

APPORTS DE L'ANALYSE VECTORIELLE DANS LE DIAGNOSTIC DES DYSFONCTIONS POSTURALES

Usatchev V., Mokhov D.

Institut de Médecine Ostéopathique

de l'Académie Médicale d'Enseignement Post-gradué de Saint-Pétersbourg

Le système postural et l'équilibre stable

L'équilibration du corps de l'homme repose sur les réflexes toniques de posture et de positionnement, découverts au début de XX^e siècle par Magnus, De Klein, Rademaker, De Bourlé, De Gouvé et autres représentants de l'école d'Utrecht (Hollande) (R. Magnus, 1962).

Sur la terre, l'homme vit constamment sous l'influence de la gravité. Les réflexes toniques de posture donnent une certaine rigidité à son corps en limitant plus ou moins les degrés de liberté de ses articulations. En posture orthostatique, la colonne vertébrale est raidie par ses muscles. La mobilité se limite à la coxo-fémorale, au genou, aux articulations de la colonne cervicale, du crâne et aux muscles correspondants. Les réflexes toniques de posture assurent aussi la redistribution du tonus du corps et des membres en fonction de la position de la tête dans l'espace et des réactions du support.

S'il n'y avait pas d'autres réflexes pour maintenir le corps debout, notre corps, rigide, tomberait immédiatement à la manière d'un pendule inversé posé verticalement. Mais cela ne se passe pas ainsi parce que dès que le corps s'écarte de la verticale, fonctionnent les récepteurs de l'appareil vestibulaire et les récepteurs proprioceptifs (essentiellement articulaires). Les impulsions nerveuses venues de l'appareil vestibulaire mettent en mouvement les muscles du tronc et des membres pour restaurer l'équilibre perdu. En outre, l'information de l'appareil vestibulaire et des récepteurs proprioceptifs parvient au cervelet, centre de l'équilibre automatique. Ses réactions réflexes, prioritaires, influencent automatiquement les muscles du tronc et des membres, en corrigeant éventuellement les réactions vestibulaires.

Donc, l'information d'écart du corps par rapport à la verticale est absolument nécessaire à la restauration de l'équilibre perdu. De ce point de vue, chez la personne saine, on peut caractériser la fonction d'équilibre comme une fonction de «stabilisation du déséquilibre» dans certaines limites. Ainsi fonctionne principalement la musculature tonique.

Si le système postural fonctionne mal, une musculature demandant une plus grande dépense d'énergie sera alors amenée à participer. Cette autre tactique de maintien de la posture orthostatique n'est pas économique. Chez le malade, en raison des dysfonctions diverses du système postural assurant la fonction d'équilibre, les mécanismes de son contrôle sont déformés et/ou exécutés en retard, ce qui entraîne le plus souvent une augmentation de l'amplitude des hésitations du corps, mais parfois, par exemple dans la forme spastique de l'infirmité motrice cérébrale, le spasme de la musculature posturale entraîne une réduction des hésitations du corps... Cela laisse deviner la complexité de l'interprétation des données stabilométriques.

La réalisation de la fonction d'équilibre est favorisée par l'information visuelle de l'environnement. Mais les informations proprioceptive et vestibulaire sont plus fondamentales. Nous en voulons pour preuve la date d'apparition des récepteurs vestibulaires et proprioceptifs au cours de la phylogenèse, plus précoce que celle des récepteurs de la rétine. De plus la verticale visuelle subjective s'établit, au cours de l'ontogenèse, sur la base des informations otolithiques. Enfin, l'information proprioceptive venue des tendons des muscles moteurs oculaires est aussi importante pour le système postural que pour la vision,.

Il faut souligner, enfin et particulièrement le rôle des capteurs des soles plantaires. Ce ne sont pas des récepteurs proprioceptifs. Néanmoins, ces récepteurs tactiles superficiels et profonds sentent le plan du support comme s'ils étaient nos «deuxième yeux».

Si, de quelque manière que ce soit, on perturbe la combinaison habituelle des informations visuelle, vestibulaire, proprioceptive et plantaire, à propos de la position du corps dans son environnement, alors apparaissent des perturbations de la régulation du tonus postural.

Stabilométrie en posturologie

À présent, pour évaluer la fonction d'équilibre, on utilise des stabilomètres qui analysent les déplacements du centre de pression des pieds du patient sur la plate-forme de l'appareil (Ranquet, 1953 ; Gagey *et al.*, 1993 ; Sliva, 1995 ; Skvortsov, 2000). Le premier stabilographe enregistrant les oscillations du corps dans les plans frontal et sagittal a été construit par E.B.Babsky, V.S.Gurfinkel, E.L.Romel et J.S.Jakobson en 1951 (Babsky *et al.*, 1955).

Pour souligner l'aspect dynamique des processus d'équilibration, ces auteurs ont présenté leur appareil non comme un moyen d'estimation de la fonction d'équilibre, mais comme un moyen *d'étude de la stabilité de la station d'aplomb*. Il nous semble cependant possible de dire que par la

stabilométrie, il s'agit d'estimer la fonction d'équilibre du corps, à condition de ne pas oublier l'aspect dynamique de ses mécanismes physiologiques.

L'avantage certain de la stabilométrie est son aspect physiologique. Il ne faut pas perturber les mécanismes physiologiques par des stimulations caloriques, optocinétiques, etc., qui ne sont pas naturelles. En posturologie, on peut tout à fait s'en passer.

Nous travaillons avec le stabilomètre informatisé «Stabilan-01», produit par le bureau "Rythme" de l'Université radiotechnique de Taganrog. Nous ne sommes pas de simples utilisateurs de cet appareil, mais au cours de dix années de collaboration avec le laboratoire de stabilométrie du bureau, dirigé par Serge Sliva, nous avons cherché le traitement qui permet d'obtenir rapidement une information exacte, claire et complète sur le système postural, à partir du signal stabilométrique, très simple à première vue mais en fait complexe et fin. En d'autres termes, nous sommes coproducteurs médicaux, avec Serge Sliva, et nous nous occupons de l'élaboration de programmes et de méthodes, médicalement garanties.

A l'institut de médecine ostéopathique notamment, nous sommes arrivés à la conclusion que pour évaluer le système postural, il ne suffit pas de calculer le coefficient de Romberg et le coefficient plantaire. Et nous avons construit un programme pour l'évaluation du système postural, puisque l'utilisateur peut programmer l'appareil.

Dix situations d'enregistrement sont utilisées par ce programme : yeux ouverts et fermés, yeux tournés de 30°, à droite et à gauche, tête tournée de 60°, à droite et à gauche, corps tourné de 30°, à droite et à gauche, en occlusion habituelle, sur tapis mousse. Les enregistrements se suivent l'un l'autre sur commande «Return» de l'opérateur. La durée de chaque enregistrement est de 20 s. La durée totale de l'épreuve est de 3 min. Sur le signal, numérisé par un convertisseur analogique/digital 16 bits, on applique l'analyse vectorielle du statokinésigramme.

Après l'enregistrement, l'information est immédiatement fournie au médecin sous forme d'un compte-rendu imprimé (fig.1 & 2) comportant les graphiques, statokinésigramme et stabilogrammes — frontal et sagittal —, la surface de l'ellipse, la qualité de la fonction d'équilibre exprimée en pourcentage, ainsi que 9 coefficients du système postural:

- coefficient de Romberg, permettant d'estimer le rôle de la vue;
- coefficient plantaire pour estimer le rôle des pieds;
- coefficient temporo-mandibulaire pour le rôle de l'A.T.M.;
- deux coefficients oculomoteurs, de rotation;
- deux coefficients cervicaux, de rotation;
- deux coefficients thoraco-lombaires, de rotation.

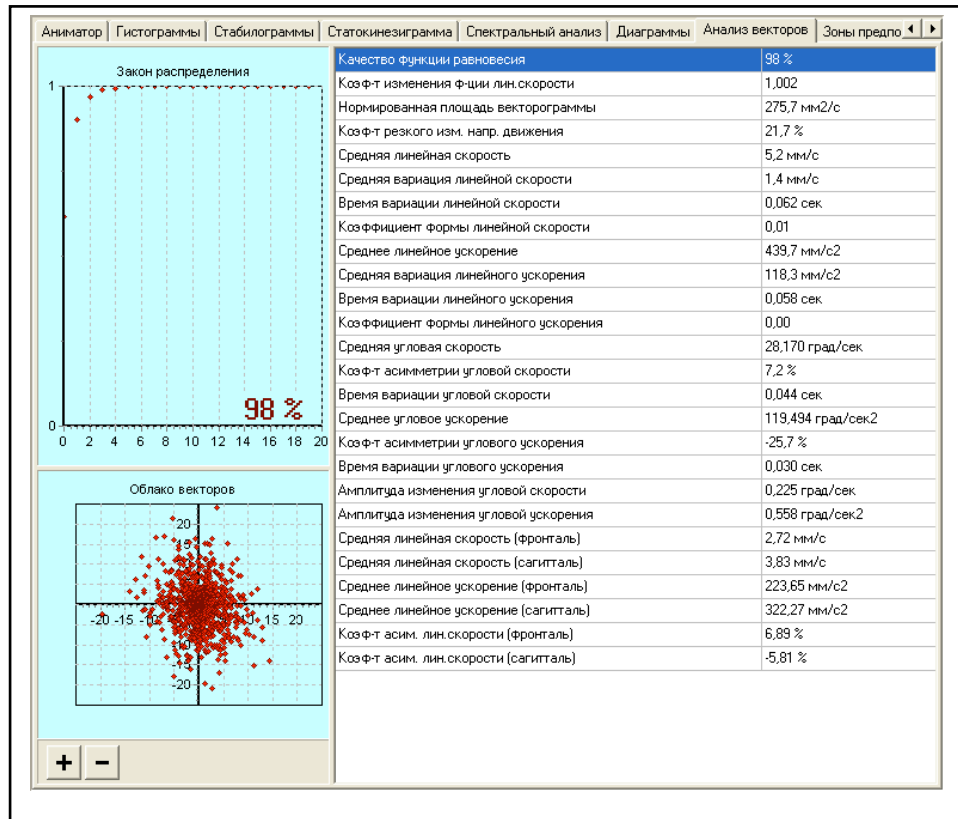


FIG.1 — Fac-similé du compte-rendu d'une enregistrement YO.

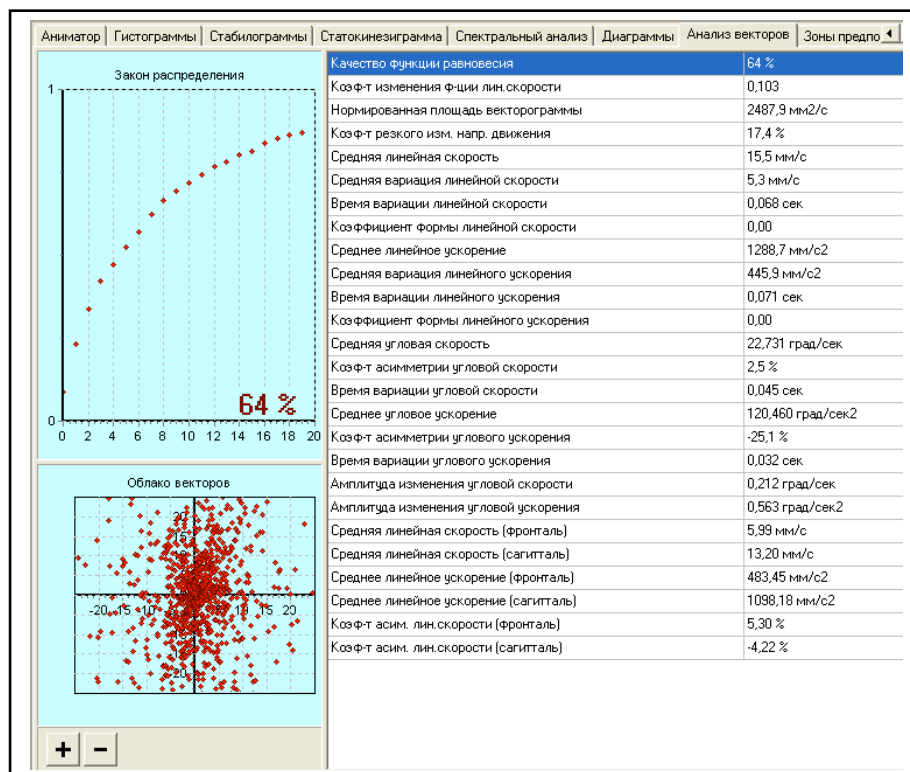


FIG.2 — Fac-similé du compte-rendu d'une enregistrement YF.

Ces trois dernières paires de coefficients reflètent les fonctions proprioceptives des muscles oculomoteurs et du rachis, cervical et thoracolumbaire.

Les coordonnées du centre de pression sont aussi fournies dans ce compte-rendu.

L'analyse vectorielle du statokinésigramme

L'appareil «Stabilan» peut fournir tous les paramètres classiques de stabilométrie, y compris le VFY, ainsi que l'analyse spectrale des stabilogrammes. Qu'est-ce qui nous a donc poussé à chercher un nouveau traitement du signal? D'une part, les paramètres classiques ont une grande dispersion, d'autre part, les médecins interprètent difficilement l'analyse spectrale.

Si on regarde attentivement comment le statokinésigramme se dessine sur l'écran de l'ordinateur («Stabilan» en propose une animation hors enregistrement), on peut se persuader que les déplacements du centre de pression ne sont pas strictement en lignes droites avant/arrière ou droite/gauche, mais en arcs de cercle. Ces arcs peuvent être de pente faible ou forte, parfois ils forment une boucle ou se redressent, pour quelque temps, mais ils redeviennent toujours des courbes.

Pourquoi la nature a-t-elle choisi un tel mécanisme de stabilisation? Sûrement dans un but ergonomique car les groupes de muscles qui participent aux réactions de stabilisation agissent harmonieusement et la personne ne se fatigue pas.

En 1983, Okuzono a proposé d'échantillonner le signal stabilométrique à la fréquence de 8 Hz. Le statokinésigramme apparaît constitué d'une série de vecteurs, de longueur et de direction différentes (fig. 3).

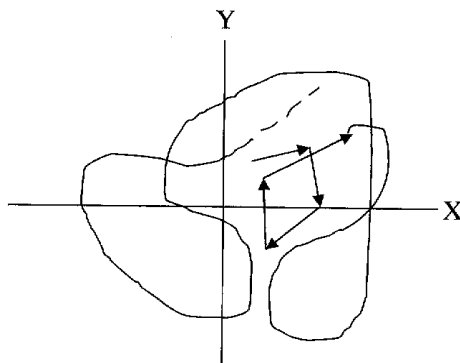


FIG. 3 — Le statokinésigramme et ses vecteurs constituants.

Chaque vecteur indique la direction et la vitesse de chaque déplacement élémentaire du centre de pression. Ensuite Okuzono a proposé de rapporter tous les vecteurs à l'origine du référentiel (fig. 4).

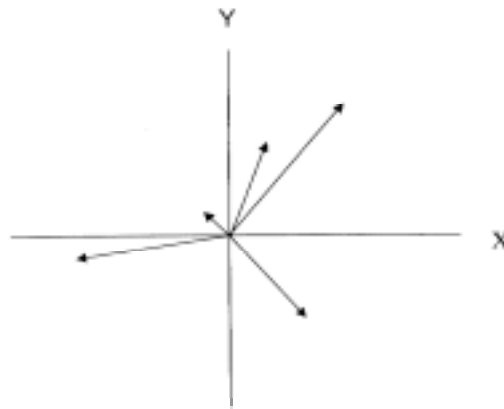


FIG. 4 — Les vecteurs du statokinésigramme rapportés à l'origine.

Puis il a divisé le plan en 16 secteurs et après avoir calculé les moyennes des vecteurs dans chaque secteur, il a tracé un histogramme des directions et des vitesses des vecteurs (fig. 5).

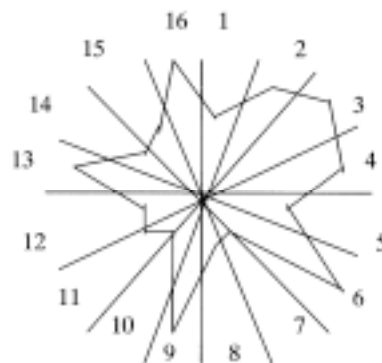


FIG. 5 — Histogramme circulaire des directions et des vitesses des vecteurs.

L'histogramme circulaire des directions permet de juger de l'amplitude et de la vitesse des oscillations dans n'importe quelle direction, puisque ces grandeurs du vecteur sont liées l'une à l'autre pour une fréquence d'échantillonnage donnée. Cependant cette méthode, remarquable, de calcul des moyennes dans chaque secteur ne permet pas de juger des caractéristiques du mouvement du corps de la personne durant le maintien de la posture orthostatique.

Dans nos analyses vectorielles, le signal stabilométrique est échantillonné à la cadence de 50 Hz.

Nous pensons que dans les vecteurs qui forment successivement le statokinésigramme, se cache une information sur les caractéristiques

dynamiques des déplacements du corps dans l'espace et nous proposons de décrypter cette information par deux analyses vectorielles différentes.

Puisque le mouvement est irrégulier, on peut s'intéresser aux changements ; changement de la vitesse et changement de l'accélération des déplacements du corps de la personne. Ainsi, nous proposons de caractériser la distribution des variations de la vitesse par un histogramme de fréquence cumulée des sommets des vecteurs vitesse, ajusté à une fonction exponentielle ; ce que nous nommons : « la loi exponentielle de distribution des vecteurs. »

De plus, l'analyse de la série temporelle des vecteurs successifs du statokinésigramme rapportés à l'origine donne aussi la possibilité de caractériser le système du point de vue de sa dynamique par une valeur chiffrée de l'ensemble des transitions d'un vecteur à son successeur ; ce que nous nommons : « l'analyse de phase des vecteurs », en référence à la logique de l'espace des phases.

A. La loi exponentielle de distribution des vecteurs.

Les sommets de tous les vecteurs rapportés à l'origine sont marqués par des points. Le nuage de points ainsi obtenu est alors divisé en n zones par des cercles concentriques de surfaces égales (fig.6). La surface de la première zone, Z_1 , au centre, doit toujours être constante, elle représente l'unité conventionnelle de surface de zone ; sa valeur optimale, pour notre cadence d'échantillonnage, a été fixée expérimentalement à $3,18 \text{ mm}^2$.

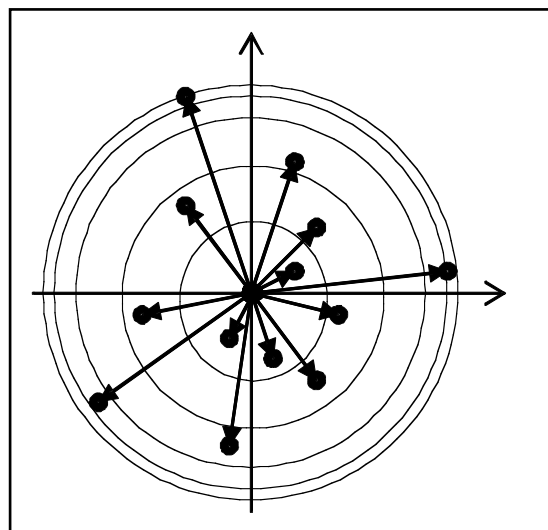


FIG.6 — Division du nuage de points en zones concentriques de surfaces égales

Ensuite, on compte le nombre de sommets de vecteurs qui se trouvent dans chaque zone, Z_i , de rang i , et l'on construit un histogramme de fréquence cumulée, f_k (fg.7), tel que

$$f_k = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} n_i}{N} \times 100$$

Où :

k est le rang du cercle le plus périphérique

N est le nombre total de vecteurs.

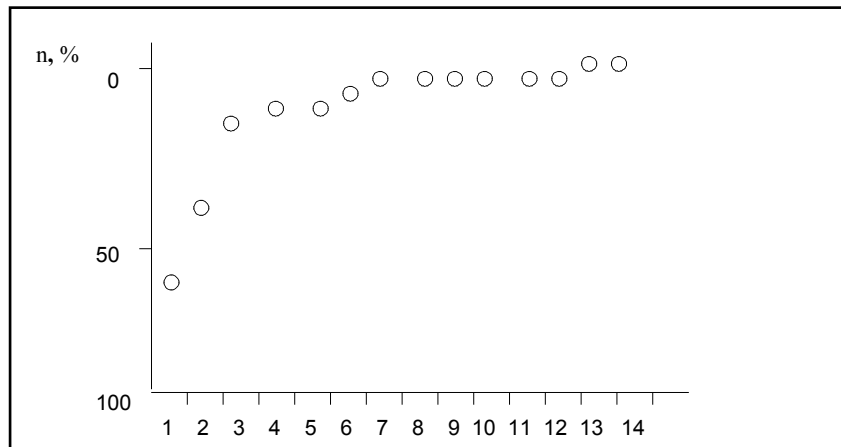


FIG.7 — Histogramme des fréquences cumulées

Les valeurs de cet histogramme de fréquence cumulée sont alors ajustées à une fonction exponentielle (fig.6) de la forme :

$$f(k) = 1 - e^{-\lambda k}$$

qui fournit la valeur de λ , coefficient de dépendance exponentielle ou coefficient de variation de la vitesse linéaire des déplacements du centre de pression, QFLV (Usatchev V.I., 2001).

On trace alors le graphique de la fonction, ou « graphique de dépendance exponentielle de la vitesse des déplacements élémentaires en fonction du rang de la zone » (fig. 8).

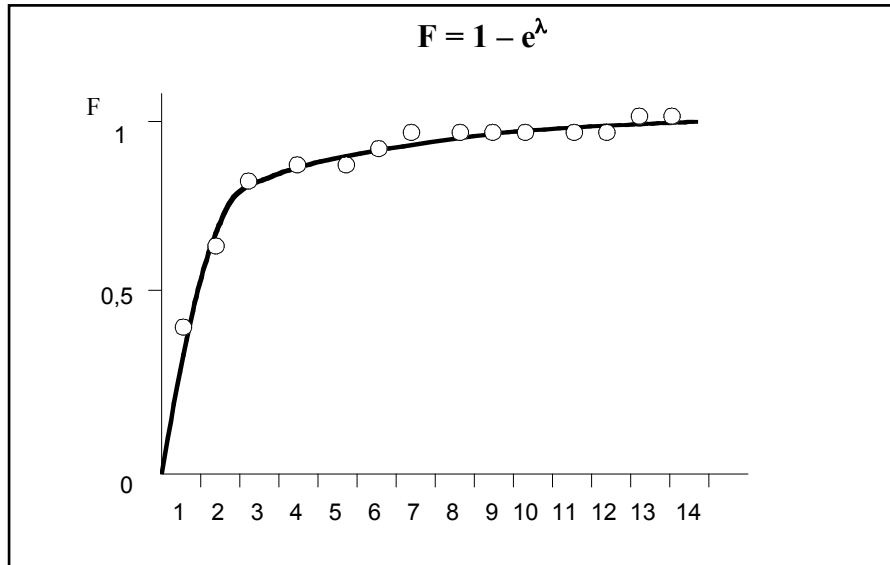


FIG.8 — Graphique de dépendance exponentielle de la densité de distribution des vecteurs.

Plus les sommets des vecteurs rapportés à l'origine se trouvent près de l'origine, plus forte sera la pente de l'exponentielle et meilleur sera l'équilibre du corps. Au contraire, les courbes à pente faible caractérisent un mauvais équilibre du corps.

Pour améliorer la compréhension de la signification du coefficient λ , nous proposons un paramètre de «qualité de la fonction d'équilibre» QFE (fig.9). On calcule ce paramètre par un rapport de surfaces :

$$QFE = (S_1/S_{totale}) \times 100\%$$

Où :

S_1 représente la surface sous la courbe exponentielle $f(k) = 1 - e^{-\lambda k}$

S_{totale} représente surface limitée par les axes du référentiel et l'asymptote, $f(k)=1$.

Ce quotient est exprimé en pourcentage.

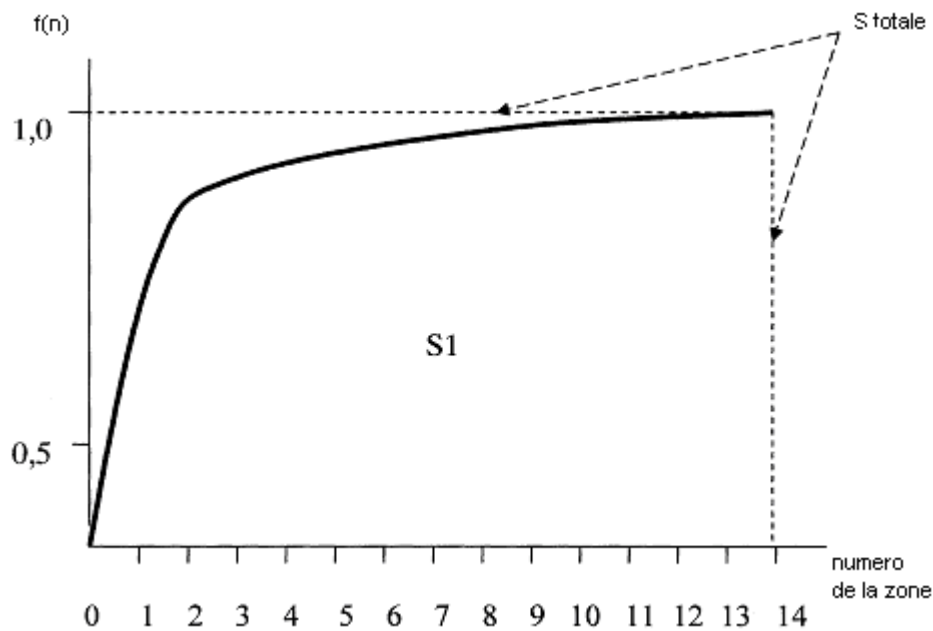


FIG.9 — Paramètre QFE de qualité de la fonction d'équilibre

Plus QFE sera grand, plus la pente de l'exponentielle sera forte, et au contraire plus QFE est petit, plus la pente est faible.

QFE est le paramètre stabilométrique le plus stable. Il est beaucoup moins variable que la surface de l'ellipse du statokinésigramme. QFE caractérise les propriétés individuelles du système postural de chaque individu génétique. Chez les uns il est grand, chez les autres petit. Cela ne reflète pas la qualité de la vie, mais témoigne de l'adaptation des gens à leurs différentes professions, plus ou moins exigeantes à l'égard du système postural (par exemple les ouvriers de gratte-ciels, les pilotes, les cosmonautes etc.)

Chez l'adulte, QFE ne change pratiquement pas avec l'âge. Certes, il est exposé à une certaine fluctuation liée au changement de l'état fonctionnel de l'organisme, mais la gamme de ces changements n'est pas grande. Si la personne tombe malade, se fatigue ou abuse d'alcools ou de drogues, QFE sortira nettement des limites fonctionnelles *individuelles*.

B. L'analyse de phase des vecteurs.

La transition d'un vecteur à son successeur peut être caractérisée par la surface du triangle délimité par les vecteurs eux-mêmes et par la droite qui joint leurs sommets (fig. 10)

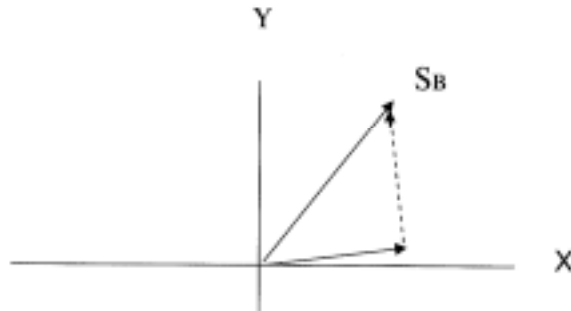


Fig. 10. Triangle de transition entre deux vecteurs successifs

La somme de l'ensemble de ces triangles de transition, divisée par la durée de l'enregistrement fournit le paramètre de « Surface Normalisée du Vectogramme », SNV en mm^2/s .

Comme la valeur de la surface des triangles de transition dépend non seulement de la norme des vecteurs mais aussi de l'angle entre leurs directions. Le paramètre SNV comporte une information sur la variation de direction des vecteurs. Mais cette information est ambiguë. Certes, une grande surface du vectogramme témoigne de changements fréquents de la direction du mouvement à un angle proche de 90° (fig.11, **A**), mais une petite surface peut avoir lieu en deux cas: ou bien c'est un mouvement avantageux du point de vue ergonomique et en ce cas un angle aigu apparaît entre deux vecteurs successifs (fig.11, **C**) ou bien c'est le mouvement d'une personne malade faisant de grands déplacements angulaires qui créent un angle obtus (fig.11, **B**)

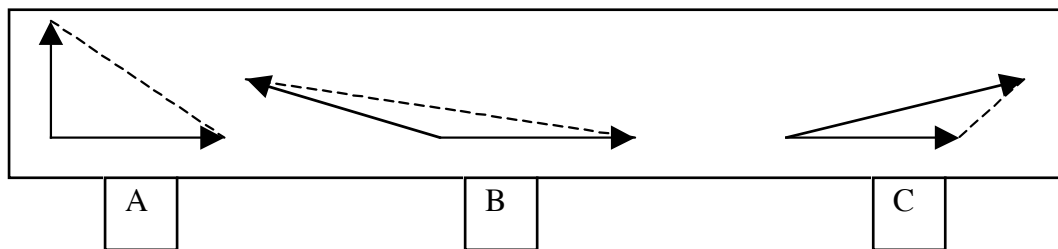


FIG.11 — Ambiguïté du paramètre SNV.

Outre le paramètre SNV, il faut donc encore définir un coefficient — le coefficient des changements brusques de direction du mouvement — QCBM, donné par le pourcentage de paires de vecteurs successifs qui forment un angle supérieur à 45° .

C. Autres paramètres de l'analyse vectorielle

- La vitesse linéaire moyenne, en mm/s ;

- L'amplitude des variations de la vitesse linéaire, en mm/s ;
- La variation moyenne de la vitesse linéaire;
- La période moyenne des variations de la vitesse linéaire, en sec;
- L'accélération linéaire moyenne;
- L'amplitude des variations de l'accélération linéaire, en mm/s² ;
- La variation moyenne de l'accélération linéaire ;
- La période moyenne des variations de l'accélération linéaire, en sec;
- La vitesse angulaire moyenne, en °/s;
- L'amplitude des variations de la vitesse angulaire, en °/s ;
- La variation moyenne de la vitesse angulaire;
- La période moyenne des variations de la vitesse angulaire, en sec;
- Le coefficient d'asymétrie à la vitesse angulaire en %;
- L'accélération angulaire moyenne, en °/s²;
- L'amplitude des variations de l'accélération angulaire, en °/s² ;
- La variation moyenne de l'accélération angulaire;
- La période moyenne des variations de l'accélération angulaire, en sec;
- Le coefficient d'asymétrie de l'accélération angulaire, en %.

Tous ces paramètres de l'analyse vectorielle permettent une présentation complète des caractéristiques des mouvements du centre de pression de la personne en posture orthostatique. Ils sont insérés dans le compte-rendu (fig.1 & 2) complet de l'étude stabilométrique, présentés sous forme de graphiques.

Enfin, à partir de tous ces paramètres, on peut construire des modèles de divers troubles du système postural.

Au lieu d'une conclusion

Il ne faut pas faire de conclusion car il est improbable que l'analyse vectorielle puisse épuiser l'analyse du signal stabilométrique. Et chaque personne qui fait de la stabilométrie doit être non seulement un utilisateur, mais encore un créateur, par ses idées nouvelles !

Bibliographie

Babsky E.B., Gurfinkel V.S., Romel E.L. (1955) Un nouveau moyen d'étude de la stabilité de la position debout. Revue Physiologique d'URSS, **12**, 3: 423-426. (Article russe)

- Magnus R. (1962) *Le positionnement du corps: La recherche expérimentale physiologique*. Traduction russe du texte allemand. M.; L.; Ed. AN URSS: 624. (Article russe)
- Skvortsov D.V. (2000) *Analyse clinique des mouvements. Stabilométrie*. NMF "MBN" (Ed.), Moscou: 188. (Livre russe)
- Sliva S.S. (1995) La stabilométrie informatisée, à l'étranger et en Russie; état de la question et perspectives. *Les nouveaux systèmes informatiques: Recueil scientifique thématique*. N. Novgorod. (Livre russe)
- Usatchev V. (2001) *Un moyen d'estimation qualitative de la fonction d'équilibre*. Brevet d'invention N 2175851. (Texte russe)
- Gagey P.M., Bizzo G., Bonnier L., Gentaz R., Guillaume P., Marucchi C., Villeneuve P. (1993) *Quatrième leçon de posturologie*. Editée par l'Association pour le Développement et l'Application de la Posturologie, 20, rue du rendez-vous, 75012 Paris, Troisième édition.
- Gagey P.M. (1986) Postural disorders among workers on building sites. In Bles W., Brandt Th. (Eds) *Disorders of Posture and Gait*, Elsevier. – Amsterdam: 253-268.
- Okuzono T. (1983) Vector statokinesigram. A new method of analysis of human body sway. *Pract. Otol. Kyoto*, **76**, 10: 2565 - 2580.
- Ranquet J. (1953) *Essai d'objectivation de l'équilibre normal et pathologique*. Thèse Médecine (Paris), 83 pages.