Hôpitaux de Toulouse

ToNIC Toulouse NeuroImaging Center UMR1214 iDream Team

UNIVERSITÉ TOULOUSE III PAUL SABATIER

DES de Médecine Physique et Réadaptation
Module 3 - Motricité

Intérêts et limites de l'évaluation instrumentale de la stabilité posturale: stabilométrie

Dr David GASQ
Service des Explorations Fonctionnelles Physiologiques
CHU Toulouse - Rangueil

Toulouse, le 09/02/2022 – 1h

Objectifs d'apprentissage

1. Comprendre le concept de stabilité posturale sur le plan biomécanique.
2. Connaitre le principe de la stabilométrie.
3. Connaitre les différents facteurs de l'évaluation stabilométrique à standardiser.
4. Connaitre les différentes conditions d'évaluation stabilométriques et leur impact sur le déroulement de l'examen et son interprétation.
5. Comprendre l'intérêt potentiel des manipulations sensorielles lors d'une évaluation stabilométrique.
6. Savoir réaliser une interprétation standardisée d'une évaluation stabilométrique de la stabilité posturale.
7. Connaitre l'intérêt et les principales indications de l'évaluation stabilométrique.
8. Connaitre les principales limites métrologiques de l'évaluation stabilométrique.

2

Déroulé de l'exposé

1. La stabilométrie ?
2. Conditions d'évaluation
3. Interprétation d'une évaluation stabilométrique
4. Éléments de métrologie

3

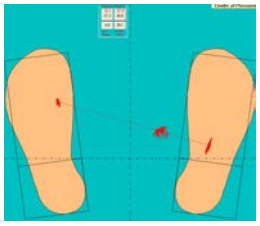
Notions d'effet plancher et plafond

4

Place de l'évaluation stabilométrique

- Effet plafond (+/- plancher) des échelles cliniques d'évaluation de la stabilité posturale
  - Score PASS, Berg Balance Scale

  Visser et al. 2008; Nardone & Schieppati 2010; Sawacha et al. 2013
- Effet plancher de l'évaluation stabilométrique
  - Position orthostatique sans aide technique > 30s



Évaluation clinique

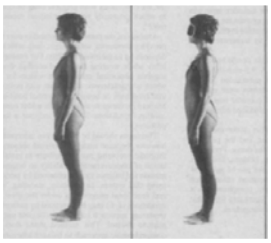
Évaluation stabilométrique

Amélioration de la stabilité posturale

5

Stabilité ou équilibre ?

F = m x G



Situation statique : immobilité du sujet ?

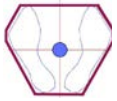
?

=

6

Concept de stabilité

- **Être stable** = ne pas chuter
- **Stabilité en situation « quasi-statique »**
  - ✓ Maintenir la projection du centre de masse à l'intérieur du polygone de sustentation



D'après Rougier, 2001

- **Stabilité en situation dynamique** (marche par ex)
  - ✓ Déplacer le polygone de sustentation (déplacements des pieds) afin d'éviter la chute
  - ✓ En situation quasi-statique = déplacement minimal CM / CP pour maintenir une posture (?)

Quantifier la stabilité

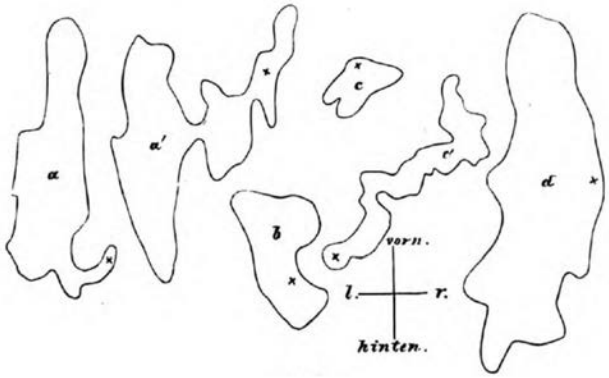


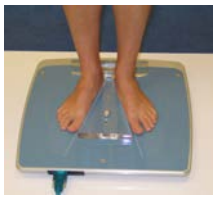
FIGURE 1 – Premières observations quantifiées des oscillations posturales (enveloppe du tracé) par Vierordt (1860) : sujet debout les yeux ouverts (a) et fermés (a') ; position hanchée en appui sur le membre inférieur droit (b) ; position assise yeux ouverts (c) et fermés (c') ; appui monopodal sur le pied droit (d).

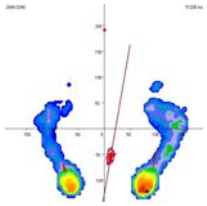
8

Stabilométrie

Plateforme de force pour quantifier l'instabilité

Thomas et Whitney 1959; Kapteyn et al. 1983





9

HAS
HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ

2007

ANALYSE DE LA POSTURE STATIQUE ET/OU DYNAMIQUE SUR PLATE-FORME DE FORCE (POSTUROGRAPHIE)
STATOKINÉSIGRAPHIE INFORMATISÉE

Classement CCAM : 03.01.01.06 – code : CEQP005

Indications :
Le groupe d'experts souligne bien que la posturographie est destinée à quantifier les troubles de l'équilibre. Elle n'est pas une méthode présentant un intérêt pour le diagnostic des pathologies, mais contribue à distinguer les pathologies organiques en cause dans les troubles de l'équilibre. Elle est un outil d'évaluation qui est une aide à la décision thérapeutique, et qui permet le suivi des patients. Ainsi, elle s'inscrit dans une perspective thérapeutique.

Place dans la stratégie thérapeutique :
L'acte statokinésigraphie informatisée vient en complément d'un interrogatoire et d'un examen clinique rigoureux, et en complément des autres tests conventionnels avec scores cliniques quantitatifs. Le groupe insiste bien sur le fait que la posturographie ne sera alors réalisée que si nécessaire face à un trouble avéré, et reste donc réservé à peu de patients.

Sécurité :
Le risque de chute n'est pas nul ; l'examen doit donc être réalisé dans de bonnes conditions et pour les troubles sérieux tel que l'ataxie, un harnais, une sangle de sécurité, voire la présence d'une tierce personne sont conseillés.

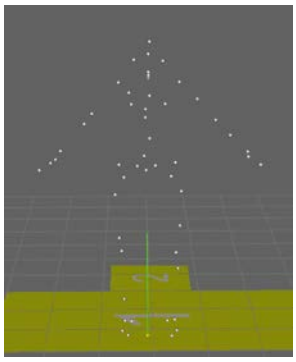
Formation nécessaire :
Soit 3ème cycle de formation initiale médecine physique et réadaptation et ORL ;
soit formation complémentaire acquise avec un DIU spécifique (posturologie clinique).

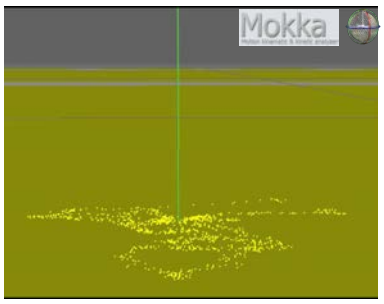
10

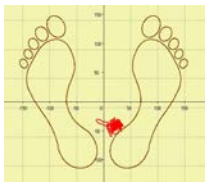
Centre des pressions

Une plateforme de force mesure la force de réaction résultante au cours du temps

- Déplacements du point d'application = **centre des pressions (CP)**
- Intensité : proportionnelle au poids







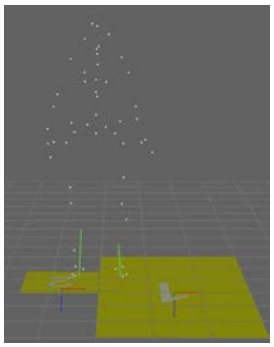
Thomas et Whitney 1959; Kapteyn et al. 1983

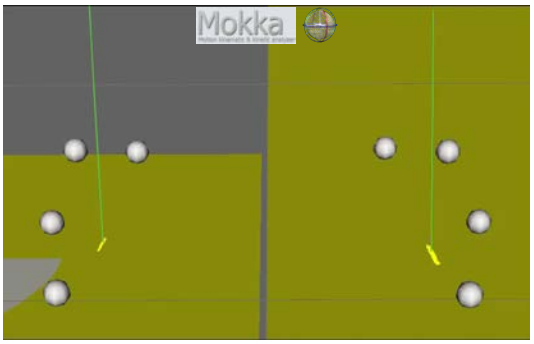
11

Obtention du CPR avec 2 plateformes

Deux plateformes de force (une sous chaque pied)

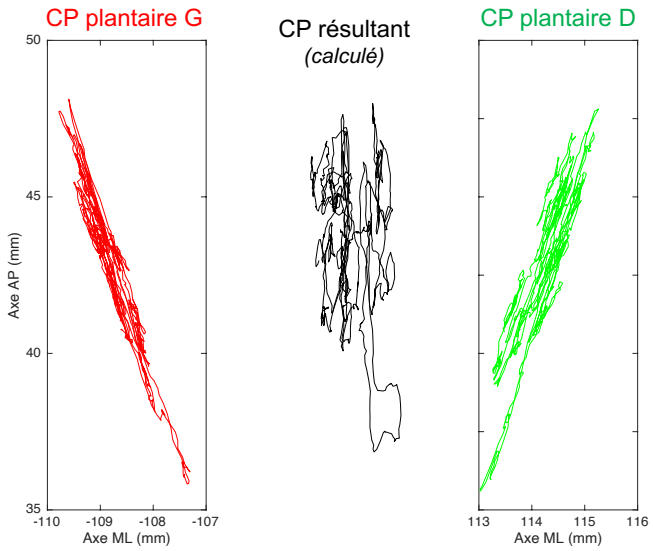
- Déplacements du point d'application de la force sous chaque pied = **centre des pressions plantaires D et G**
- Intensité proportionnelle au poids
- Calcul du CPR = barycentre des CPP





12

Une ouverture vers la physiologie du maintien postural

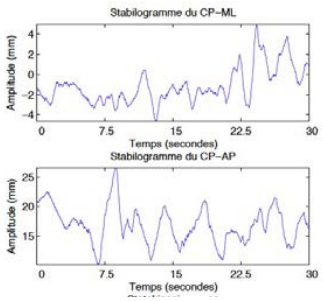


13

Terminologie standardisée

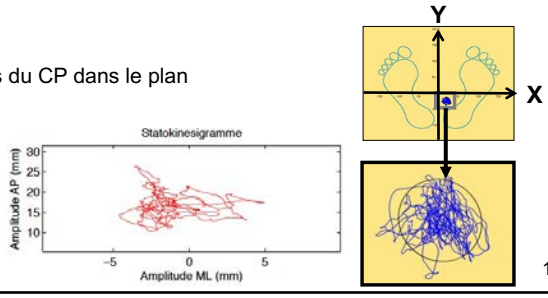
Stabilogrammes ML & AP

➔ Graphes des déplacements du CP selon les axes médio-latéral (ML) et antéro-postérieur (AP)



Statokinésigramme (STK)

➔ Représentation des déplacements du CP dans le plan horizontal XY



14

Positionnement des pieds

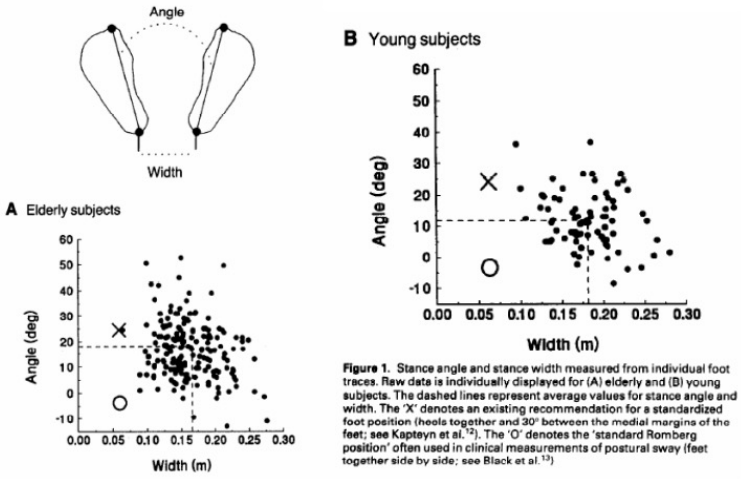
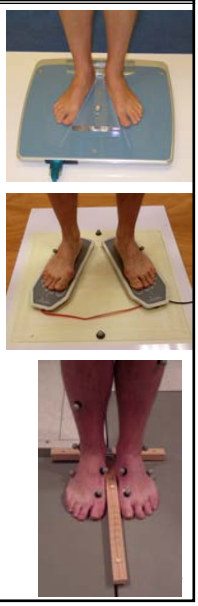


Figure 1. Stance angle and stance width measured from individual foot traces. Raw data is individually displayed for (A) elderly and (B) young subjects. The dashed lines represent average values for stance angle and width. The 'X' denotes an existing recommendation for a standardized foot position (heels together and 30° between the medial margins of the feet; see Kapteyn et al.[12]). The 'O' denotes the 'standard Romberg position' often used in clinical measurements of postural sway (feet together side by side; see Black et al.[13])



McIlroy et Maki Clin Biomech (Bristol, Avon) ***1997****;12(1):66-70*

Environnement standardisé

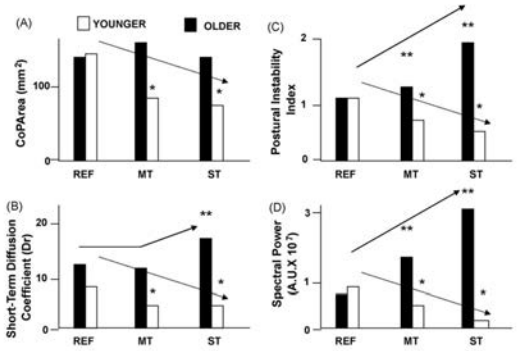
- Environnement sonore et visuel : éviter les distracteurs
  - Éclairage constant
- Influence du rythme circadien *(Kohen-Raz et al. 1996)*

- Fixation d'un repère visuel *(Paulus et al. 1984)*
  - Normalisation de l'effet stabilisateur de la vision
  - Distance de 1 à 3 m
  - Position du rachis cervical en situation YF

- Consigne standardisée *(Zok et al. 2008)*
  - Éviter le surcontrôle postural !!
  - Normes 85 : « Vous mettez les bras le long du corps » puis « Vous allez rester tranquille, détendu, sans bouger, en regardant le fil à plomb (ou en fermant les yeux) et en comptant dans votre tête jusqu'à ce qu'on vous dise que c'est bien fini. C'est bien compris ? » (contrôle de la réponse), puis « Vous n'avez pas besoin d'éternuer, de vous gratter ? On peut y aller ? » (contrôle de la réponse), et enfin « regardez le fil (ou fermez les yeux) ! Commencez à compter ! C'est parti !». L'enregistrement commençait une seconde après.

16

Tâche cognitive et performance posturale



Lacour et al. 2008

Figure 3 A–D. Advantages of the stabilogram-diffusion and wavelet-transform analyses over the traditional-posturographic method. Mean results recorded in two populations of young- and older-healthy subjects standing quietly on a force platform without concurrent cognitive task (REF) and in dual tasking with a mental-arithmetic task (MT) or a spatial-memory task (ST). A. Group mean for the younger (open histograms) and the older (filled histograms) adults for the CoP area parameter (confident ellipse containing 90% of the sampling points: in square millimetres). B. Group means for the short-term diffusion coefficient provided by the stabilogram-diffusion analysis. (C–D). Group means for two parameters elaborated from the wavelet transform – the postural-instability index (C) and the spectral power calculated in the 0.5–1.5 Hz-frequency range (D: expressed in arbitrary units × 10^7). Note the absence of effects of dual tasking on posture control in the older group with the traditional-posturographic analysis, not sensitive enough to detect attentional load-induced effects, whereas the stabilogram-diffusion and the wavelet-transform methods show significant differences. * and ** indicate significant differences ($p < 0.01$) between the postural performance under dual-task situation and the reference for the younger adults and the older adults, respectively. The solid and dashed arrows illustrate the changes in the postural performance examined in the REF, MT and ST conditions in the younger and older groups, respectively. Modified from [6].

17

Comparer deux évaluations

- Conditions nécessaires pour comparer deux évaluations stabilométriques (intra/inter-patient) :
  - Même durée *sf surface (> 20 sec), vitesse du CP, X et Y moyens ?*
  - Même fréquence d'acquisition *sf surface, X et Y moyens*
  - Même position des pieds
  - Mêmes consignes +++
  - Même environnement visuel, sonore, etc…
  - Même condition de vigilance
  - Même matériel idéalement
  - Inter-sujet : effet physiologique de l'âge

18

Comparer le patient à lui-même

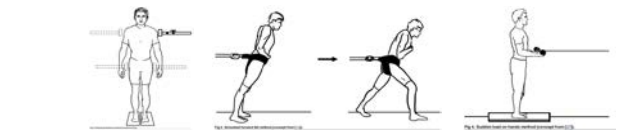
- Intérêt pour juger de l'évolution des performances du contrôle postural :
  - Entre 2 conditions sensorielles (YO/YF, …)
  - Entre 2 dispositifs de correction (orthèses plantaires, prismes, …)
  - Dans le temps :
    - Évolution d'une pathologie
    - Effet d'une thérapie (rééducation, …)
- Mêmes exigences ++++

  ➔ Le seul facteur censé varier (excepté le temps) est celui que l'on teste !!!

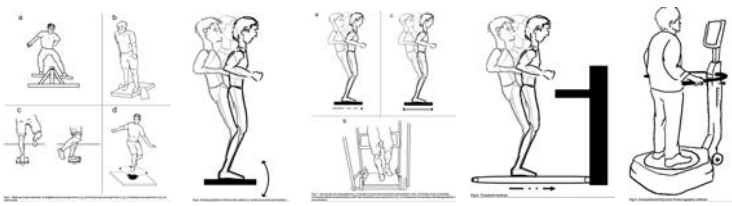
19

Évaluation statique ou dynamique ?

- Évaluation statique (quasi-statique …): support stable et fixe
- Évaluation dynamique
  - Quantification des effets sur le contrôle postural avec centre des pressions, temps de réaction, activations EMG, cinématique 3D, chute, …
  - Notion d'ajustements posturaux anticipés et réactionnels



Petro et al. 2017



20

Intérêt théorique de l'évaluation dynamique

- Plus écologique et proche des situations de vie quotidienne
- Éventuellement, perturbation posturale quantifiée

- Évaluation multimodale
  - EMG et cinématique : ajustements posturaux
  - Stabilité : analyse des déplacements du CP ou CG, chute

- Étude des contributions sensorielles
  - Pertinence en pathologie vestibulaire et neurologique
  - Risque de chute lors du vieillissement ??

Évaluation statique = relativement standardisée
Évaluation dynamique = très hétérogène ➔ Equitest = référence standardisée

21

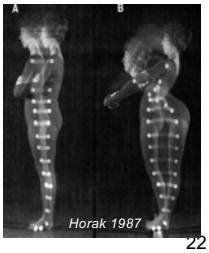
Limites de l'évaluation dynamique

Pourquoi l'évaluation dynamique n'a pas remplacé l'évaluation statique ?

(Visser et al. 2008; Prieto et al. 2017)

- Hétérogénéité des protocoles et paramètres
- Défaut de standardisation excepté l'Equitest
  - Mais système peu accessible

- Effet plancher > condition statique



- Peur de chuter en conditions dynamiques
  - Modification de la stratégie
  - Stratégie de cheville ➔ stratégie de hanche
  - Activations musculaires disto-proximale / proximo-distale

22

Quels paramètres analyser ?

Très / trop nombreux paramètres proposés par les logiciels

Certains ne sont pas validés !

= on ne sait pas si ils mesurent réellement ce qu'on suppose qu'ils mesurent …

Surface (mm²)	1103.8
Longueur XY (mm)	2306.26
Longueur X (mm)	858.7
Longueur Y (mm)	1988.8
X moyen (mm)	13.89
E. type X (mm)	8.23
Y moyen (mm)	-11.52
E. type Y (mm)	9.72
Corrélation	-0.3
LFS	1.97
Vitesse moy (mm/s)	45.34
Var. vit. (mm/s)	33.41
VFY	25
AN02X %	27.11
AN02Y %	8.16
AN03X %	3.12
AN03Y %	12.63
Inclin. moy. (°)	3.65
Inclin. std. (°)	3.01
Déport (°)	0.83
Pente (°)	120.44
X max (mm)	34.71
Y max (mm)	14.83
X min (mm)	-6.88
Y min (mm)	-36.56

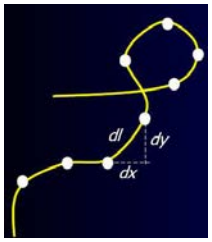
Quels paramètres analyser ?

Deux catégories de paramètres:

1. **Stabilité posturale**
   - Quantification des oscillations posturales du sujet
2. **Symétrie de répartition des appuis**
   - Droite / Gauche
   - Avant / Arrière

Évaluation de la stabilité posturale

- Analyse linéaire du signal
- Paramètres décrivant la tendance centrale



D'après Ouaknine, 2005

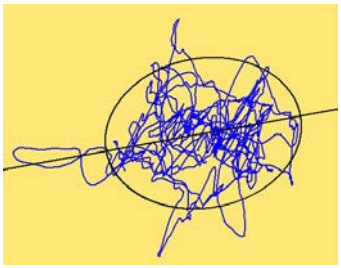
- Longueur en X, Y, XY (mm)
  - Sensible au ratio signal / bruit
  - Dépendante de la durée
- **Vitesse de déplacement du CP selon** XY ($mm.s^{-1}$)
  - Moyenne (Longueur / Temps) ou instantanée
  - Indépendante de la durée
  - Consensuel dans la littérature *(Visser et al. 2008, Ruhe et al. 2010; Scoppa et al. 2013)*

➔ Paramètres dépendant de la fréquence d'échantillonnage

25

Évaluation de la stabilité posturale

- Analyse linéaire du signal
- Paramètres décrivant la dispersion



- Surface de l'ellipse de confiance du STK (mm^2)
  - Contenant 90 ou 95% des points du STK
  - **Mauvais paramètre**
    - Peu valide
    - Peu reproductible
- **Empan** selon X ou Y (mm)
- **Ecart type des positions du CP** selon X, Y ou XY (mm)
  - Souvent exprimé par le **RMS** (*Root Mean Square*)
- **Écart-type ou variance de la vitesse du CP** ($mm.s^{-1}$)

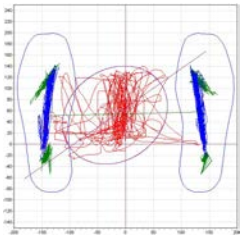
26

Les pièges et finesses de la surface du STK

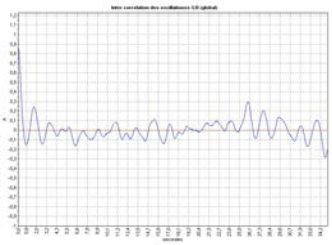
« *Decrease in CoP area can result from a better integration of the multisensory inputs controlling posture and underpin the improvement of posture control. But similar CoP changes can result from an increased-body stiffness associated with fear of falling.* »
Lacour et al. 2008

Une faible surface du STK peut-être liée à :

- Un bon contrôle postural
- Un sujet ayant peur de chuter et se raidissant



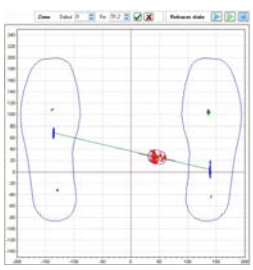
Notion de « méga-surface »

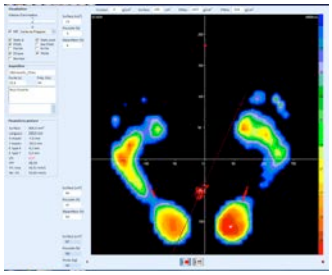


27

Évaluation **directe** de l'asymétrie D/G

- Mesure directe du poids sous chacun des deux pieds
  - 2 plateformes de force
  - Baropodométrie / semelles embarquées
- Indépendant de la position // centre de la plateforme
  - **Pourcentage du poids D et G**

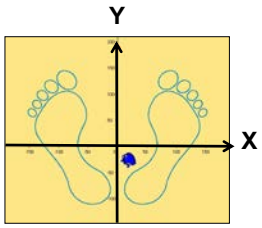




Évaluation **indirecte** asymétrie D/G: X-moyen

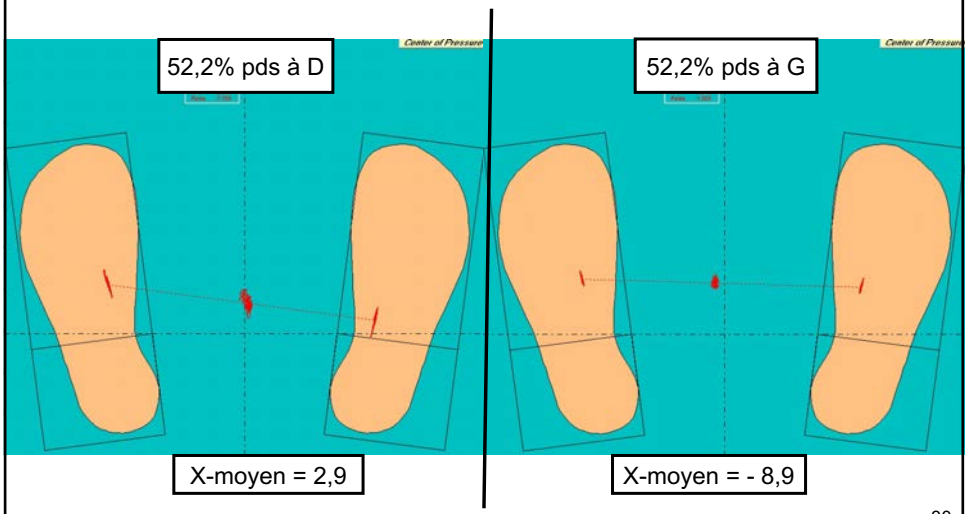
X-moyen (mm) : droite-gauche

- Position moyenne du CP sur l'axe ML
- Deux facteurs :
  - Position des appuis // centre de la plateforme
  - Intensité des appuis D et G



➔ Estimation <u>indirecte</u> de la répartition du poids D/G

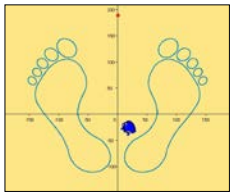
Les pièges du X-moyen

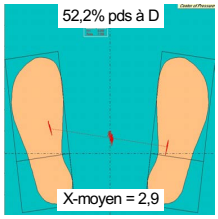


30

Lien entre X-moyen et asymétrie de poids

- Asymétrie de répartition du poids « normale »
  - 3% à 8% *(Normes85, Mansfield et al. 2011)*
- Lien X-moyen et asymétrie de répartition du poids
  - Pour Genthon et al. 2008: position 9 cm d'écart inter-talonnier et angle de 30°
    - 5% asymétrie = 10 mm, soit 1 mm pour 0,5% du poids corporel environ
  - Travaux personnels: position 17cm entre le milieu des talons et angle de 14°
    - 3,3% asymétrie = 10 mm, soit 1 mm pour 0,33% du poids corporel environ
  - Position 3 cm d'écart inter-talonnier avec angle de 30°
    - On peut estimer que 8,5% asymétrie ~ 10 mm, soit 1 mm pour ~0,85% du poids corporel

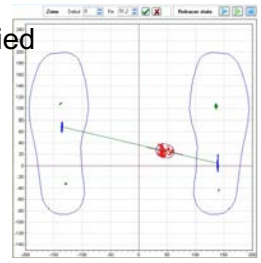


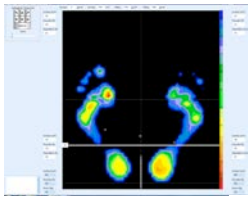


31

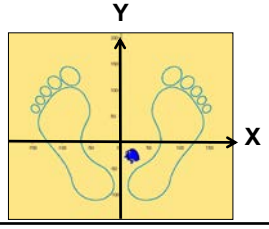
Évaluation asymétrie Avant/Arrière pied

- Mesure directe du poids sous avant et arrière-pied
  - 2 x 2 plateformes de force
  - Baropodométrie / semelles embarquées
  - Pourcentage du poids sous avant et arrière-pied





- Mesure indirecte: Y-moyen (mm)
  - Position moyenne du CP sur l'axe AP
  - Pb de référentiel (où est le zéro?)



Étapes de l'interprétation

1. **Données cliniques concernant le patient**
2. **Conditions de l'évaluation connues (et standardisées)**
3. **Déroulement de l'évaluation connu**
4. **Regarder les graphes (stabilogrammes et statokinésigramme)**

5. Choisir les paramètres stabilométriques d'intérêt
6. Selon la situation :
   - Étude d'un comportement : moyenner les valeurs (ex: 3 essais de 30 secondes)
   - Étude d'une performance : prendre la meilleure valeur (ex: appui monopodal)
7. Comparer les conditions entre-elles / l'évolution au cours du temps

33

Comparaison de 2 conditions

- Comparaison directe des scores avec / sans manipulation sensorielle
  - Marge d'erreur à dépasser
- Ratio entre les deux scores
  - Coefficient de Romberg = (YF / YO) x 100 *(Paulus et al. 1984)*
    - Borné de 0 à l'infini
    - Asymétrique
    - Non proportionnel
  - **Méthode normalisée** *(Olfield 1971 pour coefficient latéralité; Lacour et al. 1997)*
    - Borné entre -100 et + 100
    - Symétrique

$$\frac{\text{Eyes Closed (EC) torque} - \text{Eyes open (EO) torque}}{\text{EC torque} + \text{EO torque}} \times 100$$

- Choix du / des paramètre(s) selon la situation

34

Existe-t-il des normes ?

- Des normes ont été proposées
- Peut-on / doit-on les utiliser ?

Normes 85

	Condition	Moyenne	Ecart-standard Ou ± 1 ES	Limite de confiance à 95%	Remarques
X-moyen (mm)	YO	1,1	5,4	-9,6 / 11,7	
	YF	0,3	5,5	-10,5 / 11,1	
Y-moyen (mm)	YO	-29,2	14,1	-57,0 / -1,5	Y-moyen
	YF	-27,5	12,2	-51,4 / -3,6	Femmes > Hommes
Ecart-standard de la Vitesse [illegible]	YO	10,6	3,7	3,4 / 17,7	
	YF	11,5	3,4	[illegible]	
[illegible]	YO	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
	YF	0,06	2,45	-4,73 / 4,86	
Surface de l'ellipse de Confiance à 90% (mm²)	YO	91	59 – 139	39 / 210	
	YF	225	383 – 132	79 / 638	
Longueur (mm)	YO	429	361 – 508	307 / 599	
	YF	613	136	346 / 880	
[illegible]	YO	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
	YF	1	0,84 – 1,20	0,70 / 1,44	
Quotient de Romberg	YO/YF	288	152	112 / 677	

Non utilisable à 40 Hz

Non utilisable à 40 Hz

35

Exemple d'interprétation

- Patient de 50 ans
- Ataxie cérébelleuse d'origine génétique, d'aggravation progressive
- Bilan initial avant rééducation axée sur la stabilité posturale et la marche

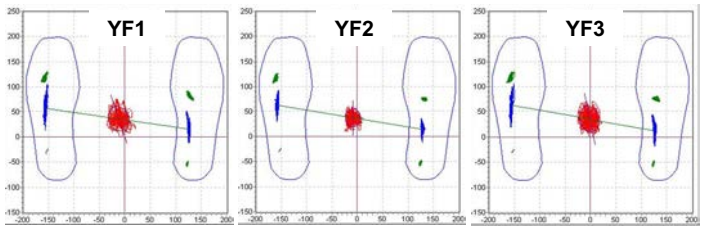
- Demande : évaluation quantifiée du contrôle postural et de l'asymétrie d'appui
  - Visiodépendance posturale ?

- Conditions de l'évaluation
  - Condition « quasi-statique » ➔ pieds-nus, position des pieds 17-14°
  - 3 acquisitions de 30s les YO et les YF (YO-YF-YO-YF-YO-YF) : cible visuelle à 1,5 m
  - Pas de tâche cognitive
  - Consignes standardisées

- Déroulement de l'évaluation
  - Première acquisition YO refaite car le patient a bougé le membre supérieur
  - Repos 2 min entre acquisitions 4 et 5

36

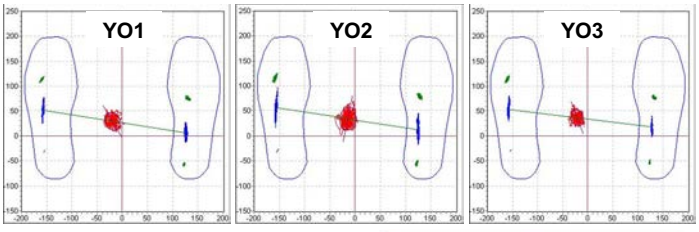
Exemple d'interprétation



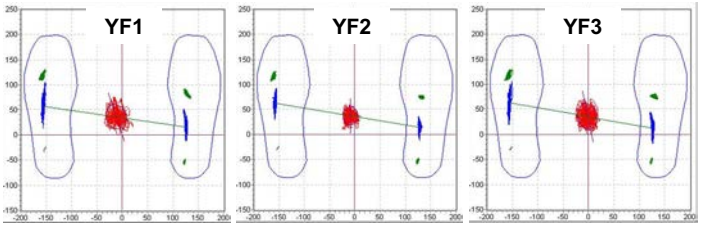
	Yeux ouverts				Yeux fermés			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
% poids côté G	51,2	49,6	52,3	**51 %**	49,6	45,4	46,7	**47,2 %**
% poids côté D	48,8	50,4	47,7	**49 %**	50,4	54,5	53,3	**52,7 %**
% poids avt-pied G	29,3	29,1	30,6	**29,7 %**	29,1	28,1	26,6	**27,9 %**
% poids arr-pied G	21,9	20,5	21,7	**21,4 %**	20,5	17,3	20,1	**19,3 %**
% poids avt-pied D	23,3	25,7	26	**25 %**	25,7	28,2	28,7	**27,5 %**
% poids arr-pied D	25,5	24,7	21,7	**24 %**	24,7	26,3	24,6	**25,2 %**
Vitesse du CP	56,19	70,03	46,61	**57,6 mm.s-1**	70,03	113,94	88,76	**90,9 mm.s-1**

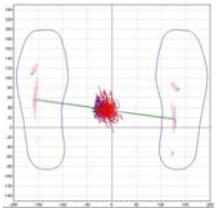
37

Exemple d'interprétation

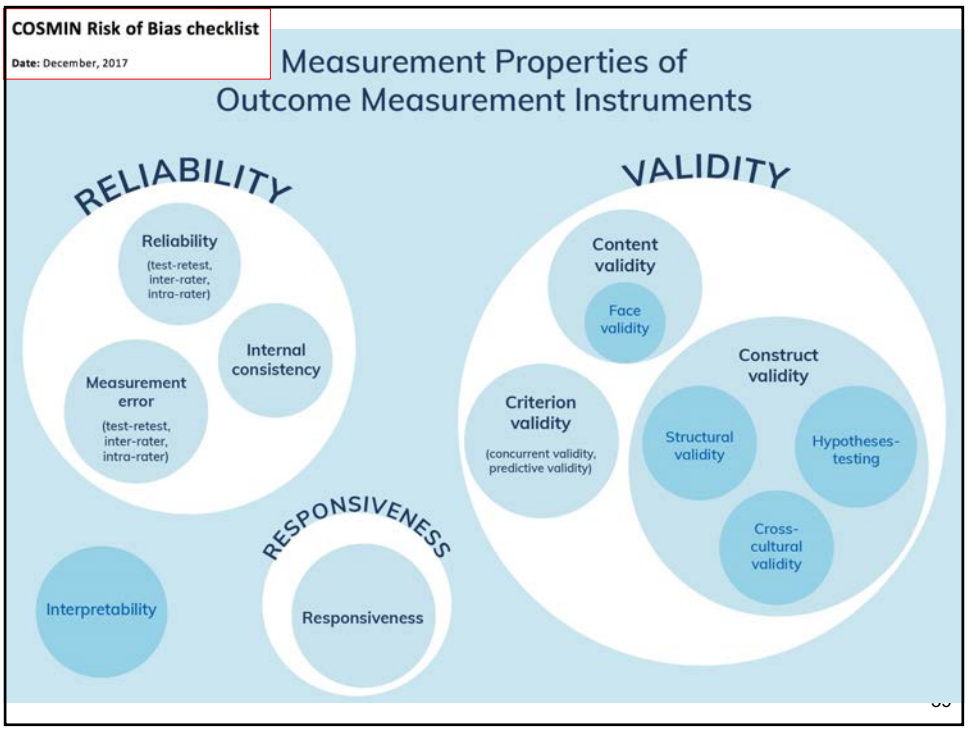


	Visiodépendance posturale	
	Romberg	Ratio normalisé
Vitesse du CP XY	158%	**22**





38



Validité de l'évaluation stabilométrique

- La stabilométrie est un **dispositif d'évaluation**
  - Intérêt de la quantification chiffrée mais effet plancher
  - Suivi d'un patient, comparé à lui-même
  - Sensibilisation du test de Romberg
  - Utiliser 2 plateformes si étude des asymétries
- Valeur prédictive de chutes ?
  - Non démontré
- Très rare intérêt diagnostique
  - Pic fréquentiel spécifique
    - Tremblement orthostatique essentiel
  - Surcontrôle des oscillations posturales

SPECIAL ARTICLE

Practice Parameter: Assessing patients in a neurology practice for risk of falls (an evidence-based review)

Report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology

David J. Thurman, MD, MPH
Judy A. Stevens, PhD
Jay K. Rao, MD, MPH

ABSTRACT

Objective: To develop a practice parameter for screening methods and assessments of risk for falls pertaining to patients likely to be seen in neurology practices.

Methods: Relevant literature was systematically reviewed and strength of evidence classified based on the American Academy of Neurology's criteria (Level A: established; Level B: probable; Level C: possible).

Visser et al. 2008; Ruhe et al. 2010; Scoppa et al. 2013

40

Deux facteurs de variabilité

- **Biologique**
  - Variabilité liée au sujet / variable biologique
- **Expérimentale**
  - L'outil de mesure
    - Propriétés du matériel
  - Conditions de mesure

Connaissance de la marge d'erreur de la mesure
INDISPENSABLE à la comparaison de 2 examens

41

Reproductibilité ?

- ICC
  - Évaluation de la fidélité
  - *Reliability*
- SEM & CV
  - Marge d'erreur au niveau d'une population
- **MDC, MMDC, LOA, SRD (IC 95%)**
  - **Marge d'erreur au niveau individuel**
  - ***Agreement***

42

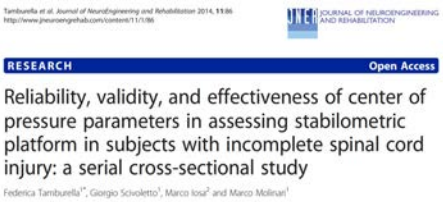
Reproductibilité de l'évaluation stabilométrique

- La reproductibilité est dépendante des conditions de l'examen
  - Consignes, environnement et position des pieds toujours les mêmes !
- Globalement ➔ en appui bipodal et en condition « statique »
  - Bien que les conditions d'examen varient selon les travaux !!!
- Moyenner 3 essais d'une durée de 30 sec
  - Ou une seule acquisition de 90 sec
- Stabilité posturale jugée avec la vitesse du CP
  - *Marge d'erreur ≥ 2 mm/s chez sujet « sain », **plus important en pathologie** (10 mm/s post-AVC)*
- Asymétrie d'appui :
  - Mesurée directement (% poids): *marge d'erreur ≥ 4%*
  - Sinon X-moyen: *marge d'erreur ≥ 10 mm*

Cf. articles de références adaptés à la population étudiée et aux conditions de l'évaluation

Goldie et al. 1989; Lafond et al. 2004; Doyle et al. 2007; Lin et al. 2008; Santos et al. 2008; Visser et al. 2008; Pinsault et al. 2009; Ruhe et al. 2010; Scoppa et al. 2013; Gasq et al. 2014

Sensibilité au changement de la stabilométrie


Tamburella et al. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2014, 11:86
http://www.jneuroengrehab.com/content/11/1/86

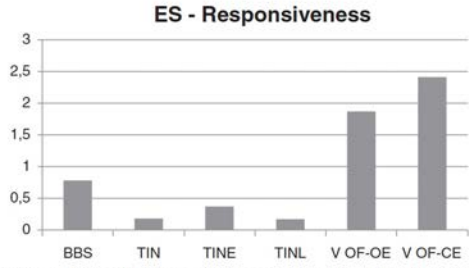
JNER JOURNAL OF NEUROENGINEERING AND REHABILITATION

RESEARCH Open Access

Reliability, validity, and effectiveness of center of pressure parameters in assessing stabilometric platform in subjects with incomplete spinal cord injury: a serial cross-sectional study

Federica Tamburella[1*], Giorgio Scivoletto[1], Marco Iosa[2] and Marco Molinari[1]

- 23 patients blessés médullaires
- Appui bipodal statique YO / YF
- Suivi à multiples reprises durant 1 an: stabilométrie et échelles cliniques
- Évaluation de la sensibilité au changement (taille d'effet)



44