

8 LA BIOMÉCANIQUE

8.1 THÉORIE

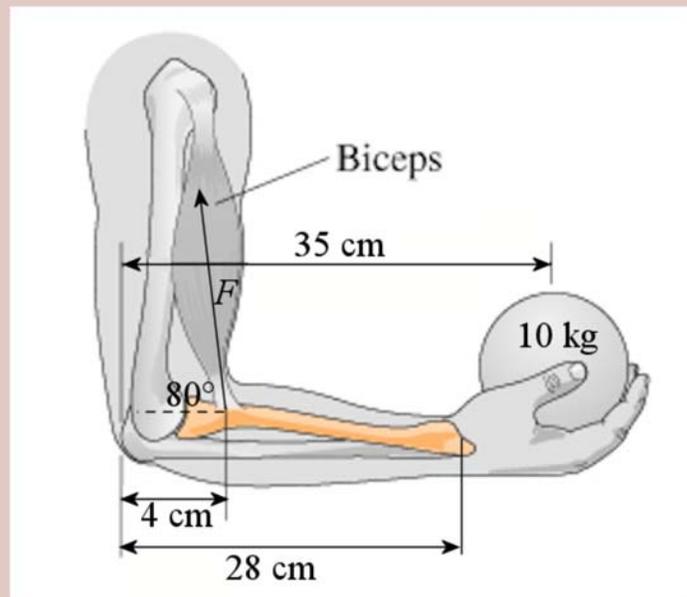
Il s'agit simplement d'appliquer les conditions d'équilibre statique au corps humain.

8.2 EXEMPLES

Exemple 8.2.1

Dans la situation montrée sur la figure,...

- quelle est la force exercée par le biceps de cette personne de 60 kg ?
- quelle sont les composantes H et V de la force exercée sur le radius et le cubitus par l'humérus (force fait par le pivot au coude) ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/pss-81-static-equilibrium-problems-learning-goal-practice-problem-solving-strategy-81-stat-q4480638

Les forces sur l'avant-bras et la main sont

- 1) La force de gravitation sur l'avant-bras et la main
- 2) La normale faite par la balle. Cette force est vers le bas et elle est égale au poids de la balle (98 N)
- 3) La force faite par le biceps
- 4) Les forces exercées par le pivot, qui est le coude (H et V)

On doit premièrement trouver le poids de l'avant-bras et de la main avec la table de Winter. Puisque la personne a une masse de 60 kg, la masse de l'avant-bras et de la main est

$$m = 0,022 \cdot 60\text{kg} = 1,32\text{kg}$$

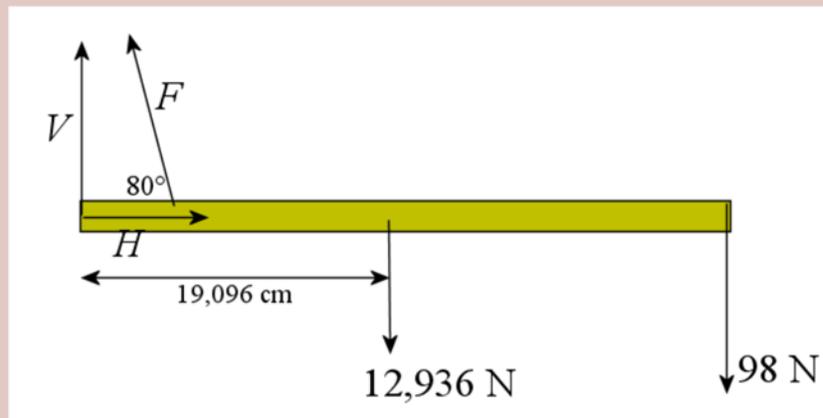
Le poids de l'avant-bras et de la main est donc de

$$P = 1,32\text{kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 12,936\text{N}$$

La distance entre le coude et le centre de masse du segment avant-bras et main est

$$\begin{aligned} x &= 0,682 \cdot \text{distance coude-poignet} \\ &= 0,682 \cdot 28\text{cm} \\ &= 19,096\text{cm} \end{aligned}$$

En simplifiant un peu la forme de l'avant-bras et de la main, on a donc les forces suivantes.



Le tableau des forces est donc

Forces	x	y	τ
Poids avant-bras et main	0	-12,936 N	-12,936 N x 0,19096 m x sin90° = -2,4703 Nm
Poids balle	0	-98 N	-98 N x 0,35 m x sin90° = -34,3 Nm
Muscle	$F \cos 100^\circ$	$F \sin 100^\circ$	$F \times 0,04 \text{ m} \times \sin 80^\circ$ $= F \times 0,03939 \text{ m}$
Pivot (coude)	H	V	0

Les équations d'équilibre sont donc

$$\begin{aligned}\sum F_x &= F \cos(100^\circ) + H = 0 \\ \sum F_y &= -12,936N - 98N + F \sin(100^\circ) + V = 0 \\ \sum \tau &= -2,4703Nm - 34,3Nm + F \cdot 0,03939m = 0\end{aligned}$$

La dernière équation nous permet de trouver la force faite par le biceps

$$\begin{aligned}-2,4703Nm - 34,3Nm + F \cdot 0,03939m &= 0 \\ -36,7703Nm + F \cdot 0,03939m &= 0 \\ -36,7703Nm + F \cdot 0,03939m + 36,7703Nm &= 0 + 36,7703Nm \\ F \cdot 0,03939m &= 36,7703Nm \\ \frac{F \cdot 0,03939m}{0,03939m} &= \frac{36,7703Nm}{0,03939m} \\ F &= \frac{36,7703Nm}{0,03939m} \\ F &= 933,4N\end{aligned}$$

C'est la force faite par le biceps.

On peut maintenant utiliser cette valeur de F dans les équations des forces en x et y pour trouver les valeurs de H et V .

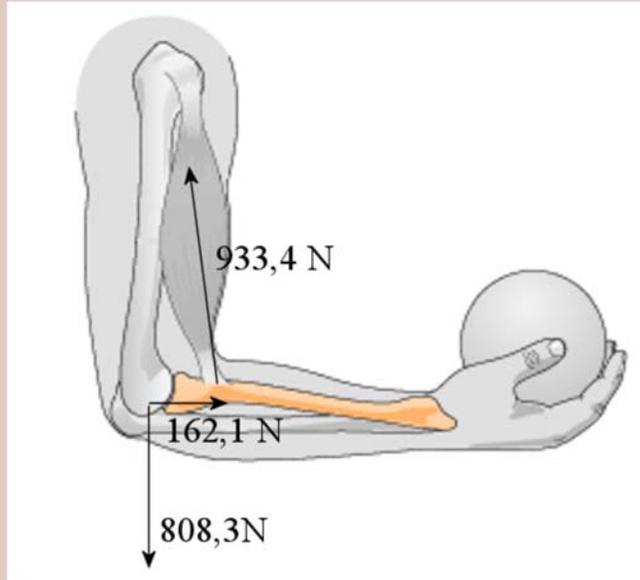
Pour H , on a

$$\begin{aligned}F \cos(100^\circ) + H &= 0 \\ 933,4N \cdot \cos(100^\circ) + H &= 0 \\ -162,1N + H &= 0 \\ -162,1N + H + 162,1N &= 0 + 162,1N \\ H &= 162,1N\end{aligned}$$

Pour V , on a

$$\begin{aligned}-12,936N - 98N + F \sin(100^\circ) + V &= 0 \\ -12,936N - 98N + 933,4N \sin(100^\circ) + V &= 0 \\ 808,3N + V &= 0 \\ 808,3N + V - 808,3N &= 0 - 808,3N \\ V &= -808,3N\end{aligned}$$

On a donc les forces suivantes



Quelques commentaires sur cet exemple

1) Une force plus grande que le poids à soulever

La force faite par le muscle est nettement plus grande que le poids qu'on soulève. Le muscle doit faire une force de 933,4 N pour soulever un poids de 98 N avec la main. C'est une force près de 10 fois plus grande que le poids de la balle. Il en est ainsi parce que le muscle est attaché très près du coude. La force du muscle serait plus petite si le muscle était attaché plus loin du coude. Toutefois, dans ce cas, le muscle étirerait trop quand on déplierait notre membre supérieur.

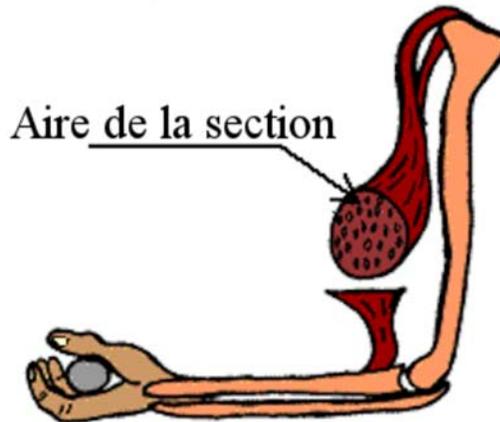
2) Un contact important entre les os de l'articulation

On voit qu'une partie importante de la force de muscle provoque un contact plus fort entre les os du coude. En tirant vers le haut, le biceps écrase les os de l'avant-bras sur l'humérus, l'humérus répond en faisant une force de 808,2 N vers le bas sur l'avant-bras. Le muscle tire aussi un peu dans le sens horizontal, ce qui pousse aussi l'avant-bras vers l'humérus. L'humérus pousse alors sur l'avant-bras avec une force de 162,1 N pour contrer la force horizontale du muscle.

3) La force que peut faire un muscle

On peut se demander si le muscle peut déployer une telle force de 933,4 N. Cela va dépendre de la grosseur du muscle. En fait, cela se mesure avec la section du muscle. La section est l'aire du muscle qu'on aurait si on coupait le muscle dans le sens

perpendiculaire à sa longueur. (Il faut prendre le mot section dans le sens de *coupure*, comme dans sectionner)

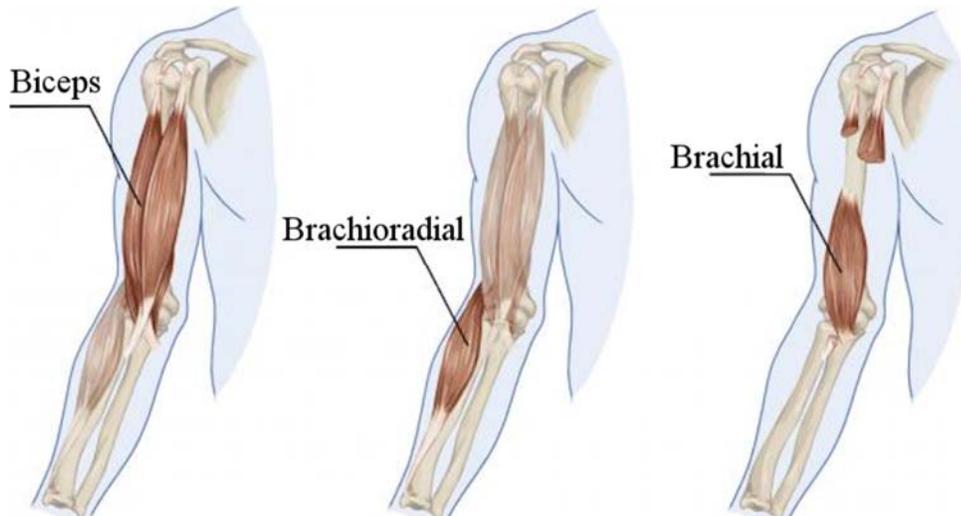


www.ftexploring.com/think/superbugs_p2.html

La force qu'un muscle peut déployer est entre 80 N et 100 N par cm^2 de section. Il faudrait donc une section de près de 10 cm^2 pour pouvoir faire une force de 933,4 N. Cela correspond à un muscle ayant un diamètre d'environ 3,5 cm, ce qui est une valeur qui semble possible pour un biceps.

4) *Plusieurs muscles font la force*

En réalité, la force qui maintient l'avant-bras ne provient pas uniquement du biceps. Il y a aussi le muscle brachial et le muscle brachioradial qui peuvent aussi faire des forces sur l'avant-bras.

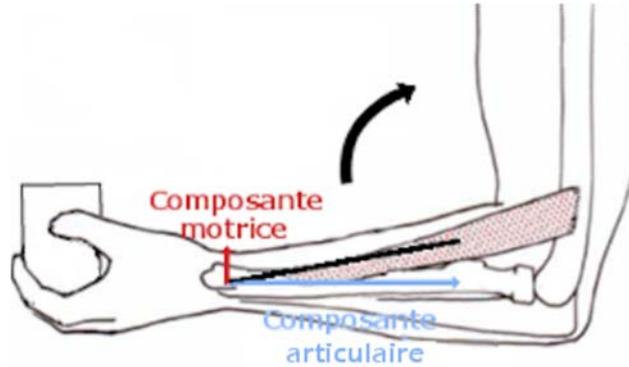


breakingmuscle.com/strength-conditioning/two-jointed-muscles-of-the-arms-how-to-train-them

Nous avons négligé ces muscles dans notre exemple.

5) *Les composantes de la force musculaire*

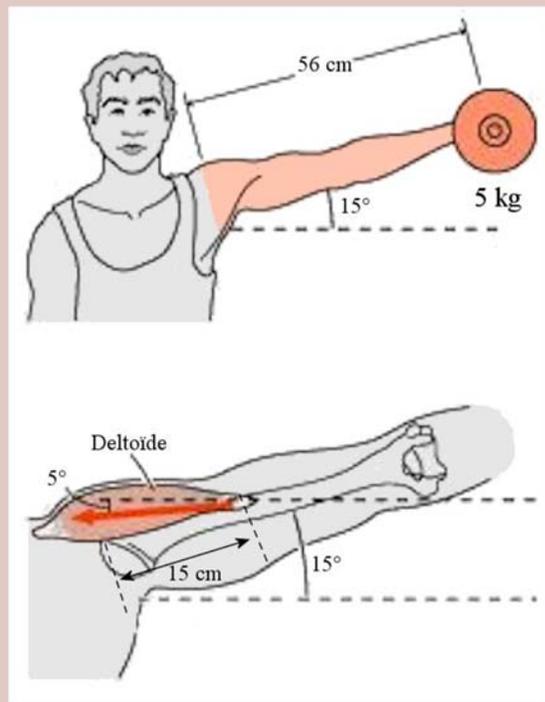
On peut séparer la force faite par un muscle en deux composantes : une composante perpendiculaire au membre (composante motrice) et une composante parallèle au membre (composante articulaire). Par exemple, voici ces composantes pour le muscle brachioradial sur l'avant-bras.



calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/anat/new/biom.htm

Exemple 8.2.2

Lars tient un haltère dans sa main dans la position montrée sur la figure. Lars a une masse de 60 kg, et il y a 50 cm entre son épaule et son poignet.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/figure-shows-outstretched-arm-mass-40-rm-kg--arm-56-rm-cm-long-center-gravity-21-rm-cm-sho-q1058541

- a) Quelle est la force exercée par le deltoïde ?
- b) Quelles sont les composantes H et V de la force exercée sur l'humérus par l'épaule (force faite par le pivot à l'épaule) ?

Les forces sur le membre supérieur sont

- 1) La force de gravitation sur le membre supérieur
- 2) La normale faite par l'haltère. Cette force est vers le bas et elle est égale au poids de l'haltère (49 N)
- 3) La force faite par le muscle deltoïde
- 4) Les forces exercées par le pivot, qui est l'épaule (H et V)

On doit premièrement trouver le poids du membre supérieur avec la table de Winter. Puisque la personne a une masse de 60 kg, la masse du membre supérieur est

$$m = 0,050 \cdot 60\text{kg} = 3\text{kg}$$

Le poids du membre supérieur est donc de

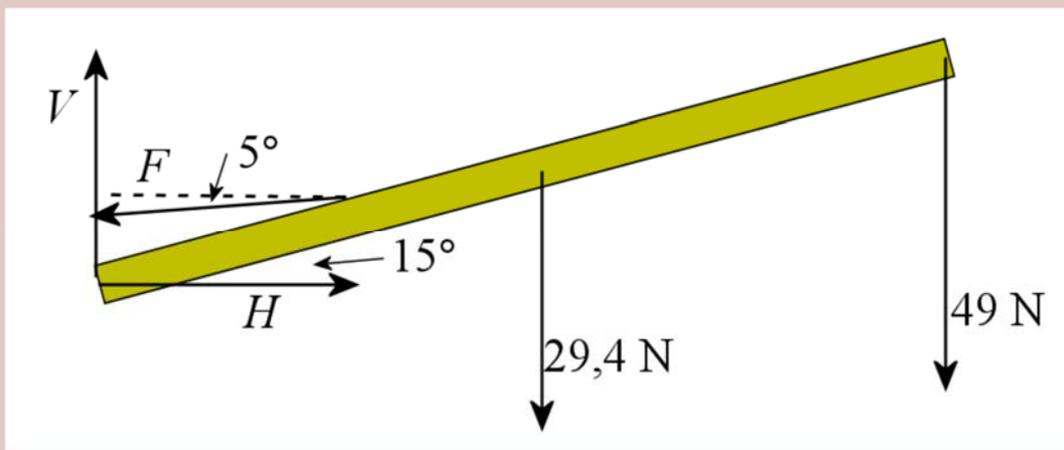
$$P = 3\text{kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 29,4\text{N}$$

La distance entre l'épaule et le centre de masse du membre supérieur est

$$\begin{aligned} x &= 0,530 \cdot \text{distance épaule-poignet} \\ &= 0,530 \cdot 50\text{cm} \\ &= 26,5\text{cm} \end{aligned}$$

(En fait, on triche un peu parce que la valeur dans la table de Winter donne la position du centre de masse quand la main est tenue droite, ce qui n'est pas le cas ici. On va négliger cette différence)

En simplifiant un peu la forme du membre supérieur, on a donc les forces suivantes.



Le tableau des forces est donc

Forces	x	Y	τ
Poids membre supérieur	0	-29,4 N	$-29,4 \text{ N} \times 0,265 \text{ m} \times \sin 75^\circ$ $= -7,526 \text{ Nm}$
Poids haltère	0	-49 N	$-49 \text{ N} \times 0,56 \text{ m} \times \sin 75^\circ$ $= -26,505 \text{ Nm}$
Muscle	$F \cos 185^\circ$	$F \sin 185^\circ$	$F \times 0,15 \text{ m} \times \sin 10^\circ$ $= F \times 0,026047 \text{ m}$
Pivot (épaule)	H	V	0

Les équations d'équilibre sont donc

$$\sum F_x = F \cos(185^\circ) + H = 0$$

$$\sum F_y = -29,4 \text{ N} - 49 \text{ N} + F \sin(185^\circ) + V = 0$$

$$\sum \tau = -7,526 \text{ Nm} - 26,505 \text{ Nm} + F \cdot 0,026047 \text{ m} = 0$$

La dernière équation nous permet de trouver la force faite par le biceps

$$-7,526 \text{ Nm} - 26,505 \text{ Nm} + F \cdot 0,026047 \text{ m} = 0$$

$$-33,031 \text{ Nm} + F \cdot 0,026047 \text{ m} = 0$$

$$-33,031 \text{ Nm} + F \cdot 0,026047 \text{ m} + 33,031 \text{ Nm} = 0 + 33,031 \text{ Nm}$$

$$F \cdot 0,026047 \text{ m} = 33,031 \text{ Nm}$$

$$\frac{F \cdot 0,026047 \text{ m}}{0,026047 \text{ m}} = \frac{33,031 \text{ Nm}}{0,026047 \text{ m}}$$

$$F = \frac{33,031 \text{ Nm}}{0,026047 \text{ m}}$$

$$F = 1268,1 \text{ N}$$

C'est la force faite par le deltoïde.

On peut maintenant utiliser cette valeur de F dans les équations des forces en x et y pour trouver les valeurs de H et V .

Pour H , on a

$$F \cos(185^\circ) + H = 0$$

$$1268,1 \text{ N} \cdot \cos(185^\circ) + H = 0$$

$$-1263,3 \text{ N} + H = 0$$

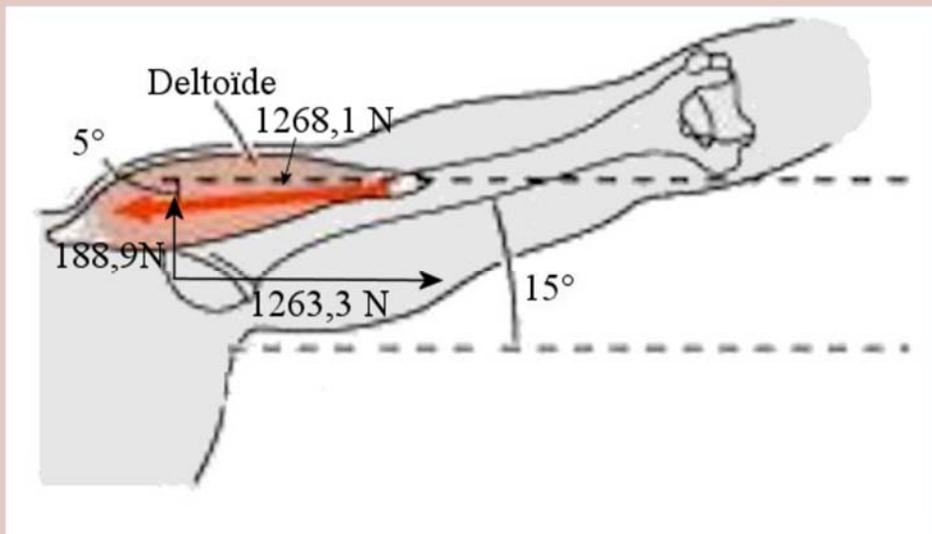
$$-1263,3 \text{ N} + H + 1263,3 \text{ N} = 0 + 1263,3 \text{ N}$$

$$H = 1263,3 \text{ N}$$

Pour V , on a

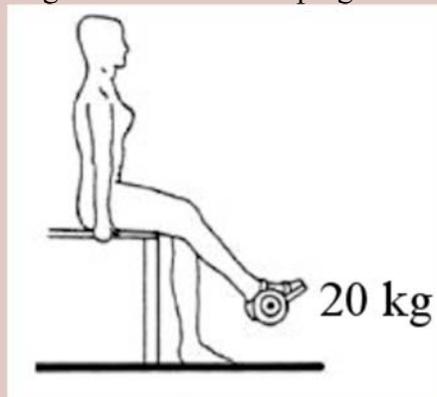
$$\begin{aligned}
 -29,4N - 49N + F \sin(185^\circ) + V &= 0 \\
 -29,4N - 49N + 1268,1N \sin(185^\circ) + V &= 0 \\
 -188,9N + V &= 0 \\
 -188,9N + V + 188,9N &= 0 + 188,9N \\
 V &= 188,9N
 \end{aligned}$$

On a donc les forces suivantes



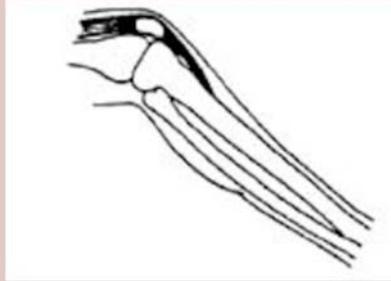
Exemple 8.2.3

Romane tient sa jambe dans la position montrée sur la figure. Romane a une masse de 50 kg, et il y a 40 cm entre son genou et sa cheville poignet. L'haltère est à 48 cm du genou.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-exercises-quadiceps-shown-diagram-right-shows-model-leg-person-s-lower-leg-length--q6073435

La force qui maintient la jambe dans cette position est faite par le quadriceps, un muscle de la cuisse qui est reliée tibia par un tendon.



En passant par-dessus la rotule, le tendon tire avec un angle de 15° sur le tibia. Le point d'attache du muscle est à 12 cm du genou.

- a) Quelle est la force exercée par le quadriceps ?
- b) Quelle sont les composantes H et V de la force exercée sur le tibia par le genou (force fait par le pivot au genou) ?

Les forces sur la jambe sont

- 1) La force de gravitation sur la jambe et le pied
- 2) La force faite par l'haltère. Cette force est vers le bas et elle est égale au poids de l'haltère (198 N)
- 3) La force faite par le quadriceps
- 4) Les forces exercées par le pivot, qui est le genou (H et V)

On doit premièrement trouver le poids de la jambe et du pied avec la table de Winter. Puisque la personne a une masse de 50 kg, la masse de la jambe et du pied est

$$m = 0,061 \cdot 50\text{kg} = 3,05\text{kg}$$

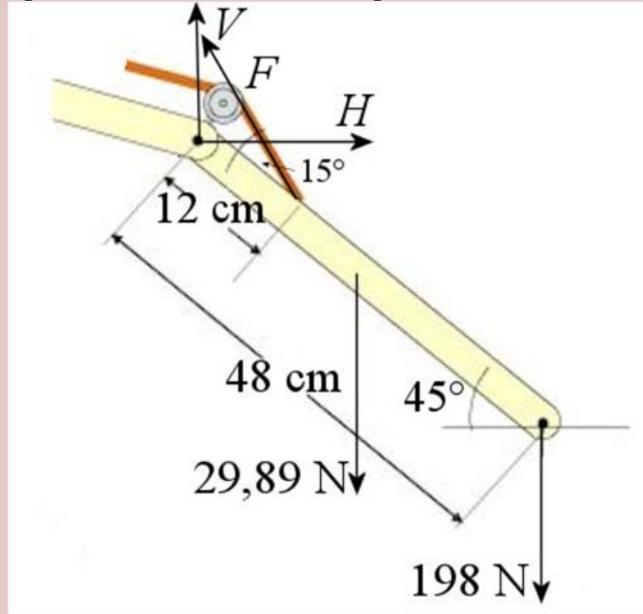
Le poids de la jambe et du pied est donc de

$$P = 3,05\text{kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 29,89\text{N}$$

La distance entre le genou et le centre de masse de la jambe et du pied est

$$\begin{aligned} x &= 0,606 \cdot \text{distance genou-cheville} \\ &= 0,606 \cdot 40\text{cm} \\ &= 24,24\text{cm} \end{aligned}$$

En simplifiant un peu la forme du membre supérieur, on a donc les forces suivantes.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-exercises-quadiceps-shown-diagram-right-shows-model-leg-person-s-lower-leg-length-q6073435

Le tableau des forces est donc

Forces	x	y	τ
Poids jambe et pied	0	-29,89 N	-29,89 N x 0,2424 m x sin135° = -5,123 Nm
Poids haltère	0	-198 N	-198 N x 0,48 m x sin 135° = -67,203 Nm
Muscle	$F \cos 120^\circ$	$F \sin 120^\circ$	$F \times 0,12 \text{ m} \times \sin 15^\circ$ = $F \times 0,03106 \text{ m}$
Pivot (genou)	H	V	0

Les équations d'équilibre sont donc

$$\sum F_x = F \cos(120^\circ) + H = 0$$

$$\sum F_y = -29,89 \text{ N} - 198 \text{ N} + F \sin(120^\circ) + V = 0$$

$$\sum \tau = -5,123 \text{ Nm} - 67,203 \text{ Nm} + F \cdot 0,03106 \text{ m} = 0$$

La dernière équation nous permet de trouver la force faite par le quadriceps.

$$\begin{aligned}
 & -5,123Nm - 67,203Nm + F \cdot 0,03106m \\
 & -72,326Nm + F \cdot 0,03106m = 0 \\
 & -72,326Nm + F \cdot 0,03106m + 72,326Nm = 0 + 72,326Nm \\
 & F \cdot 0,03106m = 72,326Nm \\
 & \frac{F \cdot 0,03106m}{0,03106m} = \frac{72,326Nm}{0,03106m} \\
 & F = \frac{72,326Nm}{0,03106m} \\
 & F = 2328,6N
 \end{aligned}$$

C'est la force faite par le quadriceps.

On peut maintenant utiliser cette valeur de F dans les équations des forces en x et y pour trouver les valeurs de H et V .

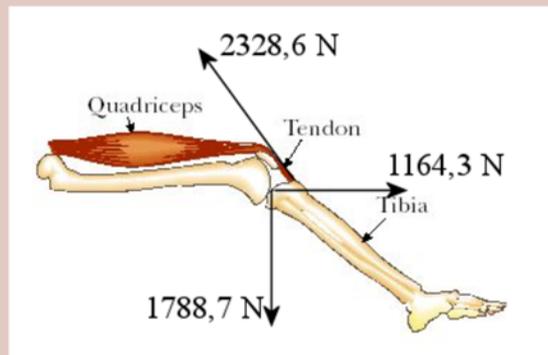
Pour H , on a

$$\begin{aligned}
 & F \cos(120^\circ) + H = 0 \\
 & 2328,6N \cdot \cos(120^\circ) + H = 0 \\
 & -1164,3N + H = 0 \\
 & -1164,3N + H + 1164,3N = 0 + 1164,3N \\
 & H = 1164,3N
 \end{aligned}$$

Pour V , on a

$$\begin{aligned}
 & -29,89N - 198N + F \sin(120^\circ) + V = 0 \\
 & -29,89N - 198N + 2328,6N \cdot \sin(120^\circ) + V = 0 \\
 & 1788,7N + V = 0 \\
 & 1788,7N + V - 1788,7N = 0 - 1788,7N \\
 & V = -1788,7N
 \end{aligned}$$

On a donc les forces suivantes



Quelques commentaires sur cet exemple.

1) Il est de plus en plus difficile de soulever sa jambe

Si on soulève davantage l'haltère en montant le bout de la jambe, la force faite par le muscle doit augmenter. Il en est ainsi parce qu'en redressant la jambe, les moments de forces faits par la gravitation augmentent (puisque les angles dans l'équation de moment de force se rapprochent de 90°). La force faite par le muscle doit alors augmenter pour compenser l'augmentation des moments de force faits par les forces gravitationnelles. Ainsi, on peut calculer que si la jambe était horizontale, la force faite par le muscle devrait être de 3293 N. Il est donc possible que quelqu'un ne puisse pas redresser sa jambe jusqu'à atteindre une position verticale si son quadriceps n'est pas assez gros pour fournir une telle force.

2) La rotule permet de diminuer la force générée par le quadriceps

La présence de la rotule est assez importante dans ce cas. En soulevant le tendon qui arrive du quadriceps, elle augmente l'angle entre le tibia et le tendon, ce qui permet d'obtenir un moment de force plus important. Si on enlevait la rotule, l'angle entre le tendon et le tibia serait plus petit et le muscle devrait faire une force plus importante pour compenser cet angle plus petit.

Exemple 8.2.4

Zébulon se tient sur la pointe de ses deux pieds de sorte que ses pieds font un angle de 40° avec le sol. Le bout des pieds est à 18 cm de la cheville et le pied a 25 cm de long. Zébulon a une masse de 72 kg. On suppose que le tendon d'Achille fait une force perpendiculaire au pied.



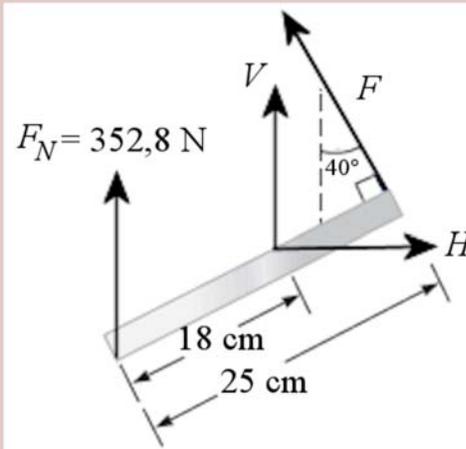
www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-stands-tiptoe-one-foot-strenuous-position-position-foot-shown-figure--total-gravita-q3329416

- Quelle est la force exercée par le tendon d'Achille si on néglige la masse du pied ?
- Quelle sont les composantes H et V de la force exercée sur le pied par le tibia (force fait par le pivot à la cheville) ?

Les forces sur le pied sont

- 1) Le poids du pied, qu'on néglige
- 2) La force normale faite par le sol. Cette force est égale à la moitié du poids de Zébulon, donc à 352,8 N
- 3) La force faite par le tendon d'Achille
- 4) Les forces exercées par le pivot, qui est la cheville (H et V)

En simplifiant un peu la forme du pied, on a donc les forces suivantes.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-stands-tiptoe-one-foot-strenuous-position-position-foot-shown-figure-total-gravita-q3329416
5

Le tableau des forces est donc

Forces	x	y	τ
Normale	0	352,8 N	$-352,8 \text{ N} \times 0,18 \text{ m} \times \sin 50^\circ$ $= -48,65 \text{ Nm}$
Tendon	$F \cos 130^\circ$	$F \sin 130^\circ$	$F \times 0,07 \text{ m} \times \sin 90^\circ$ $= F \times 0,07 \text{ m}$
Pivot (cheville)	H	V	0

Les équations d'équilibre sont donc

$$\sum F_x = F \cos(130^\circ) + H = 0$$

$$\sum F_y = 352,8 \text{ N} + F \sin(130^\circ) + V = 0$$

$$\sum \tau = -48,65 \text{ Nm} + F \cdot 0,07 \text{ m} = 0$$

La dernière équation nous permet de trouver la force faite par le tendon.

$$\begin{aligned}
 -48,65Nm + F \cdot 0,07m &= 0 \\
 -48,65Nm + F \cdot 0,07m + 48,65Nm &= 0 + 48,65Nm \\
 F \cdot 0,07m &= 48,65Nm \\
 \frac{F \cdot 0,07m}{0,07m} &= \frac{48,65Nm}{0,07m} \\
 F &= \frac{48,65Nm}{0,07m} \\
 F &= 695N
 \end{aligned}$$

C'est la force faite par le tendon.

On peut maintenant utiliser cette valeur de F dans les équations des forces en x et y pour trouver les valeurs de H et V .

Pour H , on a

$$\begin{aligned}
 F \cos(130^\circ) + H &= 0 \\
 695N \cdot \cos(130^\circ) + H &= 0 \\
 -446,7N + H &= 0 \\
 -446,7N + H + 446,7N &= 0 + 446,7N \\
 H &= 446,7N
 \end{aligned}$$

Pour V , on a

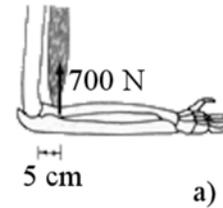
$$\begin{aligned}
 352,8N + F \sin(130^\circ) + V &= 0 \\
 352,8N + 695N \sin(130^\circ) + V &= 0 \\
 885,2N + V &= 0 \\
 885,2N + V - 885,2N &= 0 - 885,2N \\
 V &= -885,2N
 \end{aligned}$$

On a donc les forces suivantes

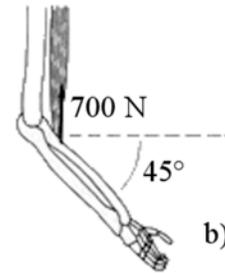


EXERCICES

1. Dans la figure ci-contre, le muscle est attaché à 5 cm du pivot, qui est le coude. On suppose que muscle fait une force dirigée exactement vers le haut. Déterminer le moment de force que le biceps exerce sur l'avant-bras...

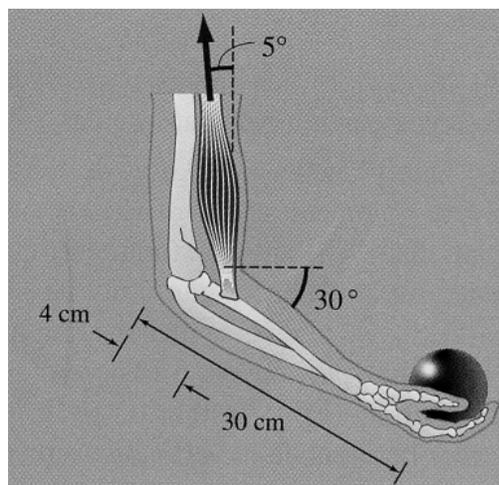


- a) quand le bras est horizontal
b) quand le bras est à 45° sous l'horizontale.



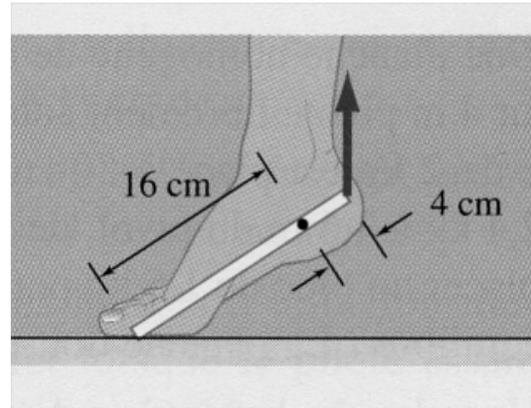
2. Une personne tient dans la main une masse de 5 kg, son avant-bras faisant un angle de 30° vers le bas par rapport à l'horizontale. Le muscle du biceps est fixé à 4 cm de l'articulation et agit à 5° par rapport à la verticale. La personne a une masse de 80 kg et il y a 26 cm du coude jusqu'au poignet.

- a) Quelle est la tension du muscle ?
b) Quelles sont les forces horizontale et verticale exercées par l'humérus sur l'avant-bras ?



3. Une personne de 60 kg se tient sur la pointe des pieds de telle manière que les pieds font un angle de 30° avec le sol. Son poids est également distribué entre ses deux pieds.

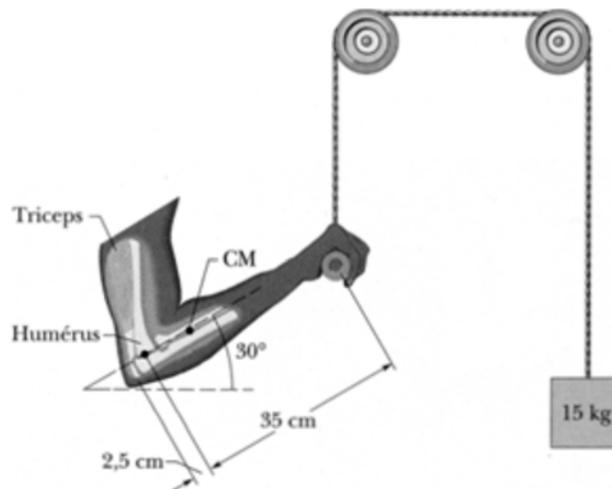
- Quelle est la force exercée par le tendon si la force est dans la direction montrée par la flèche ?
- Quelles sont les composantes horizontale et verticale de la force exercée par le tibia sur le pied ? (Forces sur le pivot, représenté par le point noir)



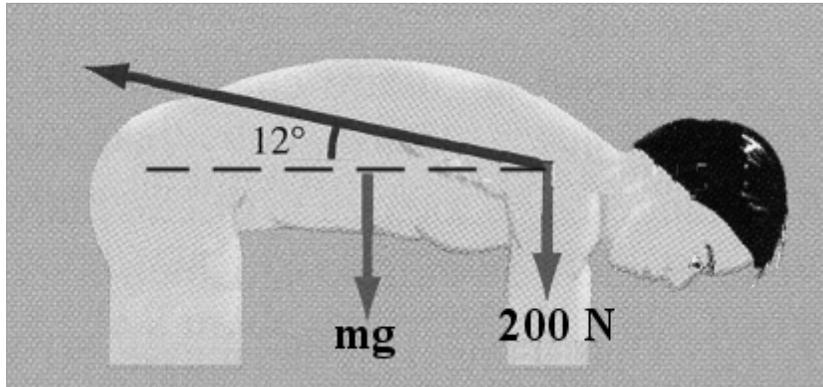
Dans ce problème, négligez le poids du pied

4. On soulève un bloc de 15 kg à l'aide d'un système de poulies. Le bras est vertical alors que l'avant-bras forme un angle de 30° avec l'horizontal. Quelles sont les forces exercées sur l'avant-bras...
- par le triceps ?
 - par l'os du bras (l'humérus) ?

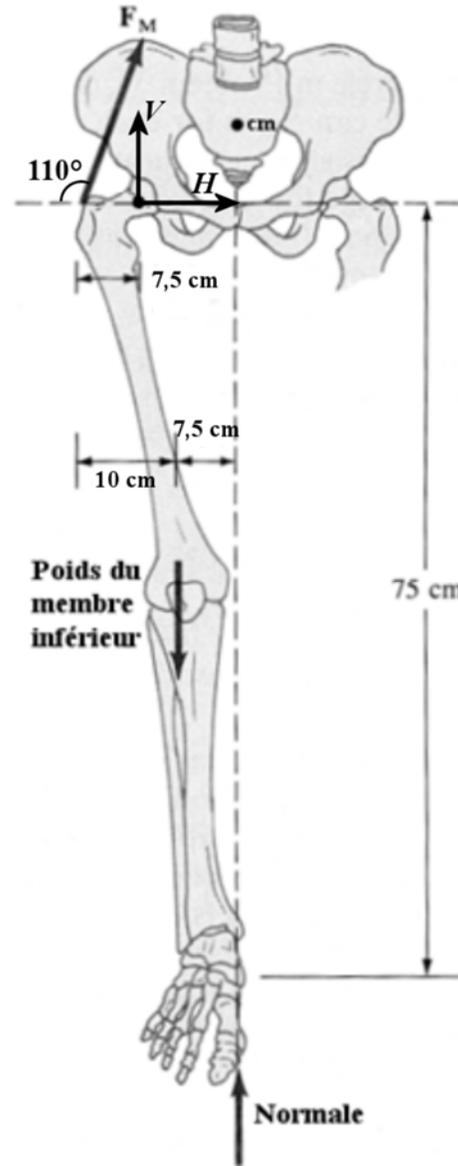
La personne a une masse de 80 kg et il y a 27 cm du coude jusqu'au poignet. Le triceps tire verticalement vers le haut et il est attaché au radius en un point situé à 2,5 cm derrière l'articulation du coude.



5. Une personne se penche en avant pour ramasser un paquet. Le poids à soulever est de 200 N, incluant le poids des bras. Le dos est soutenu par un muscle qui est fixé à la colonne vertébrale et fait un angle de 12° avec elle. Le torse pivote autour de la hanche. La personne a une masse de 80 kg, il y a 88 cm de la hanche jusqu'au bout du crâne et 58 cm de la hanche aux épaules. Déterminez...
- a) la tension dans le muscle.
 - b) les forces horizontale et verticale exercées par la hanche sur le tronc.



6. En marchant, une personne appuie momentanément tout son poids sur un pied à la fois. Le centre de masse de son corps se trouve alors au-dessus du pied. Calculer la force exercée par les muscles abducteurs de la hanche (F_M) ainsi que les composantes horizontale et verticale de la force exercée par la hanche sur le fémur (H et V). Pour y arriver, faites les équations des forces et du moment de force sur tout le membre inférieur. La personne a une masse de 65 kg, il y a 69 cm de la hanche jusqu'à la cheville et 75 cm de la hanche jusqu'au sol.



RÉPONSES

1. a) 35 Nm b) 24,75 Nm
2. a) 469,4 N b) $H = 40,91$ N vers la droite $V = 401,3$ N vers le bas
3. a) $T = 1176$ N b) $H = 0$ $V = 1470$ N vers le bas
4. a) $T = 1931$ N b) $H = 0$ $V = 2061$ N vers le bas
5. a) $T = 2271$ N b) $H = 2222$ N vers la droite $V = 181$ N vers le haut
6. $F_M = 867,5$ N $F_{Jx} = 296,7$ N vers la gauche $F_{Jy} = 1349,6$ N vers le bas