

Les données baropodométriques ; Intégrale force temps, chronologie des maxima de force et de pression.

(Complément aux communications sur baropodométrie dans l'hallux valgus (Sofcot 2007) et dans le syndrome du 2eme rayon (AFCP-Sofcot 2007)

Auteurs : Bruno Ferré *; Michel Maestro**; Thibaut LEEMRIJSE***; Jean-Jacques Rivet
Adresses : * : Centre Orthopédique du Forum, 41 rue Louis Vallière 34300 AGDE ; ** IM2S
11 av d'Ostende MONACO ; *** Clinique Universitaire St Luc BRUXELLES ; ****
Biomécasport CANNES

Nous avons utilisé une plateforme de mesure de force emed-X system (NOVELgmbh
Ismaninger Straße 51, 81675 München, Germany).

La plate-forme enregistre les forces de réactions du sol lors de l'appui du pied. La plate-forme mesure 24 * 40 cm et est composée de 2 capteurs par centimètre carré (*soit 1920 capteurs capacitifs*) qui enregistrent la force 25 fois par seconde, pendant toute la durée de l'appui.

Pour les enregistrements, le malade marche sur la plate-forme plusieurs fois pour chaque pied à vitesse normale. Les données provenant de la plate-forme, sont ensuite traitées par un logiciel qui lui est annexé (Emed-x/R™ software). Outre des images reconstruites à partir des données enregistrées par la plate-forme, le logiciel permet de générer un fichier texte comportant l'ensemble des données numériques de l'examen. Ce sont ces données numériques que nous avons relues et incorporées à notre propre logiciel pour faire notre travail.

Nous avons utilisé une des fonctions du logiciel emed™ qui permet, pour chaque pied, d'individualiser dix zones distinctes : arrière pied, médio pied, les cinq têtes métatarsiennes, le premier orteil, le second et les orteils trois à cinq.

Chaque donnée étudiée peut l'être indépendamment dans chaque zone. Nous verrons lors de l'étude des surfaces, que les cinq zones correspondants aux métatarsiens correspondent à une division en cinq parties de la zone de l'avant pied, en émettant l'hypothèse que les têtes des métatarsiens se projettent bien en regard de ces zones.

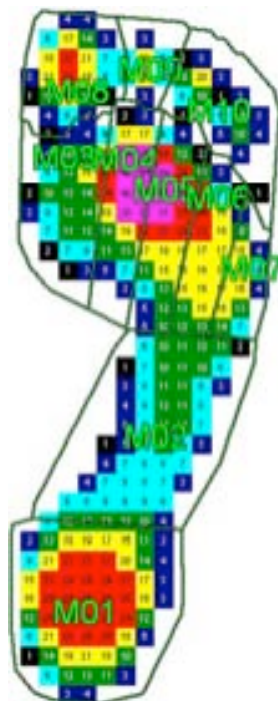


Figure 1 : Les dix zones baropodométriques.

Nous avons ensuite repris l'ensemble des données numériques de la plate-forme afin de les mettre en correspondance avec les données radiographiques, en nous limitant, pour l'instant, au cliché de face.

Nous avons analysé les données :

- D'une manière analytique, statique et statistique, en transférant les données de notre logiciel, dans un tableur Excel™, ce qui nous a permis de voir comment évoluaient les paramètres baropodométriques en fonction de la variation des paramètres radiologiques.
- D'une manière dynamique, dans notre logiciel Keribus-Pied™, en intégrant d'une manière graphique, sur les radiographies, les données « temporelles » des appuis comprenant pour chacune des dix zones d'étude : le moment et l'amplitude du maximum de pression et de force, ce qui permet de construire le diagramme de la progression de ces maxima lors de la phase d'appui du pied.

Parmi toutes les données fournies par la plate-forme nous avons étudié particulièrement :

1) L'intégrale force temps

L'intégrale force temps est l'intégration pour chaque zone de la force transmise à la zone par le temps d'appui selon la formule : intégrale force temps = $\sum F_i * \Delta t$ où

- F_i est la force dans le capteur i avec i allant de 1 à M , qui est le nombre de capteur dans la zone étudiée,
- Δt le temps d'appui de la zone au sol.

Cette grandeur (l'impulsion des physiciens) représente le facteur qui fait varier la quantité de mouvement du pied. Elle représente l'aire sous la courbe de la force. Elle permet, en regardant sa variation selon les zones d'appui, d'apprécier la manière dont le pied propulse l'ensemble du corps.

Ce calcul n'est possible qu'avec l'intégrale force temps car il s'agit d'une intégration de la force sur le temps. Pour chaque pied, nous avons établi le graphique de la répartition de cette intégrale force-temps entre l'arrière, le médio pied, les métatarsiens et les orteils (figure 4) Nous avons également étudié la répartition, en pourcentage des totaux, entre l'intégrale force temps des métatarsiens et des orteils ainsi que la répartition entre les métatarsiens.



Figure 2 : Répartition de l'intégrale force temps.

2) Les maxima de force et de pression.

Pour chacune des dix zones, il existe, pendant le déroulement du pas, deux moments particuliers : celui où la force et celui où la pression passent par leur valeur maximale. Nous avons représenté graphiquement sur une radio, dont la longueur représente la totalité de la phase d'appui, ces deux événements, par une figure géométrique, dont l'aire est proportionnelle à l'intensité relative de la force ou de la pression (figure 5).

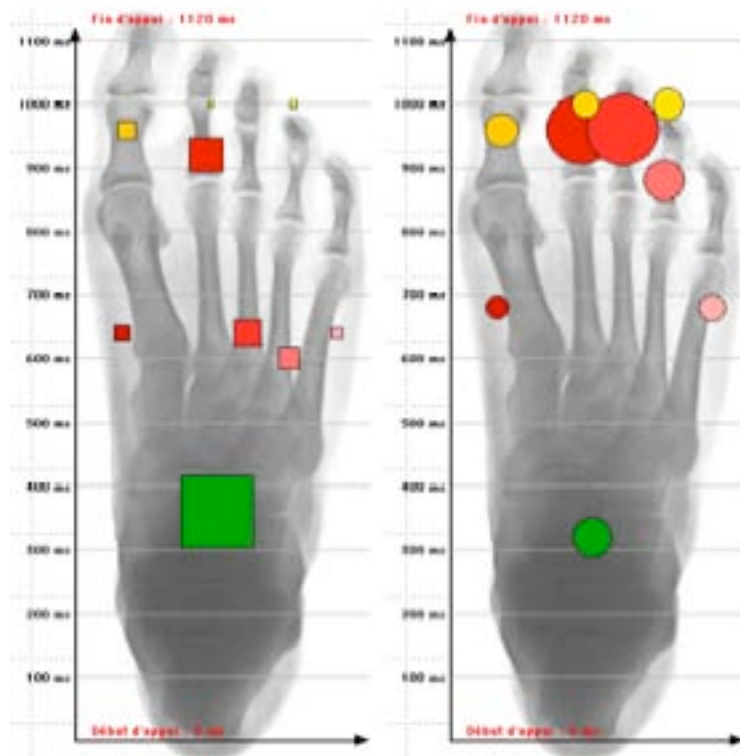


Figure 3 : Chronologie et intensité du maxima des forces et des pressions

Figure 5 : A gauche les forces : L'aire des carrés est proportionnelle à la force maxima (le plus grand carré représente la plus grande force). La force de l'arrière pied est en vert. Celles des métatarsiens est en rouge, la force de chaque rayon étant dessinée à l'aplomb de son métatarsien. Celles des orteils sont en jaune (les orteils 3 4 et 5 sont regroupés et dessinés à l'aplomb du 4e orteil). L'instant où cette force s'applique est retrouvé grâce au graphique des temps qui figure en ordonnée. Sur cet exemple, la phase d'appui a duré 1120 millisecondes, la maxima de l'arrière pied est intervenue entre 300 et 400 ms, celle du MT4 à 600 ms, ceux des MT1 MT3 et MT5 à 640 ms celui du MT2 à 910ms, l'hallux à 950 et les orteils 2 ainsi que le groupe 3 4 et 5 à 1000 ms. A droite la construction est la même avec les pressions qui sont figurées par des cercles.

La comparaison des temps de maxima de force et de pression permet de connaître indirectement l'endroit où à lieu ce maximum à la plante.

Nous avons construit à partir de ces mesures de temps un nouveau schéma illustrant l'ordre dans le quel interviennent ces maxima (figure 6).



Figure 4 : cheminement des maxima des forces et des pressions

Figure 6 : A gauche le cheminement des maxima des forces (en dégradé de bleu) commence à l'arrière pied, puis va au médio pied, avant de diffuser au MT3 et MT1 d'où il converge vers le MT2, avant d'aller à l'hallux puis au 2eme orteil avant de se terminer aux orteils latéraux. L'interprétation, en suivant le cheminement des flèches est la même pour les pressions en dégradé de rouge.



Figure 5 : superpositions du cheminement des forces et des pressions.

Annexes :

Fondements théoriques (*physiques*) de l'étude.

Cette étude est basée sur l'observation d'un seul élément : la force transmise à la plante du pied (par l'intermédiaire de la réaction du sol), et de sa conséquence : la mise en mouvement de l'individu et/ou la déformation des éléments qui le constituent.

La simplicité de cet énoncé n'est qu'apparente. La complexité du problème, et la richesse des enseignements que son étude nous apporte, ne se révèle qu'à la lumière des principes de physique théorique. La biomécanique, dont celle du pied, est entièrement assujettie à ces principes.

Nous rappellerons ces théories^[i] en précisant que notre étude se fait à basse vitesse (*par rapport à la vitesse de la lumière*) et pour des corps suffisamment volumineux pour que les lois de la mécanique quantique ne s'appliquent pas.

Le principe de causalité

Dans exactement les mêmes conditions, les mêmes causes conduisent toujours aux mêmes effets.

Autrement dit, si certaines conditions initiales sont parfaitement connues, le phénomène se déroulera de façon déterminée, toujours la même.

Le principe de conservation de l'énergie

L'énergie interne, ou la masse, de tout système isolé et inertiel ne varie pas en fonction du temps s'il n'y a pas apport ou retrait d'énergie (ou de masse) ou de chaleur de l'extérieur de ce système.

Le principe de Noether

Les lois physiques sont indépendantes de la position de l'observateur. Cela implique qu'elles ne varient pas après leur avoir appliqué une rotation et/ou une translation. Ce résultat établi en 1915 par Emmy Noether, fut qualifié par Albert Einstein de "monument de la pensée mathématique". C'est maintenant un des piliers de la physique théorique.

Coordonnées généralisées

Un référentiel, est dit "Galiléen" si nous pouvons le considérer comme immobile pendant toute l'étude du mouvement du système. Pour toute notre étude, nous considérerons que le repère est extérieur au patient et que l'observateur est fixe par rapport à ce repère.

Le principe de moindre action de Maupertuis

Tout système semble évoluer d'un état à un autre en utilisant toujours les moyens les plus simples et en conservant une grandeur constante entre les deux états.

Toutes nos connaissances de l'Univers se résument au théorème de Noether et au principe de moindre action.

Les lois de Newton

a) Première loi

Tout corps ponctuel ou étendu persévère dans sa forme ou son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, sauf si des "forces imprimées" le contraignent d'en changer.

b) Deuxième loi

Le changement de mouvement est proportionnel à la "force motrice imprimée", et s'effectue suivant la droite (la direction) par laquelle cette force est imprimée.

Newton pose qu'un corps en mouvement "transporte une certaine quantité", appelée : la "quantité de mouvement". C'est en fait cette quantité qui, est contenue dans l'énoncé de la seconde loi. La quantité d'un mouvement est la mesure que nous tirons à la fois de sa vitesse et de sa quantité de matière, autrement dit, par définition, le produit de sa masse par sa vitesse.

Si une force est appliquée à la masse pendant un temps déterminé, sa vitesse va augmenter et par voie de conséquence sa quantité de mouvement. L'intégration de cette force sur le temps (l'intégrale force temps) peut être mesurée sur nos plates formes de marche.

c) Troisième loi

La réaction d'un corps est toujours de sens opposé et d'intensité et de direction égale à la force imprimée.

Nous pouvons également dire: deux corps en contact exercent l'un sur l'autre des forces opposées en sens mais égales en intensité et en direction.

Caractéristiques d'une force

Les expressions des valeurs de l'énergie ou de la masse sont des scalaires. Le chiffre qui les quantifie est signifiant en lui-même : cent joules ou quinze kilogrammes définissent complètement la valeur de l'énergie ou de la masse.

La force est un vecteur :

Le fait de lui donner une valeur sous-entend implicitement que l'on connaît sa direction, et son point d'application. La vitesse et l'accélération sont aussi des vecteurs puisqu'ils ont, comme la force, outre une grandeur, un point d'application et une direction. Le temps est la quatrième grandeur qui caractérise la force (quand est-elle appliquée et pendant combien de temps)

[i] FEYNMAN R, LEIGHTON R, MATTHEW S, Le cours de physique de Feynman mécanique 1, Dunod ed, ISBN 2 10 004504 0