntarily extends one arm as far forward as possible in the horizontal plane, while keeping both heels in contact with the ground. The score is obtained by measuring the distance between fingertip's starting and end position.

The FRT's good reliability and low inter-examiner variability have been demonstrated in a range of studies [1,2]. The FRT score correlates with the anteroposterior excursion of the centre of pressure (CoP) [1,3,4]. Furthermore, the FRT also shows good reproducibility over time [1,5] and is sensitive to change [6,7]. Lastly, the FRT score is known to decrease with age, and an abnormally low score is a good predictor of the risk of falls [3].

Performance of the FRT involves flexion of the leg, hip and trunk joints. Hence, several different strategies can be used to achieve the same FRT score. For example, it is known that older people tend to flex more at the hips and younger people are more likely to flex their ankles [8,9].

A few studies have looked at whether flexion strategies have an impact on the FRT score. Takasaki et al. [10] performed a video analysis of FRT performance in a large sample of subjects and proposed an empirical classification of strategies. Wernick-Robinson et al. [11] used a movement analysis system and force platforms to explore FRT strategies in healthy subjects and in individuals with impaired vestibular function.

Our starting hypothesis was that different movement patterns can be used to perform the FRT; these may have an impact on test performance and may be age-dependant. We used a quantitative movement analysis device to investigate this hypothesis.

### 1.2. Methods

The study was performed in compliance with the tenets of the Declaration of Helsinki.

#### 1.2.1. Subjects

Twenty-nine volunteers (18 under-50s and 11 over-75s) were included in the study. They were recruited from among hospital staff and their family members. A detailed information sheet was handed over prior to inclusion in the study. All subjects gave their written, informed consent to participation.

We excluded subjects reporting two or more falls in the previous 12 months and those with neurological or musculoskeletal disorders that prevented either standing for at least 30 min or movements required 90 degrees of shoulder flexion. For included patients, any fall in the previous 12 months must have been due to extrinsic causes. All analyzed study participants met the inclusion criteria.

#### 1.2.2. Instrumentation

Trunk and limb movements were recorded by using an optoelectronic system VICON 370 (Oxford Metrics Ltd, UK) with six infrared cameras and a sampling frequency of 50 Hz.

Ground reaction forces were recorded on a force platform (the OR6 from AMTI, Watertown, USA) synchronised with the VICON system.

#### 1.2.3. Procedure

After the investigator had explained and demonstrated the FRT, the subject first performed the conventional, clinical FRT while standing alongside a wall. The examiner noted the score (in millimetres).

The FRT was then performed in the motion analysis laboratory. The subject was equipped with 18 markers (Fig. 1) located on the first sacral process (FSP), the anterior superior iliac spines (ASISs), the greater trochanters, the lateral femoral condyles, the lateral malleoli, the tip of the metatarsophalangeal joint of the second toe on each foot, the heels, the acromia, the C7 process, the right epicondyle and the tip of the metacarpophalangeal joint of the right index finger.

The subject then stepped onto the force platform and stood in an upright but relaxed position.

The recording started with the subject in the standing position and with the right index finger pointing forward for 10 s. Upon hearing an auditory cue, the subject initiated the test at the speed of his/her choice. The subject leant forward as far as possible without moving his/her feet. The recording was stopped when the subject took his/her heel(s) off the ground or when his/her index finger reached the maximum distance.

Five consecutive trials were recorded. The test instructions were repeated before each trial.

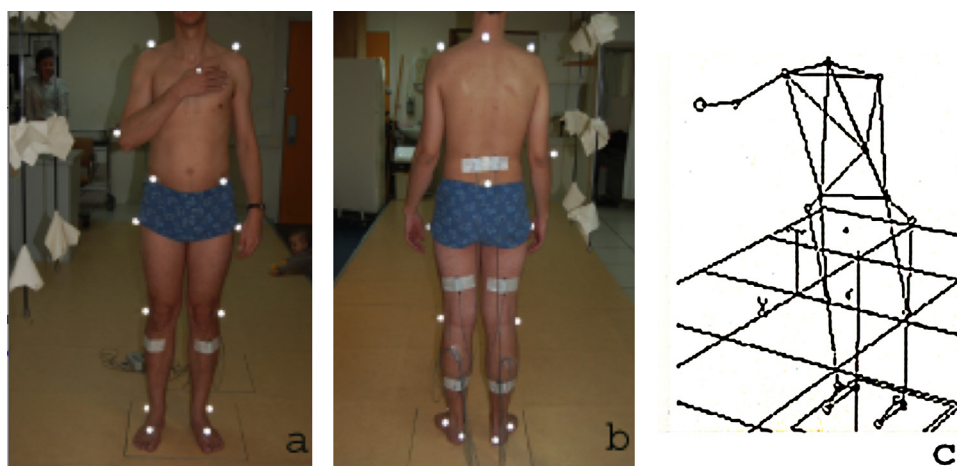


Fig. 1. The marker positions.

#### 1.2.4. Data recorded

##### 1.2.4.1. Clinical data. The FRT score (in mm).

Static parameters recorded in the motion analysis laboratory:

- the centre of pressure (CoP): anteroposterior displacements (APD) (in mm) at the 90th percentile and the total displacement distance (TDD);
- the angular positions at rest for the back (the angle between the C7-sacrum line and the horizontal plane), hips (the angle between the pelvis plane and the great trochanter-knee line), knees (the angle between the great trochanter-knee line and the knee-ankle line) and ankles (the angle between the knee-ankle line and the heel-toe line).

Parameters recorded or calculated during movement in the motion analysis laboratory:

- the FRT score;
- the movement duration;
- the CoP: APD (in mm) at the 90th percentile, the TDD and the TDD/APD ratio (referred to as the CoP index);
- trunk flexion (the angle between the C7-sacrum line and the horizontal plane) and twisting (the angle between the vertical plane and the bi-acromial line) at the end of the movement;
- pelvic movements: anteroposterior displacements of the centre of the triangle formed by the markers on the FSP and the two ASISs;
- joint angles at the beginning of the test and the range of joint motion during the test.

##### 1.2.5. Statistical analyses

For each subject and each parameter, the values from the five trials were averaged. Qualitative data were analyzed as percentages.

The non-parametric, two-sample Mann-Whitney U test was used to compare the data from the under-50 group and the over-75 group.

The threshold for statistical significance was set to  $P < 0.05$ .

Relationships between clinical and instrumental FRT parameters were examined by calculating Pearson's correlation coefficient.

An ascendant hierarchical clustering analysis (using Ward's method, based on Euclidean distances [12]) was used to group subjects together according to their age, height, COP excursion and motion analysis parameters during the FRT. Outliers (exceeding two standard deviations) were replaced by the mean value. Subjects in whom more than two-thirds of the data were outliers were excluded from the analysis.

A one-way analysis of variance and a subsequent post-hoc Tukey test were used to probe the statistical significance of the intergroup differences in the various movement parameters. The threshold for statistical significance was set to 5%.

#### 1.3. Results

##### 1.3.1. Demographic and clinical FRT data

The two groups (the under-50s and the over-75s) did not differ significantly in terms of mean weight and height (Table 1). The FRT score was significantly lower in the over-75 group than in the under-50 group ( $P = 0.003$ ).

##### 1.3.2. Parameters recorded in the static position

The CoP TDD and APD values were significantly lower in the under-50 group ( $P = 0.02$  and  $P < 0.05$ , respectively). There were no intergroup differences regarding the resting positions of the leg and hip joints. However, we observed an intergroup difference in the static position of the spine ( $P = 0.008$ ).

##### 1.3.3. Parameters recorded during movement

The FRT score was lower during the movement analysis than during the clinical examination. The clinical and movement analysis FRT scores were correlated (Pearson's correlation coefficient = 0.6). The over-75 group again displayed a lower mean score than the under-50 group ( $P = 0.028$ ). Although there was no intergroup difference in the movement duration, the movement velocity was significantly greater in the under-50 group ( $P = 0.039$ ). The over-75 group displayed a greater CoP

Table 1  
Comparison of the age groups.

	< 50 years	> 75 years	P
<i>Clinical FRT (mm)</i>	419.4 ± 88.9 (310 to 690)	285.5 ± 118.2 (160 to 500)	< 0.01
<i>Parameters recorded in the static position</i>			
CoP	242.8 ± 54.8	300.6 ± 61.1	< 0.05
Total displacement distance (mm)			
CoP	10.2 ± 2.7	13.2 ± 4.6	< 0.05
Anteroposterior displacement (mm)			
BACK	86.2 ± 2.8	80.3 ± 5.9	NS
HIP			
Left	85 ± 9.2	89.5 ± 5.42	NS
Right	85.8 ± 8.6	90.2 ± 5.41	NS
KNEE			
Left	7.8 ± 4.9	8.5 ± 6.1	NS
Right	8.1 ± 5.7	9.2 ± 6.9	NS
ANKLE			
Left	82.8 ± 3.4	78.9 ± 11.6	NS
Right	81 ± 2.1	81 ± 4.8	NS
<i>Parameters recorded during movement</i>			
FRT in the lab condition (mm)	367.8 ± 54.7	258.5 ± 79.8	< 0.005
FRT duration (sec)	5.8 ± 2.2	6 ± 2.1	NS
FRT speed (mm/s)	73.7 ± 28.6	50.2 ± 21.5	< 0.05
CoP during FRT	336.3 ± 71.8	446.1 ± 155.8	< 0.05
Total displacement distance (mm)			
CoP during FRT	89.9 ± 24.4	51.55 ± 35.5	< 0.01
Anteroposterior displacement (mm) (mm)			
CoP during FRT	4.1 ± 1.6	52.7 ± 113.3	NS
INDEX			
Pelvic sagittal displacement (mm)	−10.8 ± 40.7	−51.03 ± 31.5	< 0.05
Trunk flexion (°)	−53.5 ± 15.5	−53.1 ± 12.3	NS
Trunk rotation (°)	−15.8 ± 7.2	−7.4 ± 9.3	< 0.05
Hip range of motion (°)			
Left	−37.1 ± 12.6	−48.9 ± 15.2	0.051
Right	−34.3 ± 14.4	−48.7 ± 16.5	< 0.05
Knee range of motion (°)			
Left	−1.5 ± 8.8	5.6 ± 18.9	NS
Right	−2.3 ± 9.6	6.1 ± 21.7	NS
Ankle range of motion (°)			
Left	6.1 ± 3.2	5.4 ± 8.1	NS
Right	5.2 ± 3.4	4.3 ± 9.3	NS

TDD ( $P < 0.05$ ) but a lower CoP APD ( $P < 0.01$ ). The pelvis moved forward in some subjects, backwards in others or even forwards and then backwards (Figs. 2–4). Backward pelvic displacement was more ample in the over-75 group ( $P < 0.05$ ).

Relative to the under-50s, the over-75 subjects displayed less trunk rotation during the FRT ( $P = 0.024$ ). We did not observe any significant intergroup differences in trunk flexion, knee motion or ankle motion. The amplitude of right hip flexion was greater in the over-75 group ( $P < 0.05$ ), whereas the intergroup difference in left hip flexion did not achieve statistical significance ( $P = 0.051$ ).

At the end of the test, there were no significant differences between the two groups in terms of the hip, knee and ankle positions.

**1.3.3.1. Cluster analysis.** Two subjects (one in the under-50 group and one in the over-75 group) were excluded from the analysis because more than two-thirds of their parameters were outliers (Fig. 5, Table 2).

The ascendant hierarchical clustering analysis revealed two distinct clusters ( $n = 7$  and  $20$ , respectively), with a Euclidean distance of  $15.84$ . Calculation of the R ratio confirmed the existence of two distinct clusters.

The two groups differed significantly in terms of age, FRT score, pelvis translation, anteroposterior CoP displacement, total COP displacement, the CoP index, the ankle range of motion, the hip range of motion, trunk flexion and shoulder rotation.

The first, larger cluster ( $n = 20$  subjects, of whom  $16$  [80%] were under 50) stood straighter, had a higher FRT score and a longer CoP displacement (Fig. 2), flexed their leg and hip joints less and performed a larger shoulder rotation during the test (relative to the second, smaller cluster).

The smaller cluster ( $n = 7$  subjects, of whom  $6$  were over 75) was associated with a lower FRT score and smaller CoP displacements (Fig. 3). More ample trunk flexion was compensated by rearward translation of the pelvis and flexion of the ankle, knee and hip joints.

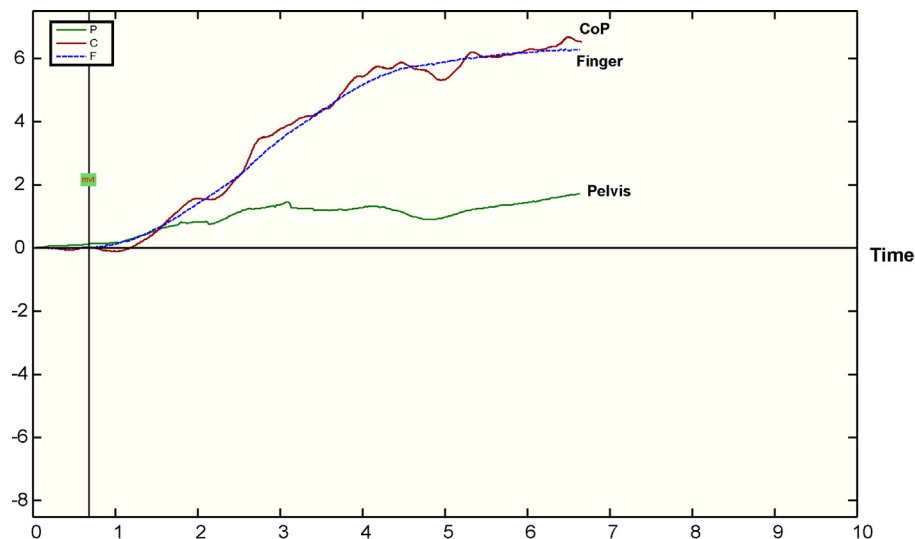


Fig. 2. Trajectory in the sagittal plane of the pelvis, the centre of pressure (CoP) and the finger during FRT. All markers move forward.

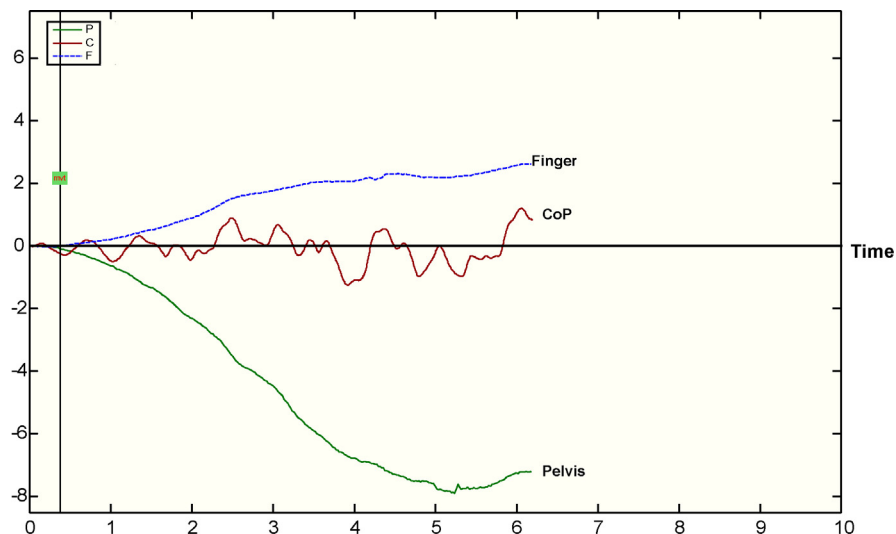


Fig. 3. Trajectory in the sagittal plane of the pelvis, the centre of pressure (CoP) and the finger during FRT. The pelvis moves backward, the finger moves forward, and centre of pressure oscillates around the initial position.

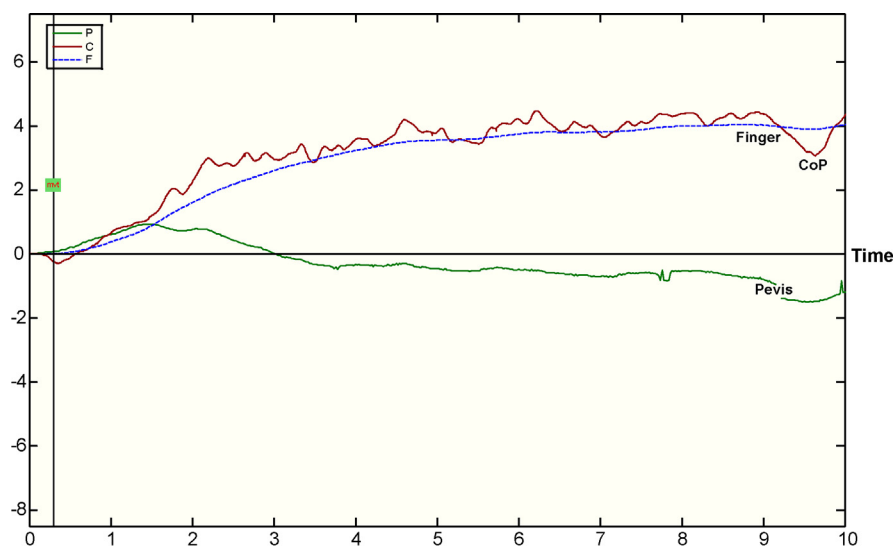


Fig. 4. Trajectory in the sagittal plane of the pelvis, the centre of pressure (CoP) and the finger during FRT. The pelvis moves forwards and then backwards, whereas the finger and the CoP move forward.



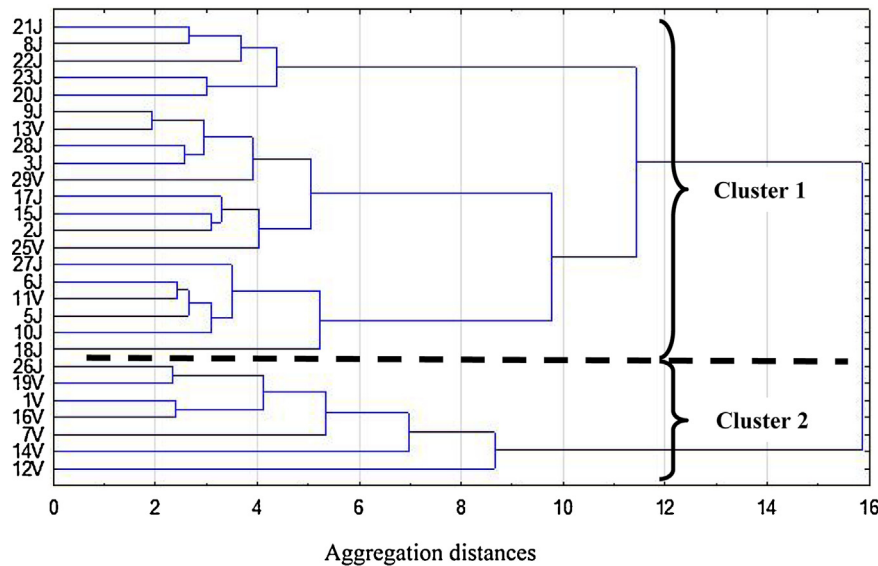


Fig. 5. Dendrogram representing the minimum variance hierarchical classification of the Functional Reach Test (FRT) patterns of healthy young and elderly participant (Ward method; Euclidian distances). The figure is read from the left where the individual mean pattern are listed, in four families, to right where all the FRT trials are grouped into a single family. On the left, participants: S(x) + age group (old[V]/young[J]); two subjects were excluded (one young and one old) considering more than 2/3 of extreme data (cf. methods).

#### 1.4. Discussion

We observed significant differences between under-50 adults and non-faller, over-75 adults in terms of the FRT score and the strategy adopted during the test. Our results are consistent with the literature data on the FRT score [13] and the magnitude of the CoP excursion in the static position [2,14].

The clinical FRT score was always higher than that obtained in the motion analysis laboratory. During the clinical test, the proximity of the wall may have made the subjects less apprehensive of losing their balance. The marks on the wall may also have guided the subjects and increased their level of motivation.

The speed of test performance decreased with age, as evidenced by the shorter reach achieved over a similar duration.

Kozak et al. [15] also reported that older women performed the FRT more slowly than young women.

Reduced trunk rotation may explain (at least in part) the lower FRT score in older subjects. This finding was also reported by Cavanaugh et al. [16]. However, the FRT primarily assesses the subject's ability to displace his/her centre of gravity forwards. Aufauvre et al. [17] have shown that the FRT score was well correlated with the greatest anterior CoP excursion. We found significant intergroup differences in the magnitudes of the CoP TDD and APD during the test, as also reported by Cavanaugh et al. [18]. We did not find any difference between the two groups in terms of trunk flexion; this contrasts with the report by Kosak et al. [15], who observed an age-related decrease in trunk flexion during the FRT. In the present study, the older subject avoided a forward displacement

Table 2  
Parameter significantly different in the two groups found by cluster analysis.

	ANOVA univariate with 2 classes	Classe 1 Mean $\pm$ SD	Classe 2 Mean $\pm$ SD	Post-hoc HSD Tukey
Age	0.007	36.8 $\pm$ 19.3	67.3 $\pm$ 21.0	0.007
FRT (mm)	0.004	356.3 $\pm$ 65.4	259.8 $\pm$ 83.2	0.004
Movement latency (s)	0.036	0.3 $\pm$ 0.1	0.2 $\pm$ 0.1	0.037
Pelvis range of motion	0.002	−8.0 $\pm$ 29.6	−76.0 $\pm$ 29.5	0.002
Sagittal displacement of CoP during FRT	0.005	89.8 $\pm$ 24.4	43.1 $\pm$ 31.8	0.005
Length CoP during FRT	0.023	353.6 $\pm$ 61.5	432.0 $\pm$ 191.0	0.023
Index CoP during FRT	0.000	4.5 $\pm$ 2.1	62.6 $\pm$ 123.1	0.000
Left ankle range of motion	0.008	7.0 $\pm$ 1.9	11.3 $\pm$ 5.3	0.008
Right ankle range of motion	0.042	6.0 $\pm$ 2.3	11.0 $\pm$ 5.8	0.042
Left knee range of motion	0.007	4.8 $\pm$ 2.6	16.4 $\pm$ 20.4	0.007
Right knee range of motion	0.078	6.3 $\pm$ 2.4	18.3 $\pm$ 21.6	
Left hip range of motion	0.022	37.0 $\pm$ 10.0	56.6 $\pm$ 14.2	0.022
Right hip range of motion	0.022	34.9 $\pm$ 11.4	56.4 $\pm$ 15.9	0.022
Trunk initial angle	0.000	85.9 $\pm$ 3.5	79.6 $\pm$ 5.6	0.000
Trunk final angle	0.019	35.5 $\pm$ 13.5	22.1 $\pm$ 11.4	0.019
Trunk rotation	0.034	−15.5 $\pm$ 7.2	−5.9 $\pm$ 9.3	0.034

of the CoP by moving the pelvis backwards, rather than by avoiding trunk flexion.

Greater hip and knee flexion in the over-75 group:

- lowered the centre of gravity (making the subject feel safer) and;
- reduced the activity of the calf muscles and the degree of hamstring stretch (which decreases with age).

Horak and Nashner described both a hip strategy and an ankle strategy for maintaining balance during anteroposterior balance perturbations [8,19]. Takasaki et al. [10] and Wernick-Robinson et al. [11] defined an FRT hip strategy that involved at least 20° of hip flexion and just 5° of ankle flexion on both body sides. In our study, fifteen subjects (6 of the over-75s and 9 of the under-50s) adopted a hip strategy that matched these criteria.

An ankle strategy involves significant ankle plantar flexion and little hip flexion; this approach was not observed in the present study and was rarely observed in the studies by Takasaki et al. [10] and Wernick-Robinson et al. [11]. In our study, two subjects (one in each group) performed FRT with ankle plantar flexion but this was combined with ample knee flexion (i.e. similar to a squat). Indeed, a “squat” strategy was also observed in a few cases in the studies by Takasaki et al. and Wernick-Robinson et al.

In the present study, hip and ankle movements do not appear to be the best parameters for define movement strategies during the FRT. Knee flexion occurred more frequently than in the literature studies, and influenced hip and ankle position. The marked knee flexion during the FRT in the present study may be explained by our instrumental procedure, which does not provide horizontal landmarks that might facilitate performance of the test. In Takasaki et al.’s experiments, subjects leant forward while holding a horizontal, sliding bar with the right hand. This paradigm is similar to Duncan et al.’s description of the test, and maintenance of contact with the bar limits knee flexion.

In the present study, posterior translation of the pelvis was the kinematic parameter that best distinguished between the two main FRT strategies. Takasaki et al. also found that older adults moved their pelvis backward during the FRT, in order to limit anterior displacement of the CoP.

Force platform data are often used to assess balance in older subjects performing dynamic tasks [18,20,21]. These data (especially CoP sagittal displacement and the CoP index) were very discriminant in the present study. This is not surprising, since people with poor balance or fear of falling tend to avoid displacements of the CoP. We conclude that the choice of strategy depends on the subject’s ability (or will) to move his/her CoP.

### 1.5. Conclusion

As reported in the literature, we found that the FRT score decreased with age.

The present study provides a better understanding of factors associated with a low FRT score. Performance in the FRT is linked to the ability to move the CoP forwards. In the FRT,

elderly people avoid displacing their CoP by flexing the trunk and moving the pelvis backwards.

Cluster analysis enabled us to identify two movement strategies during the FRT. Although age was indeed one of the discriminant parameters in the cluster analysis, both “movement strategy groups” included subjects from the two age groups studied here.

It would be interesting to use the same methodology to study the FRT strategy used by older adults with frequent falls or with fear of falling.

### Disclosure of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest concerning this article.

## 2. Version française

### 2.1. Introduction

L’instabilité posturale est un phénomène fréquent chez la personne âgée et ses conséquences constituent un problème majeur de santé publique. La détection, l’analyse et la compréhension des perturbations de l’équilibre et de la marche font partie de la pratique quotidienne. De très nombreuses méthodes d’évaluation du risque de chute ont été proposées, l’une des plus communes est le Functional Reach Test (FRT).

La FRT évalue la stabilité vers l’avant d’une personne debout qui étend volontairement son bras en avant que possible dans un plan horizontal, pendant qu’elle garde les deux talons au contact avec le sol. Le score est obtenu en mesurant la distance entre la position du bout des doigts au départ et à l’arrivée.

Il a été démontré dans plusieurs études [1,2] que le FRT est fiable et a une variabilité inter-examineur faible. Le score du FRT est corrélé avec le déplacement antéro-postérieur du centre de pression (CdP) [1,3,4]. De plus, le FRT a également une bonne reproductibilité dans le temps [1,5] et est sensible au changement [6,7]. Enfin on sait que le score du FRT diminue avec l’âge mais qu’un score anormalement bas et un bon prédicateur du risque de chute [3].

La réalisation du FRT fait participer les articulations de la cheville, du genou, de la hanche et du tronc; plusieurs stratégies de mise en jeu de ces articulations pourraient donc théoriquement arriver au même score de FRT. Par exemple, on sait que les sujets âgés ont tendance à plus fléchir leurs hanches et les sujets jeunes à plus réaliser une dorsiflexion de cheville pour se pencher en avant [8,9].

Peu d’études ont essayé de déterminer si la stratégie de réalisation influençait sur le score du FRT. Takasaki et al. [10] ont réalisé une analyse vidéo du FRT sur un large échantillon d’individu et ont proposé une classification empirique des stratégies. Wernick-Robinson et al. [11] ont utilisé un système d’analyse du mouvement et une plateforme de force pour déterminer les stratégies de réalisation du FRT chez des sujets sains et chez des sujets avec des fonctions vestibulaires altérées.

Notre hypothèse de départ est que différents schémas peuvent être utilisés pour réaliser le FRT, que ceux-ci peuvent



avoir un impact sur le résultat du test et peuvent être liés à l'âge. Nous avons utilisé un système d'analyse du mouvement pour explorer cette hypothèse.

## 2.2. Méthode

L'étude a été conduite en conformité avec les principes de la déclaration d'Helsinki.

### 2.2.1. Sujets

Vingt-neuf volontaires (18 de moins de 50 ans, 11 de plus de 75 ans) ont été inclus dans l'étude. Ils ont été recrutés parmi le personnel de l'hôpital et les membres de leur famille. Une feuille d'informations détaillée leur a été remise avant toute inclusion dans l'étude. Tous les sujets ont donné leur consentement pour participer à l'étude.

Nous avons exclu les sujets ayant signalé deux chutes ou plus dans l'année précédant leur inclusion, ainsi que ceux qui présentaient des affections neurologiques ou musculo-squelettiques susceptibles soit de les empêcher de se tenir debout au moins 30 minutes, soit de fléchir l'épaule bras tendu à 90°. Pour les sujets retenus dans l'étude, toute chute survenue dans les 12 mois précédant l'inclusion devait avoir une cause extrinsèque.

Tous les sujets entrant dans l'analyse des résultats ont rempli les critères d'inclusion.

### 2.2.2. Instrumentation

Les mouvements des membres et du tronc étaient enregistrés grâce à un système opto-électronique Vicon 370 (Oxford Metrics Ltd, UK) avec 6 caméras infrarouges et une fréquence d'échantillonnage de 50 Hz. La force de réaction au sol était enregistrée sur une plateforme de force (OR6 de MATI Watertown États-Unis) synchronisée avec le système Vicon.

### 2.2.3. Procédure

Après que l'investigateur ait expliqué le FRT et réalisé une démonstration, le sujet réalisait d'abord le FRT conventionnel, clinique, en se tenant debout le long d'un mur. L'investigateur notait le score en millimètre. Le FRT était

ensuite effectué dans le laboratoire d'analyse du mouvement. Le sujet était équipé de 18 marqueurs (Fig. 1) placés sur le premier processus sacré, les épines iliaques antéro-supérieures, le grand trochanter, le condyle fémoral latéral, l'articulation métatarsophalangienne du 2<sup>e</sup> rayon de chaque pied, les talons, les acromions, le processus épineux de C7, l'épicondyle droit, l'articulation métacarpophalangienne de l'index droit.

Le sujet avançait ensuite sur la plateforme de force et se tenait debout dans une position relâchée.

L'enregistrement commençait avec les sujets en position debout et l'index droit pointait en avant pendant 10 secondes. Dès la perception d'un signal sonore, le sujet débutait le test à la vitesse de son choix. Le sujet se penchait en avant aussi loin que possible sans bouger ses pieds. L'enregistrement était terminé quand le sujet décollait les talons du sol ou quand son index atteignait la distance maximale.

Cinq essais consécutifs étaient enregistrés. Les instructions étaient répétées avant chaque essai.

### 2.2.4. Données enregistrées

Paramètre clinique : le score au FRT (en millimètres).

Paramètres statiques enregistrés dans le laboratoire d'analyse du mouvement :

- le CdP : déplacement antéro-postérieur (DAP) (en millimètres) au 90<sup>e</sup> percentile de la distance totale de déplacement (DTD) ;
- la position angulaire au repos du dos (angle entre la ligne joignant le sacrum et C7 et le plan horizontal), les hanches (angle entre le plan du bassin et la ligne allant du grand trochanter au condyle fémoral), les genoux (angle entre la ligne grand trochanter condyle et la ligne entre condyle et malléole) et les chevilles (angle entre la ligne genou cheville et la ligne talon orteils).

Paramètres enregistrés ou calculés durant la réalisation du FRT dans le laboratoire :

- le score au FRT ;

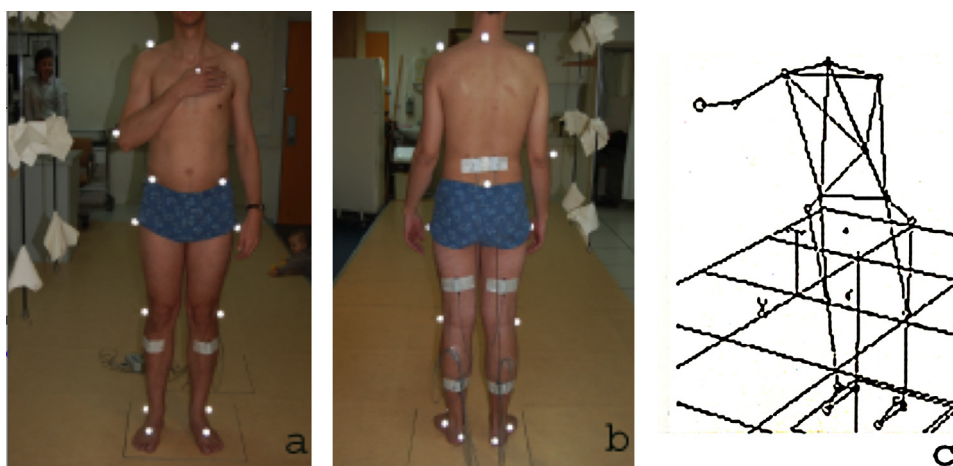


Fig. 1. Position des marqueurs.

- la durée du mouvement ;
- le CdP : DAP (en mm au 90<sup>e</sup> percentile) ;
- le déplacement total et le rapport déplacement total sur DAP (appelé index du CdP) ;
- la flexion du tronc (angle entre la ligne C7-sacrum et le plan horizontal) et la rotation (angle entre le plan vertical et la ligne bi-acromiale à la fin du mouvement) ;
- mouvement du bassin : déplacement antéro-postérieur du centre du triangle formé par les marqueurs sur le processus sacré et les épine iliaques antéro-supérieures ;
- les angles articulaires au début du test et l'amplitude des mouvements articulaires pendant le test.

### 2.3. Analyse statistique

Pour chaque sujet et chaque paramètre, les valeurs des 5 essais étaient moyennées. Les données qualitatives étaient analysées en pourcentage.

Le test non paramétrique de Mann-Whitney pour deux échantillons était utilisé pour comparer les données entre le groupe de moins de 50 ans et le groupe de plus de 75 ans. Le seuil de significativité était retenu à  $p < 0,05$ . Les relations entre les paramètres du FRT clinique et du FRT instrumenté étaient étudiées par le calcul du coefficient de corrélation de Pearson. Une analyse hiérarchique ascendante de cluster utilisant la méthode Ward, basée sur les distances euclidiennes [12], était utilisée pour grouper les sujets en fonction de leur âge, leur taille, le déplacement de leur CdP et les données de l'analyse du mouvement durant le FRT. Les données qui excédaient deux déviations standards (considérées comme hors normes) étaient remplacées par la valeur moyenne. Les sujets chez qui plus des deux tiers des données étaient hors normes, étaient exclus de l'analyse.

Une analyse de variance uni-variée et un test de Tukey post-hoc ont été utilisés pour confirmer la significativité statistique des différences entre groupe pour les paramètres de marche. Le seuil de significativité statique a été établi à 5 %.

### 2.4. Résultats

#### 2.4.1. Données démographiques et FRT clinique

Les deux groupes (moins de 50 ans et plus de 75 ans) ne différaient pas en termes de poids et de taille moyens (Tableau 1). Le score FRT était significativement plus bas chez les plus de 75 ans ( $p = 0,003$ ).

#### 2.4.2. Paramètres enregistrés dans la position statique

Le déplacement total et le déplacement antéro-postérieur du CdP étaient significativement plus faibles chez les moins de 50 ans ( $p = 0,02$  et  $p < 0,005$  respectivement). Il n'y avait pas de différence entre groupe pour la position des membres inférieurs. Nous avons observé une différence entre les groupes pour la position du tronc ( $p = 0,008$ ).

#### 2.4.3. Paramètres enregistrés durant le mouvement

Le score FRT était plus faible durant l'analyse du mouvement qu'en condition habituelle. Le FRT clinique et

instrumenté étaient corrélés (coefficient de Pearson = 0,6). Le groupe de plus de 75 ans avait un score au FRT moyen plus faible que le groupe des moins de 50 ans ( $p = 0,028$ ). Bien qu'il n'y ait pas de différence dans la durée du mouvement entre les groupes, la vitesse du mouvement était significativement plus grande chez les moins de 50 ans ( $p = 0,039$ ). Le groupe des plus de 75 ans avait une distance totale parcourue du CdP plus grande ( $p < 0,05$ ) mais un plus petit déplacement antéro-postérieur du CdP ( $p < 0,01$ ).

Le bassin se déplaçait en avant chez certains sujets, en arrière chez d'autres, et même en avant puis en arrière dans certains cas (Fig. 2–4). Par rapport aux moins de 50 ans, les plus de 75 ans déplaçaient en arrière le bassin de façon plus ample ( $p < 0,05$ ) et réalisaient une rotation du tronc moindre ( $p = 0,024$ ). Nous n'avons pas observé de différence entre les groupes en ce qui concerne la flexion de tronc et les mouvements de genoux et de chevilles. L'amplitude de la hanche droite était plus grande chez les moins de 75 ans ( $p < 0,05$ ), tandis que la différence d'amplitude de flexion de hanche gauche entre les groupes n'atteignait pas le seuil de significativité à gauche ( $p = 0,051$ ).

En position finale du test, il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes en ce qui concerne la position des hanches, des genoux et des chevilles.

**2.4.3.1. Analyse en cluster.** Deux sujets (un chez les moins de 50 ans et un chez les plus de 75 ans) ont été exclus de l'analyse parce que plus des deux tiers des paramètres étaient hors normes (Fig. 5 Tableau 2).

L'analyse en hiérarchie ascendante a permis d'isoler deux groupes distincts, l'un de 7 sujets, l'autre de 20 sujets, avec une distance euclidienne de 15,84. Le calcul du R ratio confirmé qu'il s'agissait bien de deux groupes distincts.

Ces deux groupes différaient significativement en termes d'âge, de score au FRT, de déplacement du bassin, de déplacement antéro-postérieur du CdP, du déplacement total du CdP, de l'index du CdP, de l'amplitude du mouvement de cheville, de l'amplitude du mouvement de la hanche, de la flexion du tronc et de la rotation d'épaule.

Le premier cluster, de 20 sujets dont 16 (80 % de moins de 50 ans) se tenait plus droit, avait un score au FRT plus élevé et un déplacement du CdP plus grand. Ils fléchissaient moins leurs genoux et leurs hanches mais tournaient plus les épaules durant le FRT. Le second cluster de 7 sujets dont 6 avaient plus de 75 ans, était associé avec un FRT score plus bas, un déplacement du CdP plus petit, une flexion du tronc plus ample compensée par une translation en arrière du bassin et une flexion des chevilles, des genoux et des hanches plus importante.

### 2.5. Discussion

Nous avons observé des différences significatives chez les sujets non chuteurs entre les moins de 50 ans et les plus de 75 ans, en termes de score au FRT et de stratégie adoptée durant le test. Nos résultats sont en concordance avec la littérature sur le score FRT [13] et sur le déplacement du CdP en position statique [2,14].

Tableau 1  
Comparaison des groupes d'âges.

	< 50 ans	> 75 ans	p
<i>FRT clinique (mm)</i>	419,4 ± 88,9 (310 to 690)	285,5 ± 118,2 (160 to 500)	< 0,01
<i>Parameters recorded in the static position</i>			
CdP	242,8 ± 54,8	300,6 ± 61,1	< 0,05
Distance totale de déplacement (mm)			
CdP	10,2 ± 2,7	13,2 ± 4,6	< 0,05
Déplacement antéro-postérieur (mm)			
Dos	86,2 ± 2,8	80,3 ± 5,9	NS
Hanche			
Gauche	85 ± 9,2	89,5 ± 5,42	NS
Droit	85,8 ± 8,6	90,2 ± 5,41	NS
Genou			
Gauche	7,8 ± 4,9	8,5 ± 6,1	NS
Droit	8,1 ± 5,7	9,2 ± 6,9	NS
Cheville			
Gauche	82,8 ± 3,4	78,9 ± 11,6	NS
Droit	81 ± 2,1	81 ± 4,8	NS
<i>Parameters recorded during movement</i>			
FRT en condition de laboratoire(mm)	367,8 ± 54,7	258,5 ± 79,8	< 0,005
FRT durée(sec)	5,8 ± 2,2	6 ± 2,1	NS
FRT vitesse (mm/s)	73,7 ± 28,6	50,2 ± 21,5	< 0,05
CdP pendant le FRT	336,3 ± 71,8	446,1 ± 155,8	< 0,05
Distance totale de déplacement (mm)			
CdP pendant le FRT	89,9 ± 24,4	51,55 ± 35,5	< 0,01
Déplacement antéro-postérieur (mm) (mm)			
CdP pendant le FRT	4,1 ± 1,6	52,7 ± 113,3	NS
INDEX			
Déplacement sagittal du bassin(mm)	−10,8 ± 40,7	−51,03 ± 31,5	< 0,05
Flexion du tronc (°)	−53,5 ± 15,5	−53,1 ± 12,3	NS
Rotation du tronc (°)	−15,8 ± 7,2	−7,4 ± 9,3	< 0,05
Amplitude des mouvements de hanche (°)			
Gauche	−37,1 ± 12,6	−48,9 ± 15,2	0,051
Droit	−34,3 ± 14,4	−48,7 ± 16,5	< 0,05
Amplitude des mouvements de genou (°)			
Gauche	−1,5 ± 8,8	5,6 ± 18,9	NS
Droit	−2,3 ± 9,6	6,1 ± 21,7	NS
Amplitude des mouvements de cheville (°)			
Gauche	6,1 ± 3,2	5,4 ± 8,1	NS
Droit	5,2 ± 3,4	4,3 ± 9,3	NS

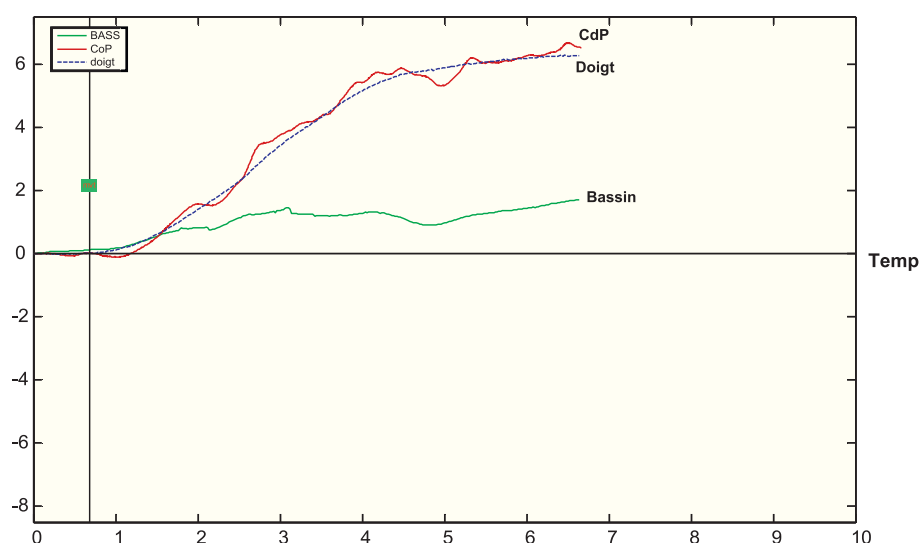


Fig. 2. Trajectoire dans le plan sagittal du bassin du centre de pression (CdP) et du doigt pendant le FRT. Tous les marqueurs se déplacent vers l'avant.

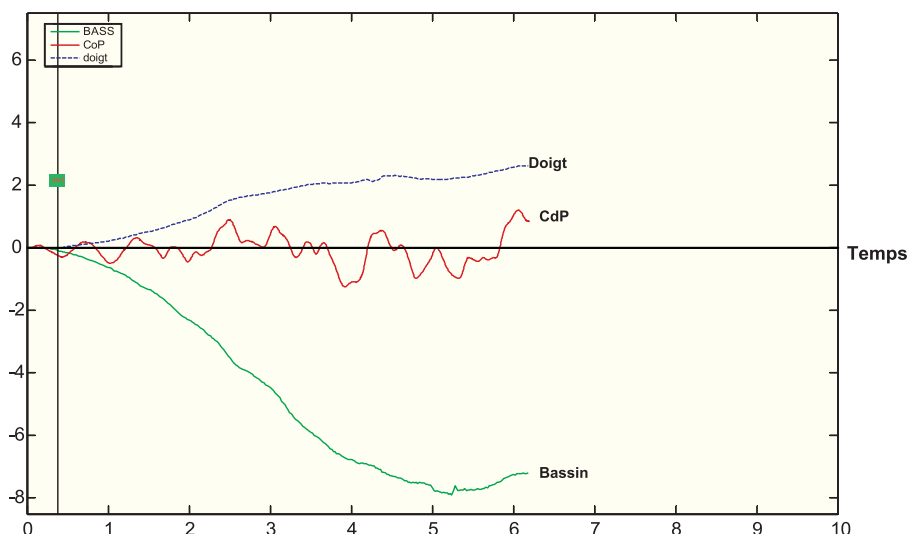


Fig. 3. Trajectoire dans le plan sagittal du bassin, du centre de pression (CdP) et du doigt pendant le FRT. Le bassin se déplace en arrière, le doigt se déplace en avant et le centre de pression oscille autour de sa position initiale.

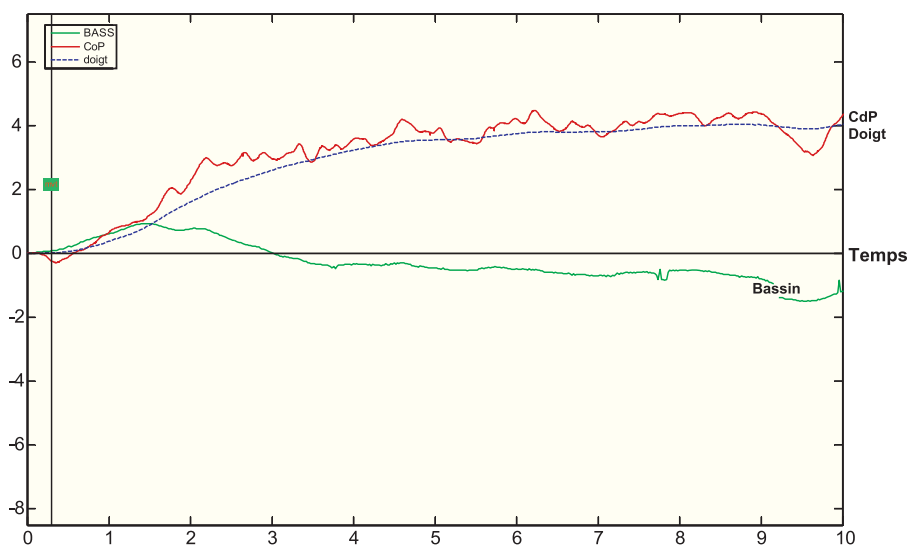


Fig. 4. Trajectoire dans le plan sagittal du bassin, du centre de pression (CdP) et du doigt pendant le FRT. Le bassin se déplace en avant puis en arrière pendant que le doigt et le CdP se déplacent en avant.

Le score au FRT clinique était plus haut que celui réalisé en laboratoire d'analyse du mouvement. Durant le test clinique, la proximité du mur a pu mettre en confiance les sujets qui ont eu moins peur de perdre leur équilibre. Les marques sur le mur ont aussi pu avoir un effet favorable sur la motivation du sujet.

La vitesse de réalisation du test diminue avec l'âge puisque pour une même durée, les plus âgés ont un FRT plus court. Kozak et al. [15] ont aussi rapporté que les femmes âgées réalisaient le FRT plus lentement que les plus jeunes.

La moindre rotation du tronc lors du FRT chez les sujets âgés a aussi été rapportée par Cavanaugh [16]. Elle peut expliquer en partie un score plus bas au FRT, mais le FRT évalue en premier lieu la capacité du sujet à déplacer son centre de gravité vers l'avant.

Aufauvre et al. [17] ont montré que le score au FRT était bien corrélé avec le déplacement du CdP vers l'avant. Nous avons trouvé des différences significatives entre les groupes d'âge en

ce qui concerne le déplacement total du CdP et le déplacement antéro-postérieur pendant le test comme Cavanaugh et al. [18]. Nous n'avons pas trouvé de différence de flexion de tronc entre les deux groupes. Ceci contraste avec les constatations de Kozak et al. [15] qui ont observé une diminution liée à l'âge de la flexion du tronc au cours du FRT. Dans notre étude, les sujets âgés évitaient le déplacement du CdP en translatant leur bassin vers l'arrière plutôt qu'en évitant de s'incliner vers l'avant.

Les plus grandes amplitudes de flexion de genoux et de hanches chez les plus de 75 ans abaissaient, d'une part, le centre de gravité, ce qui rassurait le sujet, et réduisait l'activité des muscles du mollet et l'étirement des ischio-jambiers, dont on sait qu'il diminue avec l'âge. Horak et Nashner ont tous deux décrit une stratégie de hanche et une stratégie de cheville pour maintenir l'équilibre pendant une perturbation dans le sens antéro-postérieur [8,19]. Takasaki et al. [10] et Wernick-Robinson et al. [11] ont défini la stratégie de hanche dans le

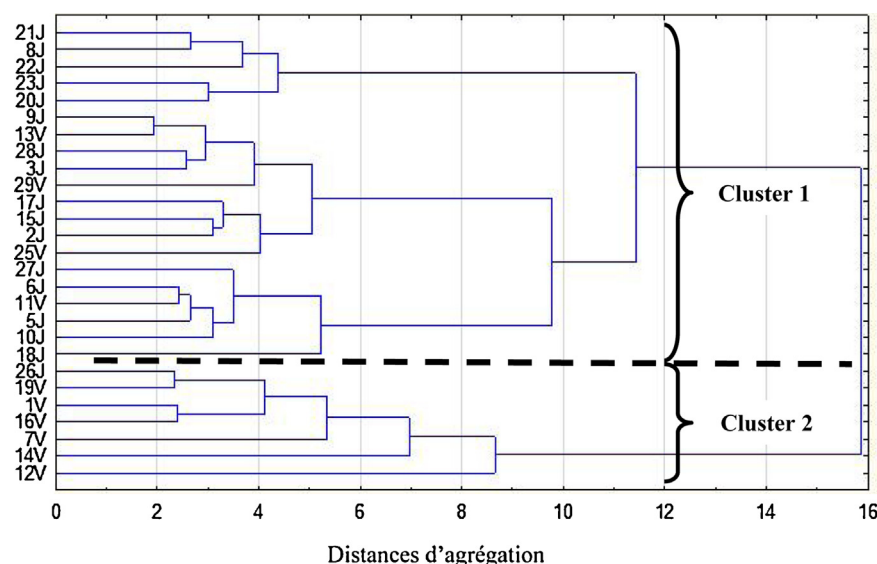


Fig. 5. Dendrogramme de classification hiérarchique ascendante réalisé à partir des paramètres du Functional Reach Test (FRT) chez des participants sains jeunes et âgés (méthode de Ward et distances euclidiennes). La figure se regarde de gauche à droite, où les individus, puis individus ou famille d'individus, se regroupent progressivement par similarité en 4 familles puis en deux jusqu'à ne réaliser qu'un seul groupe à droite. À gauche, participants : numéro + groupe d'âge (Jeunes[J]/Vieux[V]) ; deux participants ont été exclus (un J et un V) car plus des 2/3 de leurs données atteignaient des valeurs extrêmes par rapport au groupe (cf. méthode).

FRT par une participation d'au moins 20° de flexion de hanche contre plus 5° de dorsiflexion de cheville des deux cotés. Dans notre étude, 15 sujets (6 dans le groupe des plus de 75 ans et 9 dans celui des moins de 50 ans) ont choisi une stratégie de hanche selon ces critères. Une stratégie de cheville associe une forte flexion dorsale de cheville avec une faible flexion de hanche. Cette approche n'a pas été observée dans notre étude et a été rarement mise en évidence dans les études de Takasaki et al. [10] et Wernick-Robinson et al. [11]. Dans notre étude, deux sujets (un dans chaque groupe) ont réalisé le FRT avec une flexion dorsale de cheville mais qui était combiné avec une ample flexion de genou (comme pour *squat*). Cette stratégie « squat » a été aussi observée dans quelques cas par Takasaki et al. et Wernick-Robinson et al.

Dans notre étude, les mouvements de hanche et de cheville ne paraissent pas les meilleurs paramètres pour définir une stratégie de réalisation du FRT. La flexion de genou était présente plus fréquemment que dans les autres études de la littérature et influençait la position des hanches et des chevilles. Cette franche flexion de genou durant le FRT dans notre étude peut être expliquée par notre procédure : lors du test en laboratoire, le sujet ne dispose pas d'un repère horizontal qui pourrait faciliter la réalisation du test. Dans l'étude de Takanasi et al., les sujets se penchaient en avant en faisant glisser la main droite le long d'une barre horizontale, ce qui reproduisait la description du test de Duncan et al. Le maintien du contact avec la barre limite la flexion de genou.

Tableau 2  
Paramètres différenciant significativement lors de l'analyse en clusters.

	Anova univariate with 2 classes	Classe 1 Mean ± SD	Classe 2 Mean ± SD	Post-hoc HSD Tuckey
Âge	0,007	36,8 ± 19,3	67,3 ± 21,0	0,007
FRT (mm)	0,004	356,3 ± 65,4	259,8 ± 83,2	0,004
Latence du mouvement (s)	0,036	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,037
Amplitude des mouvements du bassin	0,002	-8,0 ± 29,6	-76,0 ± 29,5	0,002
Déplacement sagittal du CdP pendant leFRT	0,005	89,8 ± 24,4	43,1 ± 31,8	0,005
Longueur du déplacement du CdP pendant leFRT	0,023	353,6 ± 61,5	432,0 ± 191,0	0,023
Index du CdP pendant le FRT	0,000	4,5 ± 2,1	62,6 ± 123,1	0,000
Amplitude des mouvements de cheville gauche	0,008	7,0 ± 1,9	11,3 ± 5,3	0,008
Amplitude des mouvements de cheville droite	0,042	6,0 ± 2,3	11,0 ± 5,8	0,042
Amplitude des mouvements du genou gauche	0,007	4,8 ± 2,6	16,4 ± 20,4	0,007
Amplitude des mouvements du genou droit	0,078	6,3 ± 2,4	18,3 ± 21,6	
Amplitude des mouvements de hanche gauche	0,022	37,0 ± 10,0	56,6 ± 14,2	0,022
Amplitude des mouvements de hanche droite	0,022	34,9 ± 11,4	56,4 ± 15,9	0,022
Angle initial du tronc	0,000	85,9 ± 3,5	79,6 ± 5,6	0,000
Angle final du tronc	0,019	35,5 ± 13,5	22,1 ± 11,4	0,019
Rotation du tronc	0,034	-15,5 ± 7,2	-5,9 ± 9,3	0,034



Dans notre étude, la translation postérieure du bassin était le paramètre cinématique qui distinguait le mieux les deux stratégies de réalisation du FRT. Takanasi et al. ont également constaté que les sujets âgés déplaçaient leur bassin en arrière pour limiter le déplacement antérieur du CdP pendant le FRT.

L'enregistrement sur plateforme de force est souvent utilisé pour évaluer l'équilibre des sujets âgés pendant des tâches dynamiques [18,20,21]. Les paramètres recueillis, en particulier le déplacement sagittal du CdP et l'index du CdP, étaient très discriminants dans notre étude. Ce n'est pas surprenant puisque les sujets avec un équilibre précaire et une peur de tomber ont tendance à éviter de déplacer leur CdP.

Nous en tirons la conclusion que le choix de la stratégie de réalisation du FRT dépend de la possibilité du sujet (ou de sa volonté) à déplacer son CdP.

## 2.6. Conclusion

En conformité avec les données de la littérature, nous avons trouvé que le score au FRT diminue avec l'âge. Notre étude permet une meilleure compréhension des facteurs associés à un score bas au FRT. Les performances au FRT sont liées à la possibilité de déplacer le CdP en avant. Lors du test, les personnes âgées évitent de déplacer leur CdP en translatant leur bassin vers l'arrière lorsqu'ils inclinent le tronc vers l'avant.

L'analyse en cluster nous a permis d'identifier deux stratégies motrices pour réaliser le FRT bien que l'âge était un des paramètres discriminant dans cette analyse, on trouvait pour chaque stratégie des personnes appartenant aux deux groupes d'âge étudiés.

Il sera intéressant d'utiliser la même procédure pour étudier les stratégies lors du FRT chez des personnes âgées chuteuses ou ayant peur de tomber.

## Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

## References

- [1] Duncan PW, Weiner DK, Chandler J, Studenski S. Functional reach: a new clinical measure of balance. *J Gerontol* 1990;45:M192–7.
- [2] Hageman PA, Leibowitz JM, Blanke D. Age and gender effects on postural control measures. *Arch Phys Med Rehabil* 1995;76:961–5.
- [3] Duncan PW, Studenski S, Chandler J, Prescott B. Functional reach: predictive validity in a sample of elderly male veterans. *J Gerontol* 1992;47:M93–8.
- [4] Jonsson E, Henriksson M, Hirschfeld H. Does the functional reach test reflect stability limits in elderly people? *J Rehabil Med* 2003;35:26–30.
- [5] Lin M-R, Hwang H-F, Hu M-H, Wu H-DI, Wang Y-W, Huang F-C. Psychometric comparisons of the timed up and go, one-leg stand, functional reach, and Tinetti balance measures in community-dwelling older people. *J Am Geriatr Soc* 2004;52:1343–8.
- [6] Okumiya K, Matsubayashi K, Wada T, Kimura S, Doi Y, Ozawa T. Effects of exercise on neurobehavioral function in community-dwelling older people more than 75 years of age. *J Am Geriatr Soc* 1996;44:569–72.
- [7] Weiner DK, Bongiorno DR, Studenski SA, Duncan PW, Kochersberger GG. Does functional reach improve with rehabilitation? *Arch Phys Med Rehabil* 1993;74:796–800.
- [8] Horak FB, Nashner LM. Central programming of postural movements: adaptation to altered support surface configurations. *J Neurophysiol* 1986;55:1369–81.
- [9] Horak FB, Shupert CL, Mirka A. Components of postural dyscontrol in the elderly: a review. *Neurobiol Aging* 1989;10:727–38.
- [10] Takasaki K, Tanino Y, Yoneda H, Suzuki T, Watanabe M, Kono K. Comparison of motion strategies in the Functional Reach Test between elderly persons and young persons. *J Phys Ther Sci* 2011;23:773–6.
- [11] Wernick-Robinson M, Krebs DE, Giorgetti MM. Functional reach: does it really measure dynamic balance? *Arch Phys Med Rehabil* 1999;80:262–9.
- [12] Ward JH. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J Am Stat Assoc* 1963;58:236–44.
- [13] Giorgetti MM, Harris BA, Jette A. Reliability of clinical balance outcome measures in the elderly. *Physiother Res Int* 1998;3:274–83.
- [14] Kemoun G, Watelain E, Defebvre L, Guieu JD, Destee A. Postural strategies and falls in elderly and in parkinsonism [French]. *Ann Readapt Med Phys* 2002;45:485–92.
- [15] Kozak K, Ashton-Miller JA, Alexander NB. The effect of age and movement speed on maximum forward reach from an elevated surface: a study in healthy women. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 2003;18:190–6.
- [16] Cavanaugh JT, Shinberg M, Ray L, Shipp KM, Kuchibhatla M, Schenkman M. Kinematic characterization of standing reach: comparison of younger vs. older subjects. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 1999;14:271–9.
- [17] Aufaivre V, Kemoun G, Carette P, Bergeal E. Home postural evaluation in the elderly: comparison between fallers and non-fallers [French]. *Ann Readapt Med Phys* 2005;48:165–71.
- [18] Bestaven E, Petit J, Robert B, Dehail P. Center of pressure path during Sit-to-Walk tasks in young and elderly humans. *Ann Phys Rehab Med* 2013;56:644–51.
- [19] Nashner LM, Wollacott M, Tuma G. Organization of rapid responses to postural and locomotor-like perturbations of standing man. *Exp Brain Res* 1979;36:463–76.
- [20] Park S, Ko YM, Park JW. The correlation between dynamic balance measures and stance sub-phase COP displacement time in older adults during obstacle crossing. *J Phys Ther Sci* 2013;25:1193–6.
- [21] Uemura K, Yamada M, Nagai K, Shinya M, Ichihashi N. Effect of dual-tasking on the center of pressure trajectory at gait initiation in elderly fallers and non-fallers. *Aging Clin Exp Res* 2012;24:152–6.