

Corrigé de l'examen CC1 de Biomécanique du mouvement

Correction de l'exercice 1.

Remarque 1. Pour tout le corrigé de cet exercice, on repèrera chaque articulation par son numéro :

- (1) métatarses
- (2) cheville
- (3) genou
- (4) hanche
- (5) épaule

On rappelle que la fréquence d'acquisition est donnée par

$$f_e = 1000 \text{ Hz.} \tag{1}$$

(1)

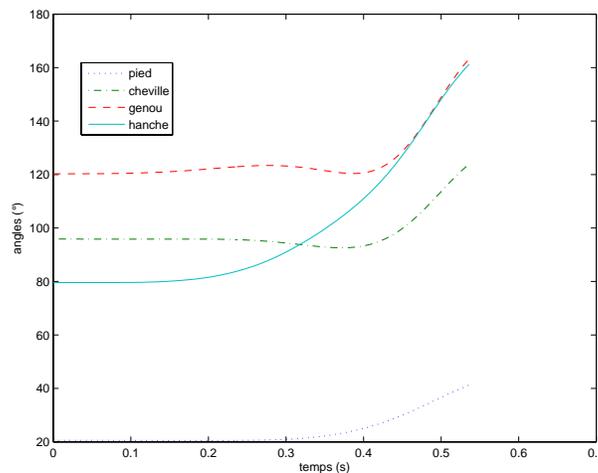


FIGURE 1. Les angles au cours du temps.

On renvoie au TD 1.

Chacun des angles de la figure 1 est croissant en fonction du temps. Chacune des articulations subit donc une extension (sauf la cheville, pour laquelle on parle de flexion plantaire). Jusqu'à environ 0.35 secondes, on constate, qu'hormis l'angle de la hanche, les angles varient peu. Celui de la hanche

commence à augmenter plus tôt que les autres. Il n'y a donc pas de «réel» proximo-distal observé au cours du TD 1.1. Notons cependant que la hanche correspond au muscle le plus puissant (grand fessier), activé en premier.

(2) On étudie le sujet à la première image (au tout début de l'impulsion) : le sujet est immobile.

(a)

On donne la valeur de g et la masse m du sujet

$$g = 9.810 \text{ ms}^{-2}, \quad (2a)$$

$$m = 70.5941 \text{ kg}. \quad (2b)$$

Le système étudié est le sujet total. Le sujet est soumis à son poids $\vec{p} = m\vec{g}$ et à la réaction d'appuis du sol \vec{R} .

On a clairement, grâce à (2),

$$\vec{p} \text{ défini par } \begin{cases} \text{Point d'application :} & \text{centre de gravité } G \text{ du sujet à l'image 1} \\ \text{Norme :} & mg = 70.5941 \times 9.810 = 692,528 \text{ N} \\ \text{Direction :} & \text{vertical} \\ \text{Sens :} & \text{bas} \end{cases} \quad (3)$$

D'après la RFD, la somme des forces externes est égale à la masse multipliée par l'accélération du centre gravité :

$$\sum \vec{F}_e = m\vec{a}_G. \quad (4)$$

En statique, l'accélération du centre de gravité est nulle et on a donc

$$\vec{p} + \vec{R} = \vec{0}. \quad (5)$$

c'est-à-dire qu'ils ont la même norme, la même direction et un sens opposé :

$$\vec{R} \text{ défini par } \begin{cases} \text{Point d'application :} & \text{Interface pied-sol à l'image 1} \\ \text{Norme :} & mg = 692,528 \text{ N} \\ \text{Direction :} & \text{vertical} \\ \text{Sens :} & \text{haut} \end{cases} \quad (6)$$

On peut donc en déduire les abscisses et ordonnées de la réaction d'appui

$$R_x = 0 \text{ N} \quad (7a)$$

$$R_y = mg = 692,528 \text{ N}. \quad (7b)$$

Remarque 2. On peut être plus précis. Si on écrit, en statique la nullité de la somme des moments des forces externes par rapport au point d'application de la force \vec{R} , on obtient, en notant d le bras de levier du poids :

$$0 \pm dmg = 0,$$

et donc $d = 0$. Les droites portant les deux forces \vec{R} et \vec{p} sont confondues.

(b)

Tous les tableaux sont donnés à la fin du corrigé, à partir de la page 15. Attention, la numérotation de ces tableaux est propre au corrigé et peut avoir changé par rapport à l'énoncé.

Si on compare ces valeurs de R_x et de R_y donnée par (7) avec celles données par le tableau 1, on constate une faible différence¹, ce qui est expliqué par la remarque suivante :

1. Il n'était pas nécessaire d'avoir une calculatrice pour voir que 0 est différent de -9!

Remarque 3. Pour toute la suite, vous admettez que de légères différences puissent exister entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques, qui sont dues aux erreurs de mesures et au traitement numérique administré aux données !

(c) La force exercée par le sol sur les pieds est égale à \vec{R} . Ainsi, la pression (moyenne) est donnée par

$$p = \frac{R_y}{S} \quad (8)$$

où S est la surface des deux pied. On a donc

$$p = \frac{R_y}{2 \times l \times L} = \frac{692,528}{2 \times 0,27 \times 0,07} = 18320,85 \text{ Pa.} \quad (9)$$

(d) On sait qu'équilibre statique est stable² si le centre de gravité du corps se projette sur l'intérieur de la base de sustentation. Ainsi, la projection du centre de gravité du corps doit se trouver entre le métatarse et la cheville.

D'après le résultat de la remarque 2, on en déduit aussi que la réaction d'appui de la réaction \vec{R} (en la supposant comme ponctuelle) doit elle aussi se trouver entre le métatarse et la cheville.

- (e) (i) On a déjà vu dans l'exercice 1.1 du TD 1 que le rôle du soléaire est la flexion plantaire de la cheville. Au repos, ce muscle est actif, il maintient la cheville et est donc en contraction isométrique.
- (ii) *Dans le tableau des masse 2, les masses correspondant à des segments présents deux fois ont été doublées.*

(A) Pour calculer, la longueur l_1 , deux méthodes sont *a priori* possibles :

- On utilise, comme dans le TD 5, les données anthropométriques du cours, *non données ici*. Si on les avait, on aurait trouvé, avec une taille égale à 1.80 m

$$l_1 = 1,80 \times 0,152 = 0,2736 \text{ m.}$$

et donc

$$l_1 = 0,2736 \text{ m.} \quad (10)$$

- Dans cet examen, il fallait utiliser les tableaux 2 et 3 et calculer la longueur du pied comme la norme du vecteur allant du métatarse à la cheville. On écrit donc, en utilisant par exemple, les données à l'image 1 (voir remarque 1) :

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \\ &= \sqrt{(0,63497 - 0,49088)^2 + (0,68104 - 0,62700)^2} \end{aligned}$$

et donc

$$l_1 = 0,15389 \text{ m.} \quad (11)$$

Cette longueur est différente de celle donnée par (10), qui représente la longueur totale du pied. Ici, on considère le pied comme le segment qui s'étend de la cheville jusqu'au métatarse. En fait, image par image, la longueur varie légèrement.

Voir figure 2.

Si on avait utilisé la moyenne des longueurs, on aurait obtenu :

$$l_1 = 0,15234 \text{ m.} \quad (12)$$

2. En fait, cette condition, n'est qu'une condition nécessaire de non-basculement, c'est-à-dire qu'il est nécessaire qu'elle ait lieu pour qu'il n'y ait pas de basculement, mais elle n'implique pas nécessairement la stabilité!

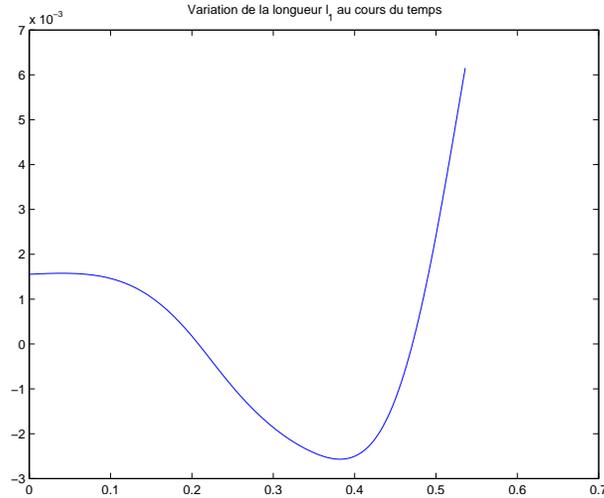


FIGURE 2. Représentation de $l_1 - \bar{l}_1$ au cours du temps.

Pour déterminer la masse des deux pieds, on écrit, grâce au tableau 2

$$m_1 = 70.59408 \times 0.02900 = 2.04723 \text{ kg.} \quad (13)$$

Conformément à l'énoncé, tout est double dans les pieds : cheville, soléaires, ...

(B) On raisonne comme dans la question 2a, sauf qu'ici, le système considéré est l'ensemble des deux pieds.

Ce système est soumis à :

- Son poids, \vec{p}_p ;
- l'action du sol sur le pied, \vec{R} ;
- l'action de la jambe sur le pied, \vec{R}_{jp} .

Comme dans la question 2a, On a clairement :

$$\vec{p} \text{ défini par } \begin{cases} \text{Point d'application :} & \text{centre du pied à l'image 1} \\ \text{Norme :} & m_1 g = 2.04723 \times 9.810 = 20.0833 \text{ N} \\ \text{Direction :} & \text{vertical} \\ \text{Sens :} & \text{bas} \end{cases} \quad (14)$$

De même, l'action du sol sur le pied, égale à l'action du sol sur le corps est déjà donné par (6) et (7). On aurait pu aussi les lire dans le tableau 1 (voir remarque 3).

D'après la RFD, en statique, l'accélération du centre de gravité est nulle et on a donc

$$\vec{p}_p + \vec{R} + \vec{R}_{jp} = \vec{0}.$$

On a donc

$$\vec{R}_{jp} = -\vec{p}_p - \vec{R}.$$

et, d'après (7),

$$\begin{aligned} R_{jp,x} &= 0, \\ R_{jp,y} &= -mg + m_1 g \end{aligned}$$

D'après (14), on a donc

$$R_{jp,y} = -672.44460 \text{ N.} \quad (15)$$

et donc

$$\vec{R}_{jp,y} \text{ défini par } \begin{cases} \text{Point d'application :} & \text{genou à l'image 1} \\ \text{Norme :} & |m_1g - mg| = 672.44460 \\ \text{Direction :} & \text{vertical} \\ \text{Sens :} & \text{bas} \end{cases} \quad (16)$$

(iii)

En renvoie au rappels de cours sur l'équilibre : voir chapitre 6 de [Bas10].

En statique, la somme des moments des forces agissant sur le pied est nulle. Ces moments peuvent être calculés par rapport à n'importe quel point. On choisit comme point, la cheville C , par rapport auquel le moment de \vec{R}_c l'action du tibia et du péroné sur le pied (supposée être appliquée à la cheville) est nul.

Rappelons aussi que d'après la question 2(e)i, le soléaire est tendu. Il exerce donc une force sur le pied dirigée vers le haut et ce, de façon conforme à la figure 3.

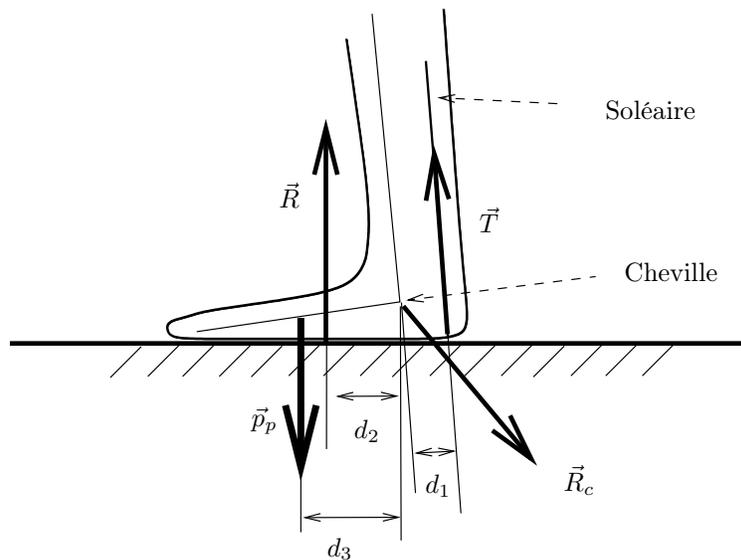


FIGURE 3. Le pied et les différentes forces appliquées, avec leur bras de levier.

En utilisant les conventions de la figure 3, on a successivement :

$$\mathcal{M}_C(\vec{R}_c) = \pm 0 \times R = 0,$$

$$\mathcal{M}_C(\vec{T}) = Td_1,$$

$$\mathcal{M}_C(\vec{R}) = -Rd_2,$$

$$\mathcal{M}_C(\vec{p}_p) = p_p d_3.$$

Dans ces équations, chacune des normes T , R et p_p est positive et chacun des bras de levier est positif. On a donc

$$Td_1 - Rd_2 + p_p d_3 = 0$$

Dans cette équation, seule T est inconnue et il vient

$$T = \frac{Rd_2 - p_p d_3}{d_1}$$

R a été déterminé lors de la question 2a (voir équations (6) et (7)) : il vaut donc $R = mg$. On sait que $p_p = m_1 g$, où m_1 est donné par (13). On a donc

$$T = \frac{mgd_2 - m_1 g d_3}{d_1}. \quad (17)$$

Les bras de levier sont donnés par

$$d_1 = 0.0718 \text{ m},$$

$$d_2 = 0.0445 \text{ m},$$

$$d_3 = 0.0720 \text{ m},$$

et on a donc

$$T = 408.87084 \text{ N}. \quad (18)$$

(3) On étudie maintenant le sujet à l'image numéro $i = 441$, en mouvement.

(a) On cherche à calculer les coordonnées du centre de gravité du pied à l'image $i = 441$ (voir tableaux 6 et 7).

De façon générale, pour calculer les coordonnées du centre de gravité G du segment $[PD]$ où P désigne l'extrémité proximale et D l'extrémité distale, on utilise le coefficient proximal k_P défini par

$$k_P = \frac{GP}{PD}$$

On a alors

$$\begin{cases} x_G = k_P(x_D - x_P) + x_P, \\ y_G = k_P(y_D - y_P) + y_P, \end{cases}$$

On étudie le pied dont l'extrémité proximale P est la cheville et l'extrémité distale D est le métatarse. On sait que

$$x_P = 0.62019,$$

$$x_D = 0.48816,$$

$$y_P = 0.69992,$$

$$y_D = 0.62730$$

On en déduit

$$\begin{cases} x_G = 0.50000 \times (0.48816 - 0.62019) + 0.62019, \\ y_G = 0.50000 \times (0.62730 - 0.69992) + 0.69992 \end{cases}$$

et donc

$$\begin{cases} x_G = 0.55417, \\ y_G = 0.66361 \end{cases}$$

Remarque 4. On peut aussi utiliser le coefficient distal k_D défini par

$$k_D = \frac{GD}{DP}.$$

On rappelle que $k_D + k_P = 1$. Vectoriellement, on a

$$\vec{OG} = k_P \vec{PD} + \vec{OP}, \quad \vec{OG} = k_D \vec{DP} + \vec{OD}.$$

Elles s'écrivent aussi sous les deux formes équivalentes suivantes :

$$\begin{cases} x_G = k_P(x_D - x_P) + x_P, \\ y_G = k_P(y_D - y_P) + y_P, \\ x_G = k_D(x_P - x_D) + x_D, \\ y_G = k_D(y_P - y_D) + y_D. \end{cases}$$

Ces deux formules sont équivalentes puisque $k_D + k_P = 1$. Elles sont aussi équivalentes à

$$\begin{cases} x_G = k_D x_P + k_P x_D, \\ y_G = k_D y_P + k_P y_D. \end{cases}$$

Remarque 5. Ici, puisque $k_P = k_D = 1/2$, le centre de gravité du segment en est le milieu et on aurait pu écrire aussi

$$\begin{cases} x_G = \frac{1}{2}(x_P + x_D), \\ y_G = \frac{1}{2}(y_P + y_D) \end{cases}$$

Remarque 6. Attention, les coefficients correspondants au tronc dans le tableau 5 sont légèrement différents de ceux de votre facicule de cours qui proviennent de calcul réalisés par Winter (ils y valent 0.374 et $1 - 0.374$) ; ils ont été calculés directement à partir d'une expérience faite au CRIS.

- (b) On cherche à déterminer les coordonnées du centre de gravité de tout le corps à l'image $i = 441$ (voir le tableau 8).

Remarquons tout d'abord que l'on peut déterminer toutes les masses des segments, comme on a fait dans la question 2(e)iiA. On obtient alors le tableau 15.

De façon générale, pour déterminer le centre de gravité de l'ensemble de q segments, on suppose connues les coordonnées du centre de gravité numero i x_{G_i} et y_{G_i} de chacun des segments ainsi que chacune des masses correspondantes m_i . On a alors

$$\begin{cases} x_G = \frac{m_1 x_{G_1} + m_2 x_{G_2} + \dots + m_q x_{G_q}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^q m_i x_{G_i}, \\ y_G = \frac{m_1 y_{G_1} + m_2 y_{G_2} + \dots + m_q y_{G_q}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^q m_i y_{G_i}, \end{cases}$$

où

$$M = \sum_{i=1}^q m_i$$

est la somme des masses de chacun des segments. On étudie le centre de gravité de l'ensemble : $\{\text{pied, jambe, cuisse, tronc}\}$, qui contient 4 segments. On a donc

$$\begin{cases} x_G = \frac{m_1 x_{G_1} + m_2 x_{G_2} + \dots + m_4 x_{G_4}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^4 m_i x_{G_i}, \\ y_G = \frac{m_1 y_{G_1} + m_2 y_{G_2} + \dots + m_4 y_{G_4}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^4 m_i y_{G_i}, \end{cases}$$

soit encore

$$\begin{cases} x_G = \frac{1}{70.594} (2.047 \times 0.554 + 6.565 \times 0.532 + 14.119 \times 0.593 + 47.863 \times 0.550), \\ y_G = \frac{1}{70.594} (2.047 \times 0.664 + 6.565 \times 0.929 + 14.119 \times 1.300 + 47.863 \times 1.771), \end{cases}$$

et donc

$$\begin{cases} x_G = \frac{39.322}{70.594}, \\ y_G = \frac{110.567}{70.594}. \end{cases}$$

Il vient finalement

$$\begin{cases} x_G = 0.557, \\ y_G = 1.566 \end{cases}$$

On peut aussi remarquer que les équations donnant x_G et y_G se simplifient sous la forme

$$\begin{cases} x_G = \frac{m_1 x_{G_1} + m_2 x_{G_2} + \dots + m_q x_{G_q}}{M} = \sum_{i=1}^q \frac{m_i}{M} x_{G_i}, \\ y_G = \frac{m_1 y_{G_1} + m_2 y_{G_2} + \dots + m_q y_{G_q}}{M} = \sum_{i=1}^q \frac{m_i}{M} y_{G_i} \end{cases}$$

où chaque coefficient m_i/M est le rapport entre la masse de chaque segment et la masse totale, donné dans les tables. On a donc

$$\begin{cases} x_G = (m_1/M)x_{G_1} + (m_2/M)x_{G_2} + \dots + (m_4/M)x_{G_4} = \sum_{i=1}^4 \frac{m_i}{M} x_{G_i}, \\ y_G = (m_1/M)y_{G_1} + (m_2/M)y_{G_2} + \dots + (m_4/M)y_{G_4} = \sum_{i=1}^4 \frac{m_i}{M} y_{G_i}. \end{cases}$$

soit encore

$$\begin{cases} x_G = 0.029 \times 0.554 + 0.093 \times 0.532 + 0.200 \times 0.593 + 0.678 \times 0.550, \\ y_G = 0.029 \times 0.664 + 0.093 \times 0.929 + 0.200 \times 1.300 + 0.678 \times 1.771, \end{cases}$$

Il vient finalement

$$\begin{cases} x_G = 0.557, \\ y_G = 1.566 \end{cases}$$

- (c) (i) On cherche à déterminer l'abscisse et l'ordonnée de la vitesse du centre de gravité du pied entre les images $i - 1 = 440$ et $i = 441$ (voir tableaux 9 et 10).

On rappelle que la vitesse instantanée d'un point entre les instants t_A et t_B est approchée par la vitesse moyenne. Si le point étudié est se trouve au point A en t_A et se trouve au point B en t_B , on a donc

$$\vec{v}_{A,B} \approx \frac{\overrightarrow{\Delta OM}}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{AB}}{t_B - t_A} = \begin{pmatrix} \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} \\ \frac{y_B - y_A}{t_B - t_A} \end{pmatrix}.$$

Si la fréquence d'acquisition est égale à f_e , on a $t_B - t_A = 1/f_e$ et donc, puisque $1/(1/f_e) = f_e$,

$$\vec{v} = f_e \begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \end{pmatrix}.$$

Cette vitesse est une approximation de la vitesse au milieu de l'intervalle $[t_A, t_B]$. On étudie le centre de gravité du pied entre les instants $t_A = t_{i-1}$ et $t_A = t_i$. La fréquence d'acquisition est égale à $f_e = 1000$. On a donc

$$\vec{v} = f_e \begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \end{pmatrix} = 1000 \times \begin{pmatrix} 0.55417 - 0.55426 \\ 0.66361 - 0.66327 \end{pmatrix}$$

Cette vitesse est une approximation de la vitesse instantanée au milieu de $[t_A = t_{i-1}, t_B = t_i]$. De façon numérique, on a alors

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} -0.09011 \\ 0.34248 \end{pmatrix}$$

Remarque 7. Dans le traitement mathématique envisagé pour nettoyer les données, il est possible de calculer les vitesses exactes par dérivation. On a donné dans les tableaux 16 et 17, les erreurs commises en remplaçant les vitesses approchées des tableaux 9 et 10 par les dérivées exactes. Ces erreurs sont «petites».

- (ii) On cherche à déterminer l'abscisse et l'ordonnée de l'accélération du gravité du pied à l'image $i = 441$ (voir tableaux 11 et 12).

On suppose que l'on a calculé \vec{v}_a , approximation de la vitesse au milieu de l'intervalle $[t_A, t_B]$ et \vec{v}_b , approximation de la vitesse au milieu de l'intervalle $[t_B, t_C]$. On rappelle que l'accélération instantanée est approchée par l'accélération moyenne. On a donc

$$\vec{a} \approx \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_b - \vec{v}_a}{\Delta t}$$

La variation de temps entre le milieu de $[t_A, t_B]$ et le milieu de $[t_B, t_C]$ est égale à la variation de temps entre t_A et t_B ou t_B et t_C , elle-même égale à $1/f_e$; on a donc

$$\vec{a} \approx f_e \begin{pmatrix} v_{B,x} - v_{A,x} \\ v_{B,y} - v_{A,y} \end{pmatrix}$$

Cette accélération est une approximation de l'accélération à l'instant t_B . On étudie le centre de gravité du pied entre le milieu de $[t_A = t_{i-1}, t_A = t_i]$ et le milieu de $[t_B = t_i, t_C = t_{i+1}]$. La fréquence d'acquisition est égale à $f_e = 1000$. On a donc

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0.65779 \\ 6.73218 \end{pmatrix}$$

Cette accélération est une approximation de l'accélération à l'instant $t_B = t_i$.

Remarque 8. Comme pour la remarque 7, on a donné dans les tableaux 18 et 19, les erreurs commises en remplaçant les accélérations approchées des tableaux 11 et 12 par les dérivées exactes. Ces erreurs sont «petites».

- (iii) Cette question est identique à celle de la question 2(e)iiB. Ce système (les deux pieds) est soumis à :

- Son poids, \vec{p}_p ;
- l'action du sol sur le pied, \vec{R} ;
- l'action de la jambe sur le pied, \vec{R}_{jp} .

Le poids du pied est toujours défini par (14) (sauf qu'on est à l'image 441).

De même, l'action du sol sur le pied, égale à l'action du sol sur le sujet peut-être lue dans le tableau 1. On peut donc lire

$$R_x = 265.19380 \quad (19)$$

$$R_y = 1786.75833. \quad (20)$$

D'après la RFD, en dynamique,

$$\vec{p}_p + \vec{R} + \vec{R}_{jp} = m_1 \vec{a}_{G,\text{pied}}$$

On a donc

$$\vec{R}_{jp} = -\vec{p}_p - \vec{R} + m_1 \vec{a}_{G,\text{pied}}$$

et

$$R_{jp,x} = -R_x + m_1 a_{G,\text{pied},x},$$

$$R_{jp,y} = m_1 g - R_x + m_1 a_{G,\text{pied},y}.$$

Grâce aux tableaux 11 et 12, il vient

$$m_1 a_{G,\text{pied},x} = 1.34664$$

$$m_1 a_{G,\text{pied},y} = 13.78231.$$

On a donc

$$R_{jp,x} = -263.84716$$

$$R_{jp,y} = -1752.89271.$$

- (d) (i) Les deux forces externes agissant sur le système corps en entier sont la réaction d'appui \vec{R} , déjà définie par (19) et (20). Le poids a déjà été défini par (3).

On pourrait, pour déterminer la réaction d'appui, procéder autrement en utilisant la RFD qui donne (pour le corps complet)

$$R_x = m a_{G,x}, \quad (21a)$$

$$R_y = m g + m a_{G,y}. \quad (21b)$$

En utilisant le tableau 14, on aurait donc numériquement

$$R_x = 282.43820 \quad (22)$$

$$R_y = 1834.74468. \quad (23)$$

En comparant avec (19) et (20), on constate un léger écart. Voir la remarque 3.

De façon plus générale, on peut comparer, à chaque instant, la réaction d'appui expérimentale avec celle calculée grâce à (21).

Voir la figure 4 page ci-contre.

- (ii) Pour déterminer les réactions d'appuis agissant sur la jambe à l'instant $i = 441$, on procède comme dans la question 3(c)iii. Ce système est soumis à :
- Son poids, \vec{p}_j ;
 - L'action du pied sur la jambe ;
 - L'action de la cuisse sur le pied.

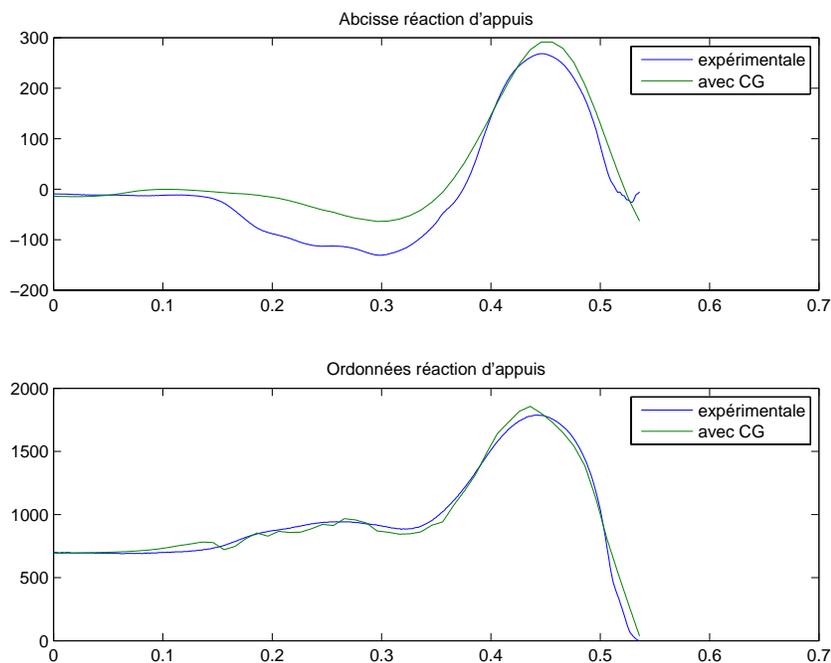
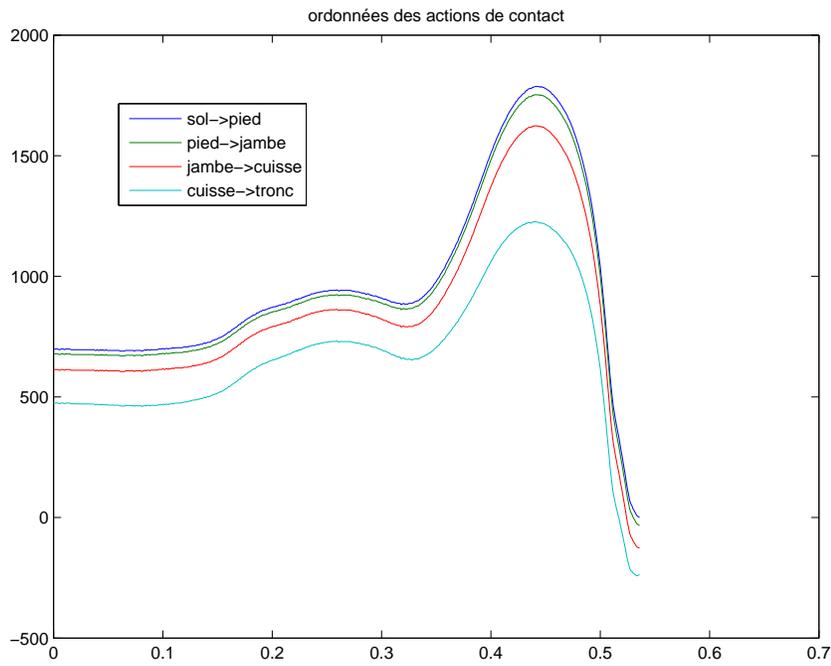
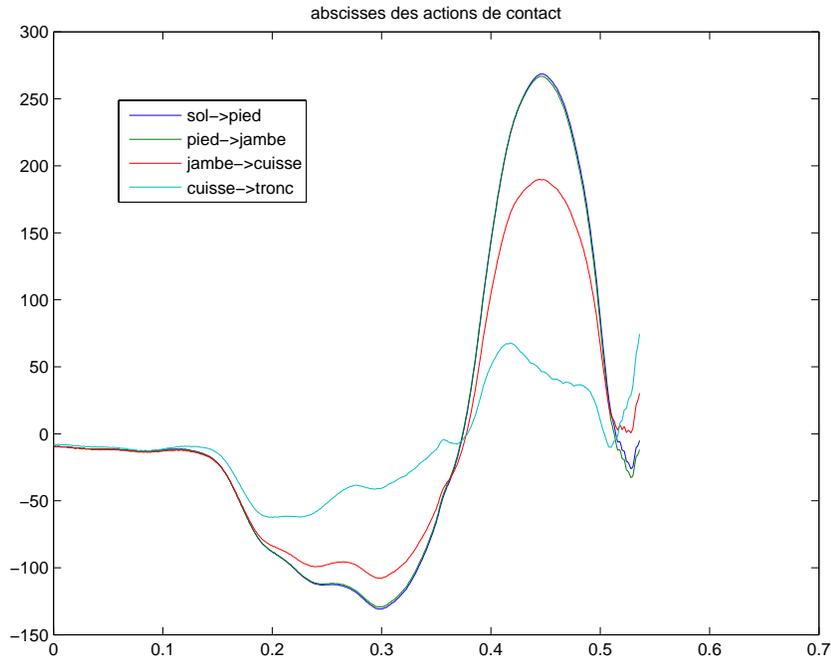


FIGURE 4. Deux calculs des réactions d'appui.

Le poids de la jambe se calcule facilement. D'après le principe de l'action et de la réaction, l'action du pied sur la jambe est l'opposé de l'action de la jambe sur le pied, définie dans la question 3(c)iii. Enfin, la troisième force, l'action de la cuisse sur le pied, se détermine grâce à la RFD et la connaissance de l'accélération du centre de gravité de la cuisse.

On pourrait de la même façon déterminer l'action de la cuisse sur la hanche, en appliquant la RFD à la cuisse uniquement. Cette détermination de tous les efforts internes, dits interarticulaires, s'appelle la dynamique inverse.

Voir les figures 5 et 6.



Correction de l'exercice 2.

- (1) • Temps (MB) :

$$v = \frac{d}{t} \iff t = \frac{d}{v} = \frac{400}{1.16} = 344,9 \text{ s}$$

- Vitesse (Ci)

$$v = \frac{d}{t} = \frac{400}{307,6} = 1,30 \text{ ms}^{-1}$$

- Amplitude (Ci)

$$A = \frac{d}{n} = \frac{400}{319,9} = 1,24 \text{ m}$$

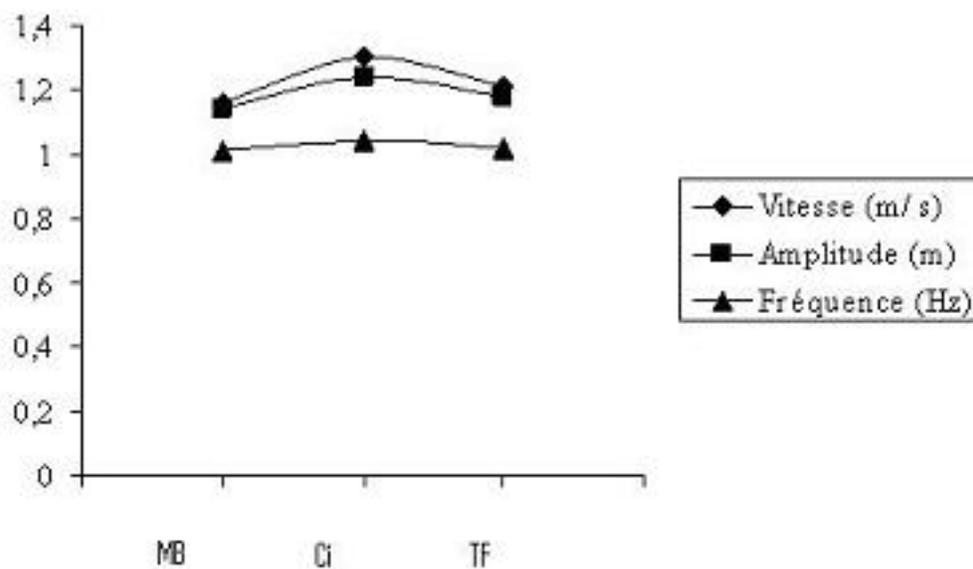
- Fréquence (Ci)

$$f = \frac{n}{t} = \frac{319,9}{307,6} = 1,04 \text{ Hz}$$

- Nombre de foulées (TF)

$$n = Ft = 1,02 \times 329,6 = 336,2$$

- (2)



- (3) La vitesse la plus élevée est obtenue pour la condition Ci puis TF puis MB. Ces variations de vitesse sont en relation avec les variations d'amplitude, la fréquence étant quasi-constante quelle que soit la condition expérimentale
- (4) (a) Pour les hommes et les femmes, le poignet sort de l'eau en avant de son point d'entrée. Ce point est plus avancé chez les femmes. Les trajectoires aquatiques ont une allure similaire avec quelques similitudes (le point le plus avancé est identique) et différences (trajectoire plus profonde et recul plus important chez et une surface de trajectoire plus grande chez les hommes).

- (b) Une poulaine est la représentation de la trajectoire d'une articulation par rapport à une autre articulation (repère interne). Dans ce cas, il aurait été judicieux de choisir l'épaule, axe de rotation du membre supérieur au cours du cycle de bras. Ainsi la la représentation de la trajectoire du poignet par rapport à l'épaule (origine du nouveau repère) aurait pu être tracée.

Cette poulaine aurait été obtenue comme suit : Il s'agit de calculer les coordonnées du poignet P dans un repère lié à l'épaule E , donc les coordonnées du vecteur \overrightarrow{EP} , sachant que l'on connaît les coordonnées de E par rapport à O , \overrightarrow{OE} et de P par rapport à O , \overrightarrow{OP} , O étant l'origine du repère externe.

$$\overrightarrow{EP} = \overrightarrow{EO} + \overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OE}$$

Donc

$$P/E = \begin{cases} x_{P/E} = x_P - x_E, \\ y_{P/E} = y_P - y_E \end{cases}$$

Ensemble des tableaux

instants	R_x	R_y
1	-9.394	698.306
439	263.387	1783.931
440	264.471	1783.931
441	265.194	1786.758
442	266.278	1786.758
443	267.000	1786.758

TABLE 1. Quelques réactions d'appuis mesurées

pied	0.029
jambe	0.093
cuisse	0.200
tronc	0.678

TABLE 2. Rapports (éventuellement doublés) entre de la masse de chaque segment par la masse totale

instants	métatarse	cheville	genou	hanche	épaule
1	0.49088	0.63497	0.52798	0.82496	0.34114
439	0.48823	0.62048	0.46480	0.69168	0.44362
440	0.48819	0.62033	0.46509	0.69084	0.44449
441	0.48816	0.62019	0.46540	0.69000	0.44536
442	0.48812	0.62004	0.46573	0.68916	0.44624
443	0.48809	0.61990	0.46607	0.68833	0.44711

TABLE 3. Quelques abscisses de capteurs

instants	métatarse	cheville	genou	hanche	épaule
1	0.62700	0.68104	1.08909	1.38590	1.72000
439	0.62689	0.69897	1.10283	1.44649	2.00686
440	0.62709	0.69944	1.10351	1.44766	2.00915
441	0.62730	0.69992	1.10420	1.44885	2.01145
442	0.62751	0.70041	1.10491	1.45007	2.01376
443	0.62773	0.70090	1.10562	1.45131	2.01609

TABLE 4. Quelques ordonnées de capteurs

	proximal	distal
pied	0.500	0.500
jambe	0.433	0.567
cuisse	0.433	0.567
tronc	0.572	0.428

TABLE 5. Coefficients proximaux et distaux des centres de masse des segments

instants	pied	jambe	cuisse	tronc
1	0.56292	0.57431	0.69637	0.54803
439	0.55435	0.53221	0.59344	0.54969
440	0.55426	0.53231	0.59309	0.54983
441	0.55417	0.53242	0.59275	0.54997
442	0.55408	0.53255	0.59241	0.55012
443	0.55399	0.53268	0.59209	0.55026

TABLE 6. Quelques abscisses de centres de masse des segments

instants	pied	jambe	cuisse	tronc
1	0.65402	0.91240	1.25738	1.57714
439	0.66293	0.92796	1.29768	1.76724
440	0.66327	0.92855	1.29864	1.76905
441	0.66361	0.92915	1.29962	1.77087
442	0.66396	0.92976	1.30062	1.77272
443	0.66431	0.93038	1.30163	1.77458

TABLE 7. Quelques ordonnées de centres de masse des segments

instants	abscisses	ordonnées
1	0.58057	1.42460
439	0.55695	1.56325
440	0.55698	1.56473
441	0.55702	1.56623
442	0.55706	1.56775
443	0.55710	1.56928

TABLE 8. Quelques coordonnées de centre de masse du corps

	pied	jambe	cuisse	tronc
entre les images 439 et 440	-0.09074	0.10055	-0.35212	0.13963
entre les images 440 et 441	-0.09011	0.11200	-0.34250	0.14106
entre les images 441 et 442	-0.08946	0.12350	-0.33281	0.14250
entre les images 442 et 443	-0.08877	0.13504	-0.32304	0.14394

TABLE 9. Quelques abscisses de vitesse de centres de masse des segments

	pied	jambe	cuisse	tronc
entre les images 439 et 440	0.33582	0.59047	0.95865	1.81094
entre les images 440 et 441	0.34248	0.60019	0.97697	1.82789
entre les images 441 et 442	0.34922	0.60996	0.99532	1.84472
entre les images 442 et 443	0.35602	0.61977	1.01370	1.86141

TABLE 10. Quelques ordonnées de vitesse de centres de masse des segments

	pied	jambe	cuisse	tronc
à l'image 440	0.62980	11.45146	9.62004	1.43351
à l'image 441	0.65779	11.49746	9.69376	1.43626
à l'image 442	0.68577	11.54347	9.76749	1.43901

TABLE 11. Quelques abscisses d'accélération de centres de masse des segments

	pied	jambe	cuisse	tronc
à l'image 440	6.66194	9.71842	18.32451	16.95495
à l'image 441	6.73218	9.76530	18.35168	16.82348
à l'image 442	6.80242	9.81217	18.37886	16.69202

TABLE 12. Quelques ordonnées d'accélération de centres de masse des segments

	abscisse	ordonnée
entre les images 439 et 440	0.03096	1.48420
entre les images 440 et 441	0.03494	1.50045
entre les images 441 et 442	0.03894	1.51663
entre les images 442 et 443	0.04296	1.53274

TABLE 13. Quelques vitesses du centre de masse du corps

	abscisse	ordonnée
à l'image 440	3.97918	16.25737
à l'image 441	4.00088	16.18006
à l'image 442	4.02258	16.10276

TABLE 14. Quelques accélérations du centre de masse du corps

pied	2.047
jambe	6.565
cuisse	14.119
tronc	47.863

TABLE 15. Masse de chaque segment

	pied	jambe	cuisse	tronc
entre les images 439 et 440	$1.165 \cdot 10^{-6}$	$1.917 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$1.145 \cdot 10^{-7}$
entre les images 440 et 441	$1.165 \cdot 10^{-6}$	$1.917 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$1.145 \cdot 10^{-7}$
entre les images 441 et 442	$1.165 \cdot 10^{-6}$	$1.917 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$1.145 \cdot 10^{-7}$
entre les images 442 et 443	$1.165 \cdot 10^{-6}$	$1.917 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$1.145 \cdot 10^{-7}$

TABLE 16. Quelques erreurs sur les abscisses de vitesse de centres de masse des segments

	pied	jambe	cuisse	tronc
entre les images 439 et 440	$2.927 \cdot 10^{-6}$	$1.953 \cdot 10^{-6}$	$1.131 \cdot 10^{-6}$	$5.477 \cdot 10^{-6}$
entre les images 440 et 441	$2.927 \cdot 10^{-6}$	$1.953 \cdot 10^{-6}$	$1.131 \cdot 10^{-6}$	$5.477 \cdot 10^{-6}$
entre les images 441 et 442	$2.927 \cdot 10^{-6}$	$1.953 \cdot 10^{-6}$	$1.131 \cdot 10^{-6}$	$5.477 \cdot 10^{-6}$
entre les images 442 et 443	$2.927 \cdot 10^{-6}$	$1.953 \cdot 10^{-6}$	$1.131 \cdot 10^{-6}$	$5.477 \cdot 10^{-6}$

TABLE 17. Quelques erreurs sur les ordonnées de vitesse de centres de masse des segments

	pied	jambe	cuisse	tronc
à l'image 440	$8.907 \cdot 10^{-11}$	$2.164 \cdot 10^{-12}$	$1.2 \cdot 10^{-10}$	$8.458 \cdot 10^{-11}$
à l'image 441	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$2.626 \cdot 10^{-12}$	$3.318 \cdot 10^{-11}$	$8.737 \cdot 10^{-13}$
à l'image 442	$3.103 \cdot 10^{-11}$	$2.145 \cdot 10^{-10}$	$1.665 \cdot 10^{-10}$	$1.974 \cdot 10^{-10}$

TABLE 18. Quelques erreurs sur les abscisses d'accélération de centres de masse des segments

	pied	jambe	cuisse	tronc
à l'image 440	$1.613 \cdot 10^{-10}$	$4.123 \cdot 10^{-11}$	$3.545 \cdot 10^{-10}$	$3.68 \cdot 10^{-11}$
à l'image 441	$7.940 \cdot 10^{-11}$	$1.596 \cdot 10^{-10}$	$1.211 \cdot 10^{-10}$	$2.359 \cdot 10^{-10}$
à l'image 442	$1.240 \cdot 10^{-10}$	$2.741 \cdot 10^{-11}$	$3.746 \cdot 10^{-10}$	$2.803 \cdot 10^{-10}$

TABLE 19. Quelques erreurs sur les ordonnées d'accélération de centres de masse des segments

Références

[Bas10] Jérôme Bastien. Biomécanique du mouvement. Notes de cours, disponibles sur le web : <http://utbmjb.chez-alice.fr/UFRSTAPS/index.html>, rubrique L2 Bioméca, 2010.