

Évolution/Evolution

## Analyse Procuste du cyclogramme de la cheville : comparaison de différentes spécialités de sprint

Leslie Decker<sup>a,b,\*</sup>, Sabine Renous<sup>a</sup>, Christine Berge<sup>a</sup>, Xavier Penin<sup>c</sup>

<sup>a</sup> FRE 26 96, CNRS, « Anatomie comparée », Museum national d'histoire naturelle, 57, rue Cuvier, BP 55, 75231 Paris, France

<sup>b</sup> Laboratoire « Mouvement, Action, Performance »,  
institut national du sport et de l'éducation physique, 11, avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

<sup>c</sup> Département d'orthodontie, faculté de chirurgie dentaire, université René-Descartes (Paris-5),  
1, rue Maurice-Arnoux, 92120 Montrouge, France

Reçu le 30 novembre 2004 ; accepté après révision le 22 novembre 2005

Disponible sur internet le 20 mars 2006

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

### Résumé

Le but de l'étude est l'analyse quantitative des changements de conformation des cyclogrammes de la cheville en fonction de la spécialisation des sprinters (courtes ou longues distances). Le protocole expérimental consiste à réaliser quatre séquences de course de 80 m à vitesse maximale. La superposition Procuste de 40 cyclogrammes (quatre par individu) a été complétée par des procédures statistiques (analyse en composantes principales, régression linéaire multivariée), afin de rechercher les variables cinématiques susceptibles d'exprimer l'effet de la spécialisation. Les résultats révèlent un changement de conformation du cyclogramme selon un continuum, allant des sprinters de 60 m aux sprinters de 100 m, 200 m, et 400 m. Plus les sprinters sont spécialisés sur de courtes distances, plus leurs cyclogrammes présentent une conformation fusiforme, et ceci indépendamment de leur vitesse durant l'expérimentation. Les résultats suggèrent que l'entraînement (visant à l'efficacité de la foulée) joue un rôle essentiel dans l'acquisition d'une coordination spécifique en réponse aux exigences de chaque spécialité de sprint. **Pour citer cet article:** L. Decker et al., C. R. Palevol 5 (2006).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Procrustes analysis of ankle cyclogram: comparison of different sprint specializations.** The aim of this study is to provide a quantitative analysis of shape changes of ankle cyclograms according to the specialization of sprinters (short or long distances). The experimental protocol consists of four sequences of 80-m sprints at maximal speed. The Procrustes superimposition of 40 cyclograms (four per individual) was completed by statistical procedures (principal component analysis, multivariate linear regression) to seek the kinematic variables likely to express the specialization effect. The results reveal a shape change of the cyclogram according to a continuum, from 60-m sprinters to 100-m, 200-m, and 400-m sprinters. The more the sprinter is specialized in short-distance running, the more spindle-shaped the cyclogram, irrespective of their velocity during the experiment. The results suggest that training (aimed at the effectiveness of the stride) played an essential role in the acquisition of specific coordination in order to meet effectively the requirements of each sprint speciality. **To cite this article:** L. Decker et al., C. R. Palevol 5 (2006).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

\* Corresponding author.

Adresses e-mail : [decker@mnhn.fr](mailto:decker@mnhn.fr) (L. Decker), [renous@mnhn.fr](mailto:renous@mnhn.fr) (S. Renous), [berge@mnhn.fr](mailto:berge@mnhn.fr) (C. Berge), [penin@mail.cpod.fr](mailto:penin@mail.cpod.fr) (X. Penin).

*Mots clés* : Bipédie ; *Homo sapiens* ; Sprint ; Cinématique ; Cyclogramme de la cheville ; Superposition Procruste ; Régression multivariée

*Keywords*: Bipedalism; *Homo sapiens*; Sprint; Kinematics; Ankle cyclogram; Procrustes superimposition; Multivariate regression

## Abridged English version

### Introduction

Marey and Demeny [9,21] were among the first to study the lower limb movement relative to the hip joint, considered as a fixed point, during the human walking or running cycle ('geometric chronophotography').

Later, the relative ankle movement (called 'cyclogram') was applied to different types of animal and human locomotion, providing a clear representation for evaluating continuous cyclical movement patterns [2,6,12,22,33,37–39]. Classically, the running cycle is divided into equal time intervals, so that cyclogram landmarks correspond to distinct moments of the cycle from one runner to another. Thus, Yokoi et al. [41] localized specific spatiotemporal landmarks along the cyclograms in order to determine kinematic differences dependent on the stature of sprinters. These studies make it possible to quantify the variability for each cyclogram landmark, but do not assess the variability of the cyclogram as a whole.

Procrustes analysis uses 'homologous' spatiotemporal landmarks (here, termed 'isodynamic' landmarks) to represent all the ankle cyclograms collectively, by removing information about size, position and orientation. Multivariate statistical procedures aim to quantify cyclogram shape changes according to the specialization of sprinters (60 m, 100 m, 200 m, 400 m).

### Subjects

The study was carried out on highly skilled male runners: five specialists in the short distances (60 m to 100 m) and five specialists in the longer distances (200 m to 400 m). Subjects had an average age of 24 (SD 3.7) years, height of 178.5 (SD 4.6) cm, lower limb length of 103.6 (SD 3.1) cm and body mass of 76.6 (SD 8.4) kg.

### Experimental protocol

Each sprinter performed four sequences of running at maximal speed with active and complete recovery of 8 min between each try. Runners were videotaped using a high-speed camera (at 250 frames per second) in lateral view over a distance of 10 m between the 40- and

50-m marks of an 80-m race. The 10-m stretch was marked by transmission radio cells in order to record the runners' mean velocity over this distance during each running sequence.

### Processing method

Skin markers on the great trochanter and external malleolus [42] of the right lower limb were digitalized at 14 key events of the running cycle, which are identical and identifiable in all sprinters, whatever their speciality and their morphology. Thus, we obtained fourteen equivalent spatiotemporal landmarks for all cyclograms (Fig. 1, Table 1).

Procrustes superimposition of cyclograms comprises three steps: translation, normalization, and rotation [3,4,15,17,20,25,26,29,30,34,35]. The superimposition algorithm used is the generalized least square (GLS), which translates and rotates normalized cyclograms for an optimal fitting according to the least-square criterion. The superimposition computes the mean shape of the cyclograms, referred to as the 'consensus'. Each cyclogram is defined by its 'Procrustes residuals'. Residuals correspond to the differences between the coordinates of the cyclogram after superimposition with the equivalent coordinates of consensus.

A principal components analysis (PCA) is performed from the variance-covariance matrix of Procrustes residuals [27]. We used a multivariate linear regression in which the dependent variables are the principal component (PC) scores, and the independent (explanatory) variable is the sprint speciality (G1: 60 m, G2: 100 m, G3: 200 m, G4: 400 m). The coefficient of determination ( $R^2$ ) of the multiple regression is used for the calculation of the Fisher test, giving the level of significance of the regression [4,23]. The solution of the regression equation gives the  $b$  coefficients used to calculate the linear combination of PC as follows:  $V = (b_1 \times PC_1 + b_2 \times PC_2 + \dots + b_j \times PC_j)$  where  $V$  is the shape vector expressing shape changes of the cyclogram according to the sprint speciality [17,25,29,31].

A one-way ANOVA (Bonferroni adjustment) was carried out on the cyclogram scores on the  $V$  vector in order to ensure the validity of groups. The factor is the sprint speciality (G2, G3, G4); G1 was not included in the analysis because of the small sample size.

Procrustes superimposition, graphs, and statistical tests were carried out with APS software [28].

## Results

The 40 cyclograms were projected onto the plane of the first two principal components (50.3% and 11.2% of total variance, respectively) (Fig. 2). The remaining 38.5% comprised only a small percentage of the information related to the sprint speciality (see below  $V$  vector). PC1 separates the four groups with a partial overlapping of the clouds between G2-G3 and G3-G4. PC2 sets G2 apart from G3 (Fig. 2). Multivariate regression calculated with the first two PC was significant (the contribution of the following PC being almost nil):  $R^2 = 0.77$ ;  $F = 79.22$ ;  $p < 10^{-6}$ . The equation of the  $V$  shape vector is as follows:  $V = 0.93 \times PC1 + 0.37 \times PC2$ . Mean scores on the  $V$  vector of cyclograms for each of the four groups provided the four sprint specialization patterns (Fig. 3). The one-way ANOVA, performed from cyclogram scores onto  $V$  vector, was significant (Shapiro-Wilk test:  $p = 0.313$ ; Levene test:  $p = 0.728$ ; Fisher test:  $F = 27.492$ ,  $p < 10^{-6}$ ). Post-hoc tests (Bonferroni) revealed significant differences between groups ( $p < 0.01$ ), except between G3 and G4 ( $p = 0.092$ ).

We compared the four cyclogram patterns according to the different phases of the running cycle. The main invariants of cyclogram patterns are the ankle position when the foot begins its forward movement after take-off (landmarks 5–6) and its backward and downward movement prior to foot strike (landmark 13). The variant coordination properties relative to the sprint speciality are, in descending order of magnitude, the ankle position at contralateral take-off (beginning of airborne phase, landmarks 11–12), the ankle ascent close to the pelvis (landmarks 7–9), the ankle position at foot strike (landmark 1) and take-off (landmark 4) (Fig. 4). Besides, the sprinters' mean velocity during the experiment was highly variable within and between groups (Table 2).

## Discussion

The Procrustes analysis of cyclograms based on a selective choice of reference frames allows us to compare shape changes, independently of 'size' and 'velocity' factors [1]. Shape changes are proportion changes and the landmark positions must be interpreted as relative displacements [5,27]. PCs are a means to reduce the number of variables by selecting those which have the greatest eigenvalues [7,25,27,31,32]. The selection

of PC eliminates nuisance parameters generated by superimposition [13,14] and minimizes errors due to incorrect identification of skin markers inherent in the digitizing procedure.

Our results reveal that the cyclogram patterns are arranged along the  $V$  vector, from 60-m sprinters to 100-m, 200-m, and 400-m sprinters. The spindle-shaped cyclogram that characterizes short-distance sprinters may be explained by a combination of significant changes in successive phases of the cycle: *I) stance phase*: a more flexed lower limb position during support with a limited extension at take-off (landmarks 1 to 4); *II) lift-off phase*: a relative limited ascent of ankle to the pelvis after take-off (landmarks 4 to 8); *III) swing phase*: a rectilinear forward movement of the ankle (landmarks 8 to 11); *IV) landing phase*: a rapid forward movement in front of the hip (landmarks 11 to 13) to prepare efficient and active foot strike (landmarks 13, 14, 1). These results confirm the literature data which show that efficient running is characterized by a high knee lift [10] and a rapid extension occurring at the knee joint to carry the swing ankle upward in front of the body [11]. This action prepares an efficient foot strike in order to place the foot as closely as possible beneath the centre of gravity at contact [16,36], thereby greatly reducing horizontal braking. The greater flexion of the supporting hindlimb during contact might seem surprising, but it can be interpreted as a way of generating easier forward traction of the body over the ground contact point [19,40]. In sprinters specialized in longer distances, these technical features are minimized and give a poulaine-type shape to the cyclogram similar to that of middle-distance runners [8].

## 1. Introduction

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Marey et Demenÿ [9,21] furent les premiers à retranscrire, par la chronophotographie géométrique, le mouvement du membre inférieur pendant un cycle de marche ou de course chez l'homme. Le référentiel utilisé n'est plus le sol, mais un repère mobile, la hanche, considéré comme fixe. Ils ont ainsi pu rendre compte des variations de la vitesse angulaire des différents segments du corps. Ce principe a été appliqué à la locomotion animale pour décrire le mouvement relatif des extrémités distales des segments des membres supérieurs et inférieurs relativement à l'épaule et à la hanche [6,33,37–39]. Plus tard, les biomécaniciens se sont intéressés plus précisément au mouvement relatif de la cheville et le tracé obtenu correspond à une courbe fermée (cyclogramme)

en forme de « poulaine » [2,12]. Ce mode de représentation a permis de mettre en évidence le rôle déterminant du membre oscillant dans la propulsion [2].

La représentation du mouvement relatif en fonction du temps fournit une bonne visualisation des patrons de mouvements cycliques continus, mais reste limitée à des analyses cinématiques essentiellement descriptives [2,12,22]. En outre, la durée du cycle de course étant variable, le cyclogramme n'est pas bâti avec le même nombre d'images d'un individu à l'autre. Ces images correspondent à des événements distincts du cycle de course. Yokoi et al. [41] ont alors eu l'idée de localiser huit points repères spatio-temporels sur le cyclogramme (par exemple, la reprise et la perte de contact du pied droit au sol, la mi-distance de la phase d'appui du pied droit). Ils ont ainsi pu identifier des différences cinématiques dépendantes de la stature des athlètes courant à vitesse maximale. Bien que leurs analyses quantifient la variabilité de chacun des points repères du cyclogramme pris séparément, elles ne permettent pas d'évaluer la variabilité du cyclogramme dans son ensemble.

Initialement destinée à la morphométrie géométrique, l'analyse Procuste offre la possibilité d'utiliser des points repères spatio-temporels « homologues » (on parlera ici de points « isodynamiques ») pour représenter collectivement tous les cyclogrammes, après élimination des différences de « taille ». Elle s'appuie ensuite sur des analyses statistiques multivariées (analyse en composantes principales, régression linéaire multivariée), afin de rechercher si la spécialisation, pour une distance de sprint (60 m, 100 m, 200 m, 400 m), se traduit par des changements de conformation du cyclogramme.

## 2. Sujets

La population d'étude comprend dix sprinters masculins, dont cinq spécialistes des sprints courts (du 60 m au 100 m) et cinq spécialistes des sprints longs (200 m au 400 m). Les sujets ont en moyenne 24 ans (DS : 3,7), une taille de 178,5 cm (DS : 4,6), une longueur de membre inférieur de 103,6 cm (DS : 3,1) et une masse corporelle de 76,6 kg (DS : 8,4). Ces athlètes sont des coureurs expérimentés, effectuant un entraînement spécifique à raison de 8 à 12 h par semaine. Les épreuves de compétition auxquelles ils participent habituellement sont les courses de 60 et 100 m pour les spécialistes des sprints courts, et de 200 et 400 m pour les spécialistes des sprints longs. Les meilleures performances réalisées pour ces épreuves sont comprises entre 6,53 et 6,90 s pour le 60 m, 10,52 et 10,79 s pour le 100 m ; 21,16 et 21,77 s pour le 200 m ; 49,5 et 50,9 s pour le 400 m.

## 3. Protocole expérimental

Le protocole consiste à réaliser quatre sprints (courses à vitesse maximale) sur une distance de 80 m, avec une récupération active de 8 min entre chaque essai. Les coureurs sont munis de marqueurs aux articulations du membre inférieur droit, selon la définition de Zatsiorsky (grand trochanter, malléole externe) [42]. Ils ont été filmés à l'aide d'une caméra à grande vitesse (250 Hz), en vue latérale, dans un intervalle de 10 m situé entre le 40° et le 50° mètre de la distance parcourue. L'intervalle est délimité par des cellules photoélectriques, afin de relever la vitesse moyenne de déplacement pour parcourir la distance filmée.

## 4. Méthode de traitement

### 4.1. Définition et saisie des points repères des cyclogrammes de la cheville

Les marqueurs articulaires sont digitalisés sur 14 images de référence, correspondant à 14 événements clés du cycle de course. Ces images sont facilement identifiables chez tous les sprinters, quelle que soient leur spécialité et leur morphologie. On obtient ainsi 14 points repères spatio-temporels, équivalents pour tous les cyclogrammes (Fig. 1, Tableau 1). Quatre cyclogrammes par athlète ont été traités, soit un total de 40 cyclogrammes.

Les sept premières images de référence décrivant l'appui du pied et le début de son levé jusqu'à l'appui contralatéral sont identiques à celles qui décrivent la fin du levé jusqu'à un nouvel appui. En supposant que le mouvement cyclique de la jambe soit symétrique pour les deux membres, nous pouvons extraire du cyclogramme des informations concernant la position relative des deux chevilles à un moment remarquable du cycle de course.

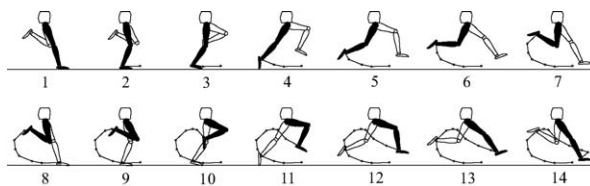


Fig. 1. Les 14 images références du cycle de course correspondant aux 14 points repères spatio-temporels du cyclogramme. La trajectoire de la cheville relative à l'articulation de la hanche (considérée comme fixe) dessine le cyclogramme.

Fig. 1. The 14 reference frames of the running cycle corresponding to the 14 spatiotemporal landmarks of the cyclogram. The ankle trajectory related to the hip joint (considered as fixed) draws the cyclogram.

Tableau 1

Choix des images de références (événements clés) du cycle de course pour définir les quatorze points repères spatio-temporels du cyclogramme  
 Choice of reference frames (key events) to define the fourteen landmarks of the cyclogram

N°	Définition	Definition
1, 8	Prise de contact au sol	Foot strike
2, 9	Hanche à l'aplomb de la cheville du membre d'appui	Hip and ankle projected on same vertical
3, 10	Cheville oscillante confondue avec le genou du membre d'appui	Swing ankle superimposed on contact knee
4, 11	Perte de contact au sol	Take-off support phase
5, 12	Alignement des chevilles sur une même horizontale	Ankles projected on same horizontal
6, 13	Jambe oscillante à l'horizontale	Swing leg at horizontal
7, 14	Extension maximale du genou avant la prise de contact au sol	Maximal extension of knee prior to foot strike

#### 4.2. Superposition Procuste des cyclogrammes de la cheville

L'application de la superposition Procuste à l'étude de trajectoires articulaires nous conduit à revisiter les fondements théoriques de cette analyse. La superposition Procuste consiste en trois transformations géométriques, que nous illustrerons en prenant l'exemple de deux triangles ABC et DEF de position, de taille et d'orientation différentes [3,15,20,25,26,29,30,34,35]. La première transformation élimine les différences de position par translation. Les triangles sont déplacés de façon à faire coïncider leurs centres géométriques (point à partir duquel la somme des carrés des distances aux trois sommets est minimale). La seconde transformation consiste à réduire les deux triangles à une taille standardisée égale à l'unité. Pour normaliser, les coordonnées des points du triangle sont divisées par la « taille centroïde ». La « taille centroïde » est la racine carrée de la somme des carrés des distances entre le centre géométrique et chaque coordonnée de chaque point du triangle. Par exemple, pour le triangle ABC, la taille centroïde est :

$$\sqrt{(OAx)^2 + (OAy)^2 + (OBx)^2 + (OBy)^2 + (OCx)^2 + (OCy)^2}$$

Après la division de chaque coordonnée de chaque point de chaque triangle par la taille centroïde, la somme des carrés des écarts entre le centre et les nouvelles coordonnées des points du triangle est égale à 1. Pour le triangle ABC, on a :

$$(OAx')^2 + (OAy')^2 + (OBx')^2 + (OBy')^2 + (OCx')^2 + (OCy')^2 = 1,$$

où les points A'(Ax', Ay') ; B'(Bx', By') ; C'(Cx', Cy') sont les nouvelles coordonnées des points du triangle après les étapes de translation et de mise à l'échelle. Il en est de même pour le triangle DEF. La troisième transformation est une rotation qui réalise l'ajustement optimal des deux triangles, A'B'C' et D'E'F', par une procédure répondant au critère des moindres carrés : la

somme des carrés des écarts entre points homologues des différents triangles doit être la plus faible possible. On obtient ainsi de nouvelles coordonnées des points repères (A'', B'', C'' et D'', E'', F''), traduisant les différences de forme pure ou de « conformation » entre les deux triangles [3,4,17].

Les études de morphométrie ne se limitant pas à la comparaison de deux objets, la méthode Procuste peut être étendue à une collection d'objets : ici, 40 cyclogrammes dont chacun est décrit par 14 points repères [15].

Les résultats de superposition sont exprimés par le « consensus » et les « résidus Procuste ». Le consensus représente la conformation moyenne du cyclogramme, pour tout l'échantillon. Les résidus Procuste sont les variables de conformation, c'est-à-dire les différences entre les coordonnées des points repères du cyclogramme, après superposition avec les coordonnées homologues du consensus. Les résidus Procuste définissent la conformation de chaque cyclogramme. L'ajustement de superposition se réalisant sur l'ensemble des points, le déplacement d'un point dépend de celui des autres, et son niveau de signification ne peut être testé isolément [5].

#### 4.3. Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée à partir de la matrice de variance-covariance des résidus Procuste. Elle fournit une base de vecteurs propres, les « composantes principales de conformation » [27]. Chacune de ces composantes est une combinaison linéaire des 28 variables initiales de conformation (14 résidus Procuste en deux dimensions), décrivant un mouvement simultané et synchrone de l'ensemble des points du cyclogramme. L'ACP classe les composantes principales (CP) par ordre de valeur propre décroissante : plus un type de déformation du cyclogramme est retrouvé fréquemment dans l'échantillon, plus la valeur propre de la CP (exprimée en pourcentage de la variance totale) est importante. L'ACP

permet de visualiser les 40 cyclogrammes dans l'espace des CP, et donc d'aider à repérer d'éventuelles « anomalies » dans leur distribution.

#### 4.4. Régression linéaire multivariée

Afin de rechercher s'il existe une relation entre la conformation du cyclogramme et la spécialité du sprinter, nous utilisons la régression multivariée, dont le principe est présenté par Kraznowski [18] et a été largement appliqué en morphométrie [25,26,31]. Les variables dépendantes sont les scores des cyclogrammes sur les CP et la variable indépendante (explicative) la spécialité du sprinter (G1 : 60 m, G2 : 100 m, G3 : 200 m, G4 : 400 m). L'équation à résoudre est la suivante :  $Y_j^i = b_j \times X_i$ , où  $Y_j^i$  est la matrice des scores des cyclogrammes sur les CP,  $X_i$  est la variable de groupe et  $b_j$  est l'inconnue. Le coefficient de détermination  $R^2$  de la régression multiple est calculé pour mesurer la qualité de l'ajustement des données au modèle théorique linéaire, et sert à la réalisation du test  $F$  de Fisher, donnant le niveau de signification de la régression [4,23]. La solution de l'équation de régression donne les coefficients  $b$ , utilisés pour calculer la combinaison linéaire des CP comme suit :  $V = (b_1 \times CP_1 + b_2 \times CP_2 + b_j \times CP_j)$ . Le vecteur de conformation  $V$  traduit les changements de conformation du cyclogramme corrélés à la spécialité de sprint.

#### 4.5. Analyse de la variance

Une analyse de la variance à un facteur est réalisée à partir des scores des cyclogrammes sur le vecteur  $V$ , afin de vérifier la validité des groupes de spécialité. Le facteur est la spécialité de sprint à trois niveaux G2, G3, G4, G1 n'étant pas inclus dans l'analyse en raison d'un trop faible effectif. Les conditions d'application de l'analyse de la variance ont été vérifiées par un test de Shapiro–Wilk (normalité de la distribution) et un test de Levene (homogénéité des variances). Une procédure de comparaison multiple (post-hoc Bonferroni) permettra de déterminer quelles sont les spécialités de sprint significativement distinctes les unes des autres.

#### 4.6. Représentations graphiques

Les différences de conformation sont mises en évidence à partir de deux modes de représentation graphique : la projection des cyclogrammes dans l'espace des composantes de conformation (CP1–CP2 et vecteur  $V$ ), et la visualisation des changements de conformation qui leur sont associés.

La superposition Procuste, les procédures statistiques et les représentations graphiques ont été effectuées à l'aide du logiciel APS [28].

## 5. Résultats

### 5.1. Définition des groupes de sprinters en fonction de leur spécialisation

Les 40 cyclogrammes ont été projetés dans le plan des deux premières CP (Fig. 2). Le consensus est le cyclogramme théorique situé au barycentre de l'espace des CP. CP1 et CP2 représentent respectivement 50,3% et 11,2% de la variance totale. Les 38,5% correspondent à une variabilité intragroupe (un faible pourcentage de l'information est lié à la spécialité de sprint).

Quatre groupes de sprinters sont relativement distincts sur CP1 : les spécialistes du 60 m (G1), du 100 m (G2), du 200 m (G3) et du 400 m (G4). Les zones de recouvrement des nuages sur CP1 restent néanmoins relativement étendues, notamment entre G2 et G3, puis G3 et G4. En revanche, G2 et G3 sont séparés sur CP2. Les changements de conformation correspondant à CP1 et CP2 sont représentés le long des axes. La description du changement de conformation du cyclogramme est effectuée, de façon plus synthétique, avec le calcul du vecteur  $V$ .

### 5.2. Corrélations entre conformation du cyclogramme et spécialisation en sprint

La régression linéaire multivariée calculée avec les deux premières CP est significative ( $R^2 = 0,77$ ;  $F = 79,22$ ;  $p < 10^{-6}$ ). Le vecteur a pour équation :  $V = 0,93 \times CP1 + 0,37 \times CP2$ , la contribution des CP suivantes étant proche de zéro (valeurs des coefficients de régression  $b$ ). Sur la Fig. 3, l'axe des abscisses correspond au groupe de spécialité (G1–G4) et l'axe des ordonnées, au vecteur de conformation  $V$ . Les scores des cyclogrammes sur le vecteur  $V$  s'échelonnent selon un continuum : plus le sprinter est spécialisé sur de courtes distances, plus le cyclogramme tend vers une conformation fusiforme. Les changements de conformation peuvent être visualisés par quatre cyclogrammes figurant les scores moyens sur le vecteur  $V$  de chacun des quatre groupes.

L'ANOVA, réalisée à partir des scores des cyclogrammes sur le vecteur  $V$ , montre un effet significatif de la spécialisation (test de Shapiro–Wilk :  $p = 0,313$ ; test de Levene :  $p = 0,728$ ; test de Fisher :  $F = 27,492$ ;  $p < 10^{-6}$ ). Les tests post-hoc (Bonferroni) révèlent des différences significatives entre les groupes G2 et G3

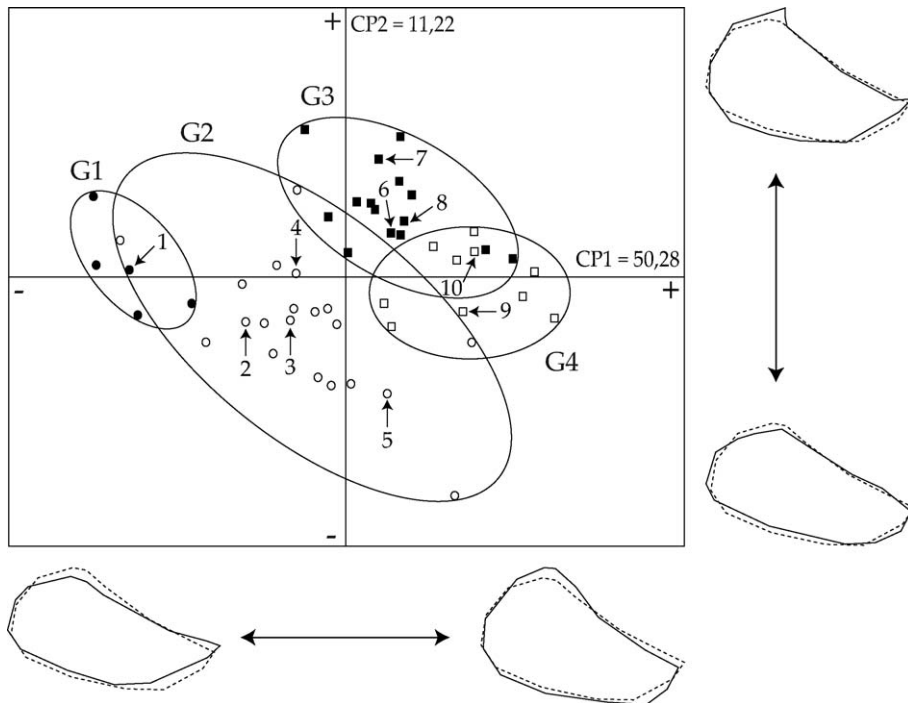


Fig. 2. Analyse en composantes principales des 40 cyclogrammes de la cheville. CP1 : composante principale 1 (50,3 % de la variance totale) ; CP2 : composante principale 2 (11,2 % de la variance totale). Les changements de conformation correspondant à CP1 et CP2 sont représentés le long des axes. Sprinters spécialisés : G1 sur 60 m (cercles noirs), G2 sur 100 m (cercles blancs), G3 sur 200 m (carrés noirs), G4 sur 400 m (carrés blancs). 1–10 : cyclogrammes moyens des 10 sprinters.

Fig. 2. Principal component analysis of 40 ankle cyclograms. CP1: principal component 1 (50.3% of total variance); CP2 : principal component 2 (11.2% of total variance). Shape changes corresponding to CP1 and CP2 are sketched along axes. Specialized sprinters: G1 on 60 m (dark circles), G2 on 100 m (white circles), G3 on 200 m (dark squares), G4 on 400 m (white squares). 1–10: mean cyclograms of the 10 sprinters.

( $p = 0,002$ ), G2 et G4 ( $p < 0,0001$ ), mais pas entre les groupes G3 et G4 ( $p = 0,092$ ).

### 5.3. Les quatre patrons du cycle de course

Le cycle de course a été décomposé en quatre phases successives (Fig. 3) : (I) *la phase de posé* : de la prise de contact du pied au sol (point 1) à la perte d'appui (point 4) ; (II) *le début du levé* : de la perte d'appui (point 4) à la prise de contact du pied contralatéral au sol (point 8) ; (III) *le retour du pied vers l'avant* (mouvement balistique), qui se poursuit jusqu'à la perte d'appui au sol du pied contralatéral (points 8–11) ; (IV) *la fin du levé*, de la perte de contact du pied contralatéral au sol (point 11) jusqu'à la reprise de contact du pied étudié au sol (point 1). La phase de levé comprend deux phases aériennes (points 4–8 ; points 11–1), séparées par l'appui contralatéral (points 8–11).

Nous avons recherché dans les cyclogrammes quels étaient les points repères qui présentaient le plus d'amplitude de variations, pour les distinguer de ceux qui sont pratiquement invariants (Fig. 4). L'objectif est

d'identifier les invariants propres à la discipline du sprint, *largo sensu*, et les variables susceptibles d'expliquer chaque spécialité de sprint (G1–G4).

Les principaux invariants, communs aux quatre groupes, sont : la position de la cheville au moment du retour du pied vers l'avant après la perte de contact au sol (points 5 et 6), et au moment où le pied amorce son trajet vers le bas et vers l'arrière à la fin du levé (point 13). Les points repères qui présentent les plus grandes variations sont, par ordre décroissant d'amplitude : la position de la cheville oscillante au moment de la perte d'appui contralatéral (points 11–12), l'élévation de la cheville vers le bassin (points 7–9), et enfin la position de la cheville à la reprise de contact du pied au sol (point 1) et à la perte d'appui (point 4).

### 5.4. Vitesse et spécialité de sprint

La « spécialisation » du sprinter est l'acquisition d'un patron locomoteur répondant aux spécificités techniques de sa distance de prédilection (60 m, 100 m, 200 m et 400 m). On doit la distinguer de la capacité

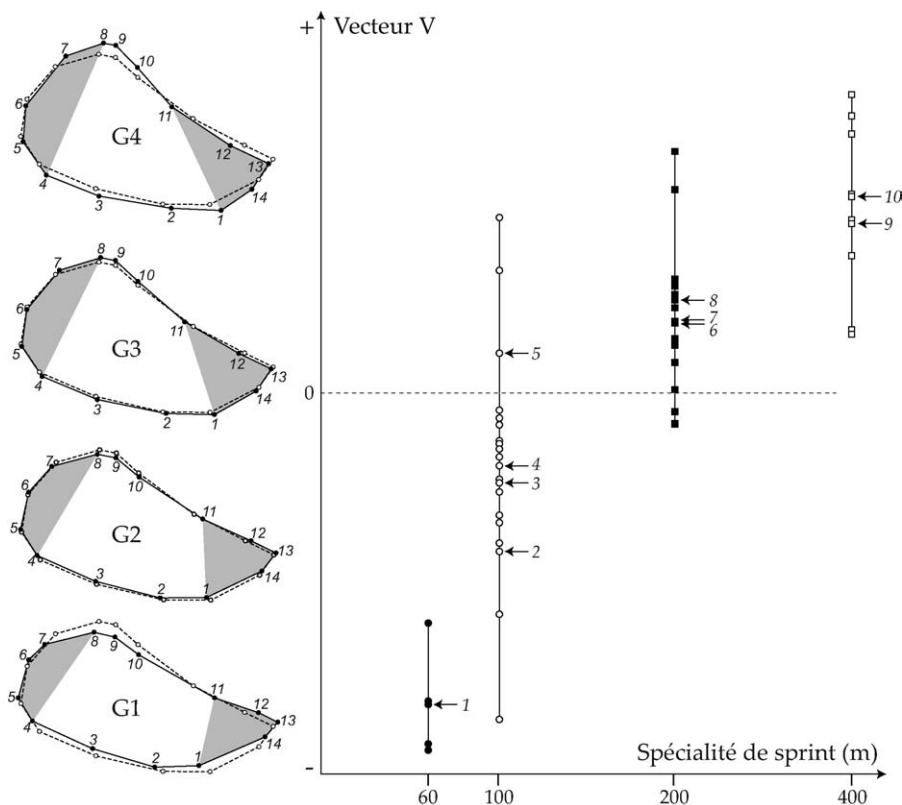


Fig. 3. Changements de conformation du cyclogramme en fonction de la spécialité de sprint. Abscisses : distance de spécialité en sprint (G1–G4). Ordonnée : vecteur  $V$  calculé par régression multivariée (voir § *Méthode*). Sprinters spécialisés : G1 sur 60 m (cercles noirs), G2 sur 100 m (cercles blancs), G3 sur 200 m (carrés noirs), G4 sur 400 m (carrés blancs). Les quatre patrons de spécialisation en sprint correspondent aux scores moyens de G1–G4 sur le vecteur  $V$ . Phase d'appui : points repères 1–4 ; début du levé : points repères 4–8 ; retour du pied vers l'avant : points repères 8–11 ; fin du levé : points repères 11–14. En gris : phases d'envol du cycle de course. Voir numéros des points repères, Fig. 1 et Tableau 1.

Fig. 3. Shape changes of the cyclogram according to the speciality of sprint.  $X$ -axis: distance of sprint speciality (G1–G4).  $Y$ -axis:  $V$  vector computed from multivariate regression (see § *Method*). Specialized sprinters: G1 on 60 m (dark circles), G2 on 100 m (white circles), G3 on 200 m (dark squares), G4 on 400 m (white squares). The four patterns of sprint specialization correspond to the mean scores of G1–G4 on the  $V$  vector. Stance phase: landmarks 1–4; lift-off phase: landmarks 4–8; swing phase: landmarks 8–11; landing phase: landmarks 11–1. In grey: flight phases of running cycle. See numbers of landmarks, in Fig. 1 and Table 1.

du sprinter à se déplacer avec la plus grande vitesse possible (efficacité maximale).

Dans notre étude, les sprinters ont tous parcouru, à vitesse maximale, une distance de sprint déterminée (80 m), afin d'observer leur organisation motrice dans les mêmes conditions. Le Tableau 2 montre que la vitesse moyenne de déplacement est très hétérogène, à la fois au sein d'un même groupe (G2, G3), et entre les quatre groupes. La conformation du cyclogramme n'est pas liée à la vitesse maximale de déplacement (Tableau 2).

## 6. Discussion

L'analyse Procuste s'est révélée une méthode particulièrement performante et fiable pour étudier les changements de conformation des cyclogrammes associés à

la spécialisation du sprinter. La mise à l'échelle des cyclogrammes, couplée à un choix sélectif d'images de référence du cycle, est essentielle lorsqu'on cherche à quantifier la dynamique intersegmentaire, indépendamment des facteurs de « taille » et de « vitesse » [1]. Il est à préciser que l'absence de référentiel fixe et l'élimination des différences de taille impliquent une certaine précaution dans la lecture des cyclogrammes. En effet, la position des points repères doit être interprétée en termes de déplacements relatifs.

L'ACP se prête particulièrement bien à la superposition Procuste, car les résidus sont trop nombreux pour être directement exploitables [25,27,31]. En effet, un nombre trop élevé de variables crée un excès des degrés de liberté et une diminution de la puissance des tests statistiques [32]. Les composantes principales révèlent ici les principales variations de conformation du cyclo-



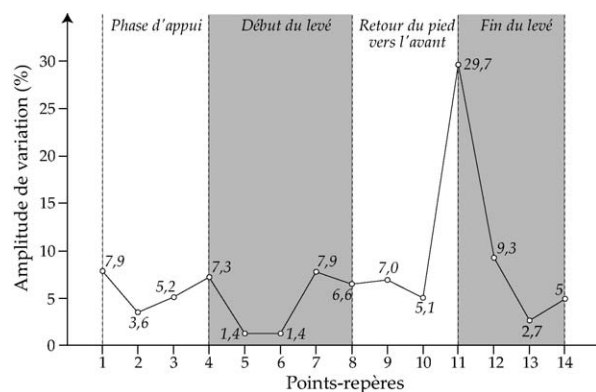


Fig. 4. Amplitudes des déplacements relatifs des points repères du cyclogramme. Abscisses : numéros des points repères. Ordonnées : amplitude de la variation calculée par addition des résidus Procruste pour chaque point repère. Phase d'appui : points repères 1–4 ; début du levé : points repères 4–8 ; retour du pied vers l'avant : points repères 8–11 ; fin du levé : points repères 11–14. En gris : phases d'envol du cycle de course. Voir numéros des points repères sur la Fig. 1 et le Tableau 1.

Fig. 4. Magnitudes of relative landmark displacements of the cyclogram. X-axis: numbers of landmarks. Y-axis: magnitude of the variation calculated by addition of Procrustes residuals for each landmark. Stance phase: landmarks 1–4; lift-off phase: landmarks 4–8; swing phase: landmarks 8–11; landing phase: landmarks 11–14. In grey: flight phases of running cycle. See numbers of landmarks in Fig. 1 and Table 1.

Tableau 2

Vitesse (moyenne  $\pm$  DS) de quatre séquences de sprint par individu, en  $m \cdot s^{-1}$

Velocity (mean  $\pm$  SD) of four sprint sequences for each individual, in  $m \cdot s^{-1}$

G1		G2		G3		G4	
<i>m</i>	$\sigma$	<i>m</i>	$\sigma$	<i>m</i>	$\sigma$	<i>m</i>	$\sigma$
9,22	0,042	9,40	0,048	9,61	0,034	9,28	0,033
		9,39	0,026	9,36	0,054	9,22	0,024
		9,35	0,032	9,15	0,108		
		8,97	0,048				

*m* : Moyenne ;  $\sigma$  : écart-type. Sprinters spécialisés : G1 sur 60 m ; G2 sur 100 m ; G3 sur 200 m ; G4 sur 400 m.

*m*: Mean;  $\sigma$ : standard deviation. Specialized sprinters: G1 on 60 m; G2 on 100 m; G3 on 200 m; G4 on 400 m.

gramme de la cheville au sein d'une population hétérogène de sprinters, tant par leurs morphologies, que par leurs performances motrices (évaluées par la vitesse de déplacement durant l'expérimentation) [7,24]. La sélection des CP présente un double avantage : (1) compenser les erreurs de digitalisation (dues aux phénomènes de perspective et de parallaxe, lors de la prise de vue et au glissement des marqueurs sur la peau) ; (2) éliminer les paramètres de nuisance générés par la superposition [13,14].

L'intérêt du vecteur  $V$  est d'obtenir la combinaison linéaire des CP les plus significatives pour exprimer les changements de conformation associés aux différentes spécialités de sprint. Les petites variations significatives, qui passaient jusqu'alors inaperçues avec les méthodes classiques, peuvent être ainsi visualisées en les amplifiant, pour aider à la compréhension du processus de spécialisation. Nos résultats montrent que les changements de conformation du cyclogramme s'opèrent selon un continuum, allant des sprinters de 60 m aux sprinters de 100 m, 200 m, et 400 m. Les différences résultent d'une combinaison de caractéristiques cinématiques spécifiques dans les quatre phases du cycle de course. **G1** : le sprinter spécialisé sur la plus courte distance de sprint (60 m) présente un cyclogramme de conformation très fusiforme. À l'appui, le sprinter adopte une position relativement plus fléchie du membre inférieur, ce qui s'observe par le déplacement de l'ensemble des points 1 à 4 au-dessus du consensus. Cette plus grande flexion permettrait de tracter plus facilement le corps vers l'avant pendant la phase initiale du poser (point 1 à 2), afin de réduire les forces de freinage consécutives à la reprise de contact au sol et générer plus tôt des forces propulsives pendant l'appui [19,40]. Pendant le levé, le retour du pied vers l'avant s'effectue selon une trajectoire la plus tendue possible, d'où une atténuation de la pente de dénivellation du cyclogramme (points 8–11). À la fin du levé, la cheville décrit une trajectoire haute en avant de la hanche (points 11–13) ; ceci peut s'expliquer par une plus grande flexion de la hanche, accompagnée d'une extension rapide du genou [11]. À ce sujet, Deshon et Nelson [10] affirment qu'une grande élévation du genou est un des facteurs déterminants d'une course efficace. Elle facilite une reprise active de l'appui au sol, qui s'effectue grâce à un mouvement rapide du pied dans le sens opposé du déplacement (points 13, 14 et 1). Hay [16] et Slocum [36] soulignent le rôle majeur de cette action pour effectuer la reprise de contact au sol, le plus proche possible de la projection verticale du centre de gravité, et limiter ainsi l'amortissement. **G2 et G3** : les sprinters de 100 et 200 m présentent une conformation plus ovoïde du cyclogramme. Les caractéristiques décrites chez le sprinter de 60 m sont ici atténuées : en particulier, la trajectoire de la cheville est moins rectiligne lors du retour de la jambe vers l'avant (points 8–11), mais aussi moins haute en avant de la hanche, à la fin du levé (points 11–13). En outre, l'action antéro-postérieure du pied qui précède la reprise de contact au sol (points 13, 14, 1) est moins rasante, traduisant chez ces sprinters une tendance à rapprocher davantage le pied du sol que sous le bassin. **G4** : les sprinters

spécialisés sur la plus longue distance de sprint (400 m) ont un cyclogramme plus haut dans sa partie postérieure. Cette conformation, qui justifie le nom de « poulaïne », se rapproche du cyclogramme des coureurs de demi-fond (800 m) [8]. Les sprinters de longue distance reprennent appui au sol, avec une position du membre inférieur plus inclinée et plus tendue (point 1–4 situés en dessous du consensus). Au début du levé (points 4–8), la cheville remonte et atteint un point haut (point 8), permettant d'emmagasiner une énergie potentielle utilisable pour un retour économique de la jambe vers l'avant (points 8–13). Il semble que ces sprinters profitent davantage de la réaction passive des muscles fléchisseurs du genou, préalablement mis en tension par une extension vigoureuse durant la phase de poussée [36]. En dépit des différences cinématiques entre les spécialités de sprint, tous les sprinters présentent deux paramètres invariants, indispensables à l'équilibre dynamique du corps en mouvement, qui sont l'amorce du retour du pied vers l'avant après la perte d'appui au sol (points 5 et 6) et celle de la reprise d'appui (point 13). Ces paramètres ici invariants sont, au contraire, fortement modifiés dans les autres types de course (courses de demi-fond et de fond).

## Remerciements

Cette étude a été financée par l'équipe FRE 26 96 du CNRS et par l'Université d'Évry-Val-d'Essonne. Nous remercions tout particulièrement les athlètes et leurs entraîneurs, Christian Kapfer et Gaby Occuli, pour leur collaboration, sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Nos remerciements vont aussi à Francine Clerc et à Éric Pellé pour la réalisation technique.

## Références

- [1] R.McN, Alexander, The dependence of gait on size, speed, and gravity, in: F.K. Jouffroy, M.H. Stack, C. Niemitz (Eds.), *The Gravity, Posture and Locomotion in Primates*, Il Sedicesimo, Firenze, 1990, pp. 79–85.
- [2] J.-P. Blanchi, M. Pierre, P. Trouillon, R. Vaussenat, *Biodynamique de la course : rôle du membre oscillant*, *Staps* 6 (1982) 11–17.
- [3] F.L. Bookstein, Size and shape: a comment on semantics, *Syst. Zool.* 38 (1989) 173–180.
- [4] F.L. Bookstein, *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [5] F.L. Bookstein, Metrics and symmetries of the morphometric synthesis, in: K.V. Mardia, C.A. Gill (Eds.), *Proceedings in Current Issues in Statistical Shape Analysis*, Leeds University Press, Leeds, 1995, pp. 139–153.
- [6] D. Brinkman, Structural correlates of tarsal and metatarsal functioning in *Iguana* (Lacertilia; Iguanidae) and other lizards, *Can. J. Zool.* 58 (1980) 277–289.
- [7] A. Daffertshofer, C.J.C. Lamoth, O.G. Meijer, P.J. Beek, PCA in studying coordination and variability: a tutorial, *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)* 19 (2004) 415–428.
- [8] L. Decker, C. Berge, S. Renous, X. Penin, F. Natta, The Procrustes method applied to the study of knee and ankle cyclograms in human locomotion: comparison of middle-distance runners and sprinters, *Arch. Physiol. Biochem.* 112 (2004) 92.
- [9] G. Demeny, *Mécanisme et éducation des mouvements*, Félix Alcan, Paris, 1924.
- [10] D.E. Deshon, R.C. Nelson, A cinematographical analysis of sprint running, *Res. Q.* 35 (1964) 453–454.
- [11] C.J. Dillman, Kinematic analyses of running, *Exerc. Sport Sci. Rev.* 3 (1975) 193–218.
- [12] B. Gajer, A. Durey, C. Hanon, C. Thépaut-Mathieu, La poulaïne : une représentation complexe de la foulée, *Sci. Sports* 12 (1997) 24–25.
- [13] C. Goodall, Procrustes methods in the statistical analysis of shape, *J. R. Stat. Soc. [Ser A]* 53 (1991) 285–339.
- [14] C. Goodall, Procrustes methods in the statistical analysis of shape revisited, in: K.V. Mardia, C.A. Gill (Eds.), *Proceedings in Current Issues in Statistical Shape Analysis*, Leeds University Press, Leeds, 1995, pp. 18–33.
- [15] J.C. Gower, Generalized Procrustes analysis, *Psychometrika* 40 (1975) 33–51.
- [16] J.G. Hay, *Biomécanique des techniques sportives*, Vigot, Paris, 1980.
- [17] D.G. Kendall, Shape manifolds, Procrustean metrics and complex projective spaces, *Bull. Lond. Math. Soc.* 16 (1984) 81–121.
- [18] W.J. Kraznowski, *Principles of multivariate analysis*, Clarendon Press, Oxford, 1988.
- [19] R. Mann, P. Sprague, A kinetic analysis of the ground leg during sprint running, *Res. Q. Exerc. Sport* 51 (1980) 334–348.
- [20] L.F. Marcus, Traditional morphometrics, in: F.J. Rohlf, F.L. Bookstein (Eds.), *Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop. Special Publication Number 2*, University of Michigan Museum of Zoology, Ann Arbor, 1990, pp. 77–122.
- [21] E.J. Marey, *Le mouvement*, Masson, Paris, 1894.
- [22] M.J. Milliron, P.R. Cavanagh, Sagittal plane kinematics of the lower extremity during distance running, in: P.R. Cavanagh (Ed.), *Biomechanics of distance running*, Human Kinetics, Champaign, Illinois, 1990, pp. 65–105.
- [23] J.E. Mosimann, Size allometry: size and shape variables with characterization of the lognormal and generalized gamma distributions, *J. Am. Stat. Assoc.* 65 (1970) 930–945.
- [24] K.M. Newell, D.M. Corcos, *Variability and Motor Control*, Human Kinetics, Champaign, Illinois, 1993.
- [25] X. Penin, *Modélisation tridimensionnelle des variations morphologiques du complexe crânio-facial des hominoïdes*, thèse, université Paris-6, 1997.
- [26] X. Penin, Analyse et prévision de croissance crânienne par superposition Procruste, *Rev. Orthop. Dento Faciale* 33 (1999) 275–286.
- [27] X. Penin, Exploration de la variabilité des formes faciales par les composantes de conformation, *J. Edgewise* 41 (2000) 39–53.
- [28] X. Penin, APS: Applied Procrustes Software, freeware: <http://www.procuste.com>, 2001.
- [29] X. Penin, M. Baylac, Analysis of the skull shape changes in Apes using 3D Procrustes superimposition, in: K.V. Mardia, C.A. Gill (Eds.), *Proceedings in Current Issues in Statistical Shape Analysis*, Leeds University Press, Leeds, 1995, pp. 208–210.

- [30] X. Penin, M. Baylac, Comparaison tridimensionnelle des crânes de *Pan* et *Pongo* par superposition procuste, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. III 322 (1999) 1099–1104.
- [31] X. Penin, C. Berge, M. Baylac, Ontogenetic study of the skull in modern humans and common chimpanzees: neotenic hypothesis reconsidered with a tridimensional Procrustes analysis, Am. J. Phys. Anthropol. 118 (2002) 50–62.
- [32] C.R. Rao, Covariance adjustment and related problems in multivariate analysis, in: P.R. Krishnaiah (Ed.), Multivariate analysis, Academic Press, New York, 1966, pp. 87–103.
- [33] O. Rocha Barbosa, S. Renous, J.-P. Gasc, Comparison of the fore and hind limbs kinematics in the symmetrical and asymmetrical gaits of a caviomorph rodent, the domestic guinea pig, *Cavia porcellus* (Linné, 1758) (Rodentia, Caviidae), Ann. Sci. Nat. Zool. 17 (1996) 149–165.
- [34] F.J. Rohlf, Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces, J. Classif. 16 (1999) 197–223.
- [35] F.J. Rohlf, D. Slice, Extensions of the Procrustes methods for the optimal superposition of landmarks, Syst. Zool. 39 (1990) 40–59.
- [36] D.B. Slocum, S.L. James, Biomechanics of running, JAMA 205 (1968) 721–728.
- [37] R.C. Snyder, Adaptations for bipedalism of lizards, Am. Zool. 2 (1962) 191–203.
- [38] V.B. Sukhanov, General system of symmetrical locomotion of terrestrial vertebrates and some features of movement of lower tetrapods, Amerind Publ. Co. Pvt. Ltd, New Delhi, 1974 (original publication in Russian, 1968).
- [39] W.F. Walker Jr., A structural and functional analysis of walking in the turtle *Chrysemys picta marginata*, J. Morphol. 134 (1971) 195–213.
- [40] G.A. Wood, Biomechanical limitations to sprint running, in: B. van Gheluwe, J. Atha (Eds.), Medicine and Sport Science, Karger, Basel, Switzerland, 1987, pp. 58–71.
- [41] T. Yokoi, K. Shibukawa, M. Ae, Y. Hashihara, Effects of stature difference on sprint running motion, in: B. Jonsson (Ed.), Biomechanics X-B, Human Kinetics, Champaign, IL, USA, 1987, pp. 881–885.
- [42] V. Zatsiorsky, Kinematics of Human Motion, Human Kinetics, Champaign, IL, USA, 1998.