PHY-144 : Introduction à la physique du génie

Chapitre 3 : Statique: équilibre de rotation.

3.1 Introduction

La statique est la branche de la mécanique qui étudie les objets au repos. Nous avons vu, au chapitre 2, une des conditions rencontrées par ces objets :

$$\boxed{\vec{R} = \sum \vec{F} = 0}$$

Un objet au repos doit être en équilibre de translation. La force résultante sur cet objet est 0.

Cette condition est nécessaire, mais elle n'est pas **suffisante**.

Par exemple, voici un objet subissant 2 forces :

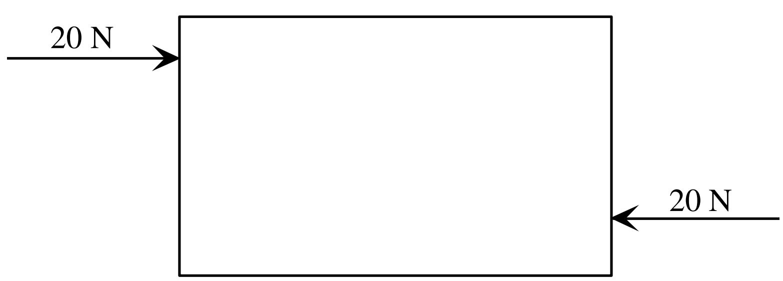


Figure 3.1 : Cet objet est-il en équilibre?

Pour cet objet, nous pouvons constater que $\sum \vec{F} = 0$. Cependant, il n'est pas en équilibre! Il va sûrement tourner dans le sens horaire!

Voici un autre exemple :

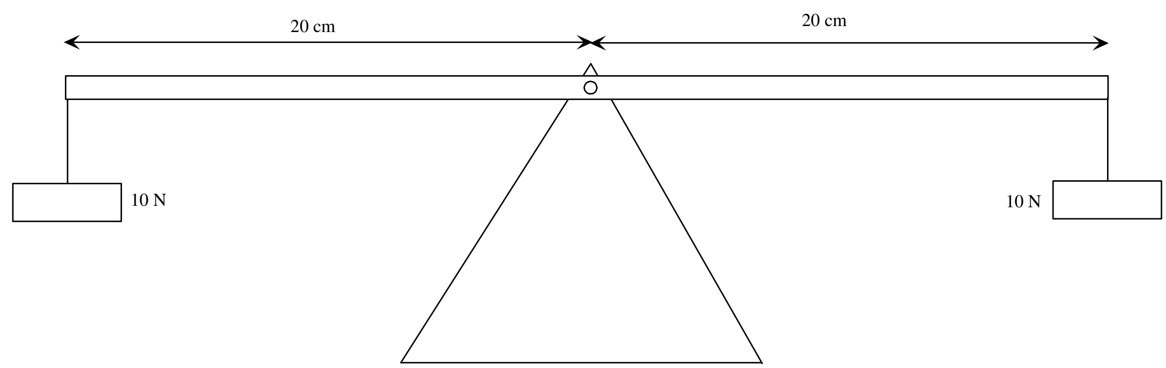
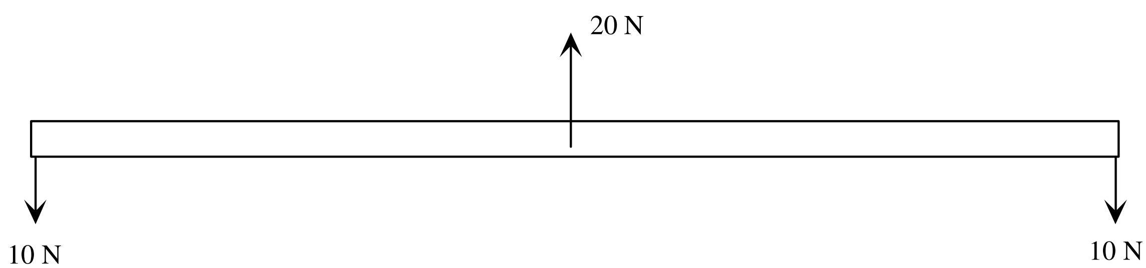


Figure 3.2 : Balance en équilibre.

Si on fait le diagramme de forces du fléau de cette balance, on obtient :



et le fléau est en équilibre.

Cependant, changeons un peu la configuration de la balance:

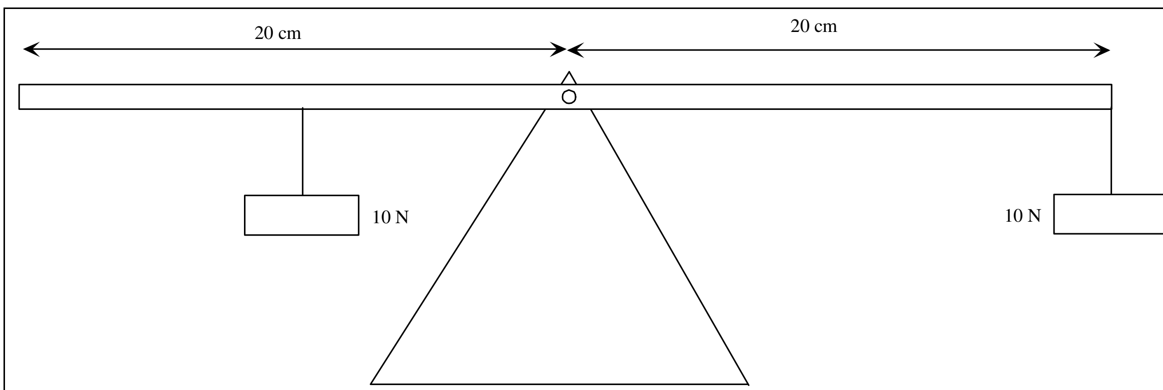


Figure 3.3 : Balance en déséquilibre.

Cette fois-ci, le fléau de la balance n'est pas en équilibre, n'est-ce pas? Pourtant, les forces sont les mêmes dans les deux cas! Mais voilà, la force de 10 N exercée à droite **est plus efficace pour faire tourner** le fléau autour du pivot…

Si on veut étudier l'équilibre d'un objet, le concept de force est essentiel, mais il faut aussi considérer l'efficacité de la force à faire tourner. Il faut introduire un nouveau concept, **le moment** d'une force.

3.2 Le moment d'une force

Qu'est-ce qu'un moment?

Le moment d'une force par rapport à un point est une mesure de l'efficacité de cette force à faire tourner un objet autour de ce point.

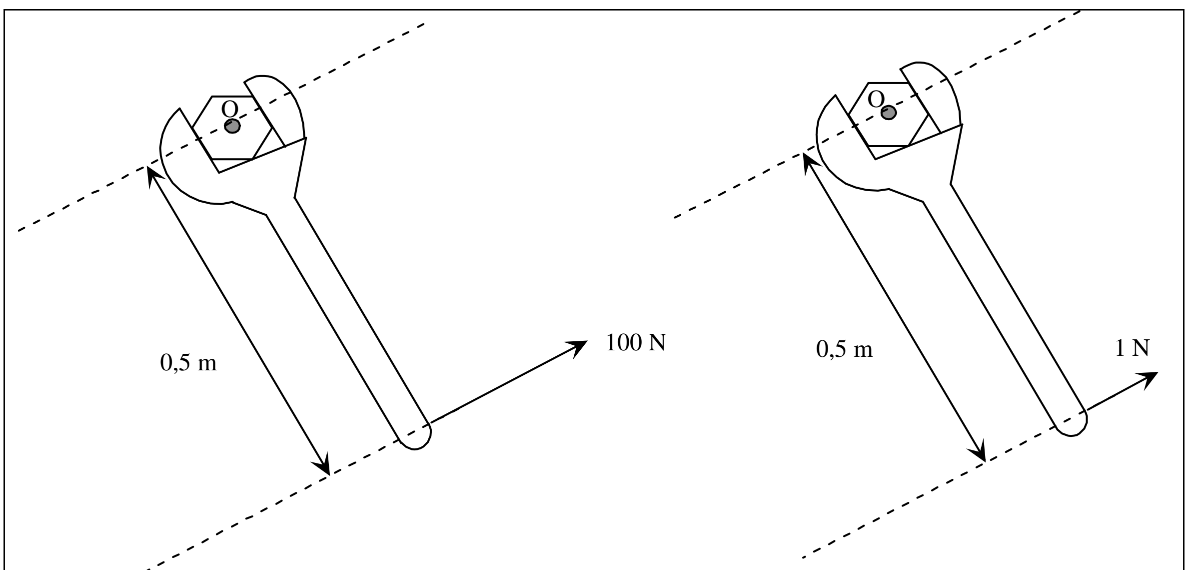
Note : en anglais, on emploie les termes « moment » ou « torque », qui sont synonymes. Le mot « torque » n'existe pas en français.

Maintenant, qu'est-ce qui fait qu'une force est efficace à faire tourner ou non?

Considérons l'exemple suivant : on veut dévisser un écrou à l'aide d'une clé… On voudrait évaluer :

M_o : **le moment de la force par rapport au point O.**

a) Tout d'abord, la grandeur de la force est importante. À la figure 3.4, la force de 100 N est plus efficace à faire tourner que la force de 1 N!

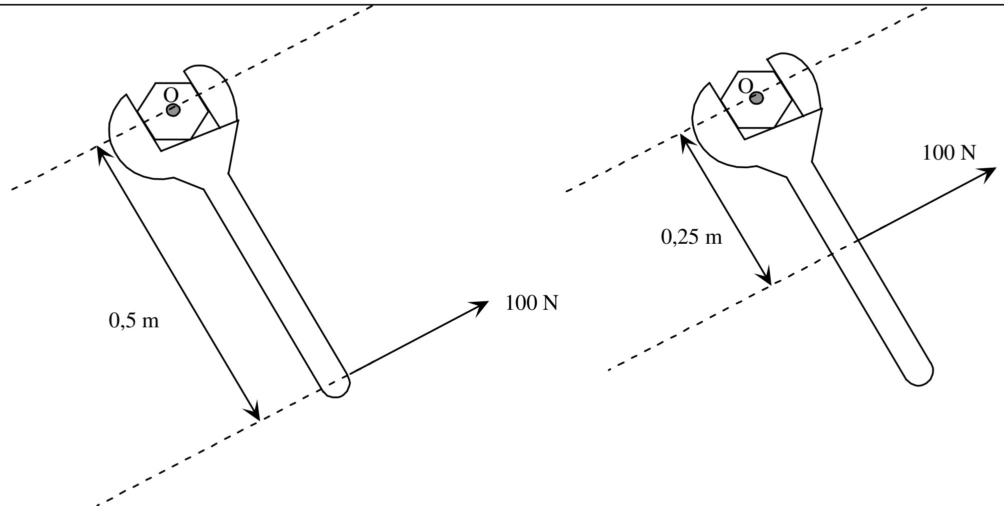


a) Plus efficace!!

b) Moins efficace…

Figure 3.4 : Le moment d'une force dépend de la grandeur de la force.

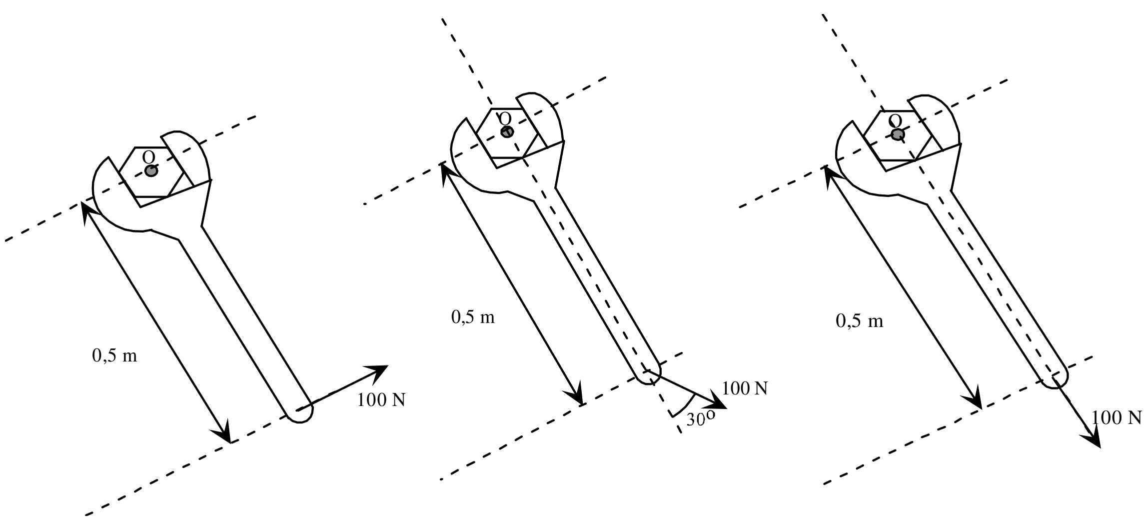
b) Ensuite, la distance entre le point d'application de la force et le point O est importante. À la figure 3.5, la force est plus efficace à faire tourner si elle est à 0,5 m du point O.



a) Plus efficace!! b) Moins efficace…

Figure 3.5: Le moment d'une force dépend de la distance entre le point d'application de la force et le point O.

c) Enfin, l'orientation de la force est importante.



a) Grande efficacité! b) Efficacité moins grande c) Efficacité nulle.

Figure 3.6 : Le moment d'une force dépend de l'orientation de la force.

Il est possible de combiner toutes ces caractéristiques en un calcul simple :

Grandeur du moment de force par rapport au point O :

$$\boxed{M_o = d \; F_\perp}$$

où $F_\perp$: grandeur de la force perpendiculaire à la distance d
et d : distance entre le point d'application de la force et le point O.

ou encore :

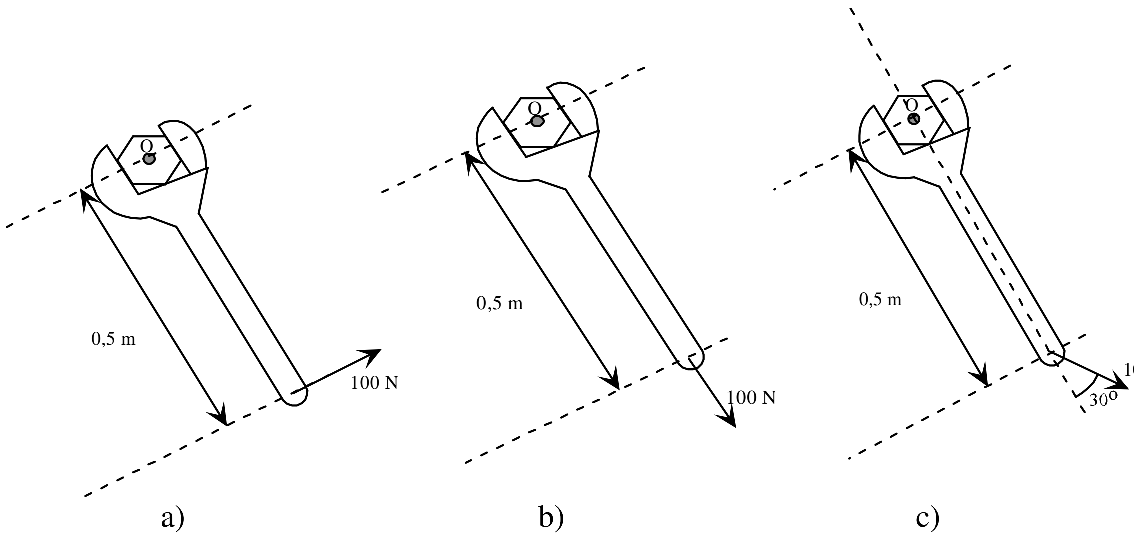
$$\boxed{M_o = d_\perp \; F}$$

où $d_\perp$: distance perpendiculaire entre la ligne d'action de la force $\vec{F}$ et le point O.

Signe du moment de force :

M_o est positif si la force a tendance à faire tourner dans le sens anti-horaire.	$\circlearrowleft = +$
M_o est négatif si la force a tendance à faire tourner dans le sens horaire.	$\circlearrowright = -$

Exemple 3.1 : Calculez le moment de force par rapport au point O, dans les configurations ci-dessous :



a)

$M_O = d\, F_\perp$ = (0,5 m)(100 N) = 50 Nm. De plus la force a tendance à faire tourner dans le sens anti-horaire, donc le signe de M_O est +.

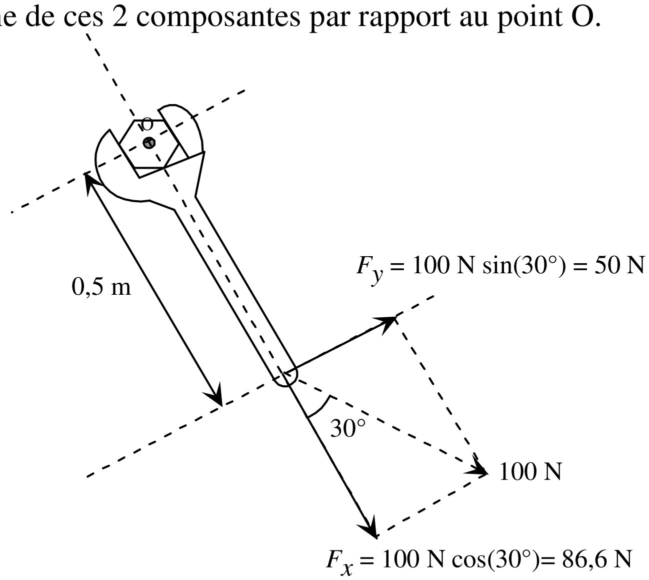
$\boldsymbol{M_O}$ **= +50 Nm.**

b)

$M_O = d_\perp F$ … Mais $d_\perp$ (distance perpendiculaire entre le point O et la ligne d'action de $\vec{F}$) est = 0 !!

Donc $\boldsymbol{M_O}$ **= 0 Nm**.

c) 1ère façon : Décomposons la force en 2 composantes : F_x et F_y et additionnons ensuite les moments de chacune de ces 2 composantes par rapport au point O.



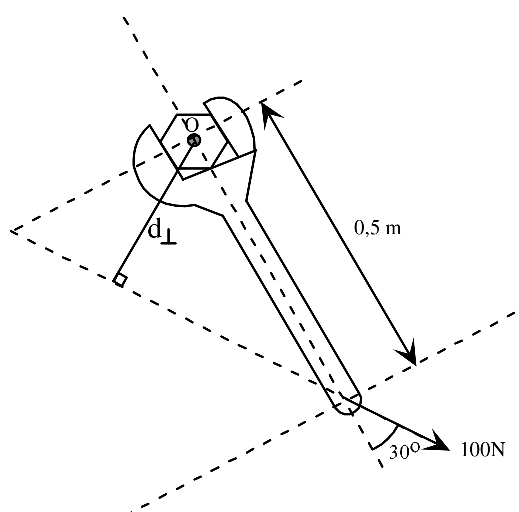
Pour la force F_x, $M_O = 0$ Nm. (voir en b)

Pour la force F_y, $M_O = +(0{,}5\text{ m})(50\text{ N}) = +25$ Nm

Donc : $M_O = 0\text{ Nm} + 25\text{ Nm}$

$$\boldsymbol{M_O = +25\text{ Nm.}}$$

2ème façon (+difficile) : Trouvons la distance $d_\perp$ de la force $\vec{F}$.

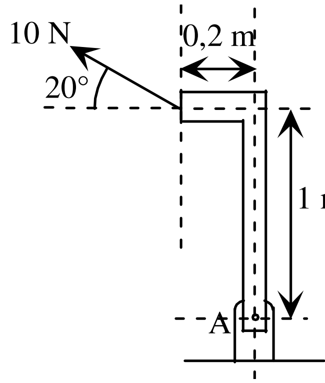


On voit que $d_\perp = 0{,}5\text{ m}\sin(30°) = 0{,}25$ m

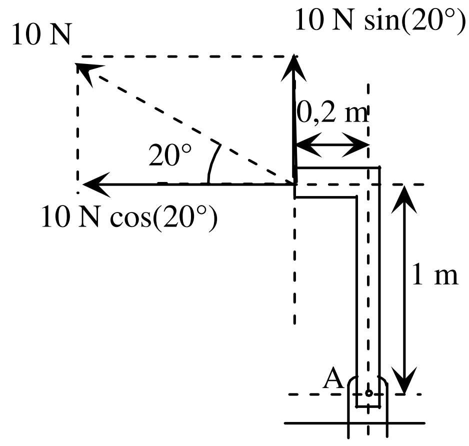
$M_o = d_\perp F = (0{,}25\text{ m})(100\text{ N}) = 25$ Nm. Et la tendance à faire tourner est anti-horaire, donc :

$$\boldsymbol{M_O = +25\text{ Nm.}}$$

Exemple 3.2 : Calculez le moment de la force de 10 N par rapport au point A.



Décomposons d'abord la force en 2 composantes :



Calculons ensuite le moment de force :

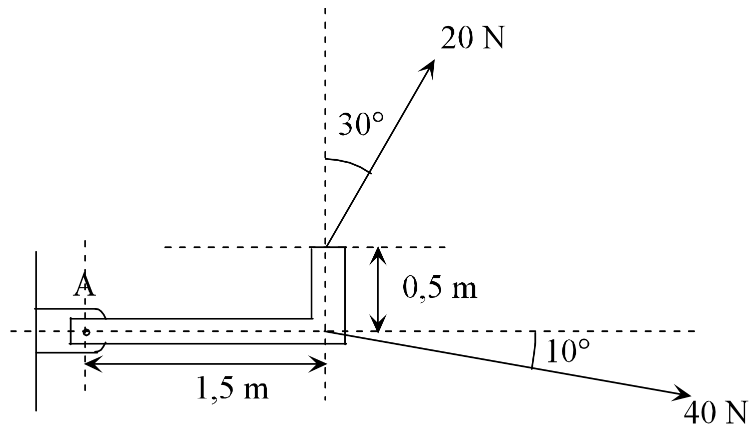
Moment de la force horizontale : + (1 m) (10 N cos(20°)) = + 9,397 Nm
(Tendance à faire tourner : anti-horaire, donc +)

Moment de la force verticale : - (0,2 m) (10 N sin(20°)) = -0,684 Nm
(Tendance à faire tourner : horaire, donc -)

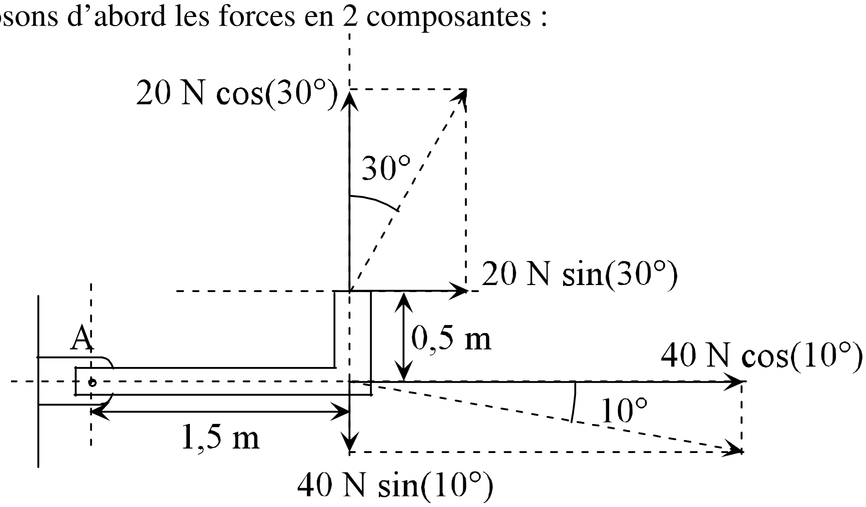
M_A (de la force de 10 N) = + 9,397 Nm + -0,684 Nm

M_A = + 8,713 Nm.

Exemple 3.3 : Un objet initialement immobile est soumis à 2 forces. Calculez la somme des moments par rapport au point A. L'objet va-t-il tourner? dans quel sens?



Décomposons d'abord les forces en 2 composantes :



Calculons les moments M_A.

1. Force de 20 N, composante horizontale :
$M_{A\ (20\ N\ horizontael)}$ = - (0,5 m)(20 N sin(30°)) = - 5 Nm.

2. Force de 20 N, composante verticale :
$M_{A\ (20\ N\ verticale)}$ = + (1,5 m)(20 N cos(30°)) = +25,98 Nm.

3. Force de 40 N, composante horizontale :
$M_{A\ (40\ N\ horizontale)}$ = 0 (La ligne d'action de cette composante passe par le point A).

4. Force de 40 N, composante verticale :
$M_{A\ (40\ N\ verticale)}$ = -(1,5 m)(40 N sin(10°)) = -10,42 Nm.

Au total : M_A = - 5 Nm + 25,98 Nm + -10,42 Nm = + 10,56 Nm.

M_A = + 10,56 Nm.

Le moment résultant n'est pas 0 : l'objet va donc tourner. Puisque M_A est positif, l'objet va tourner dans le sens anti-horaire.

3.3 Équilibre de rotation

Maintenant, nous pouvons calculer le moment d'une force par rapport à un point… et nous pouvons compléter notre discussion sur l'équilibre des corps rigides.

En bref, les conditions d'équilibre d'un corps rigide sont :

1. Équilibre de translation :

$$\boxed{\begin{aligned} R_x &= \sum F_x = 0 \\ R_y &= \sum F_y = 0 \end{aligned}}$$

2. Équilibre de rotation :

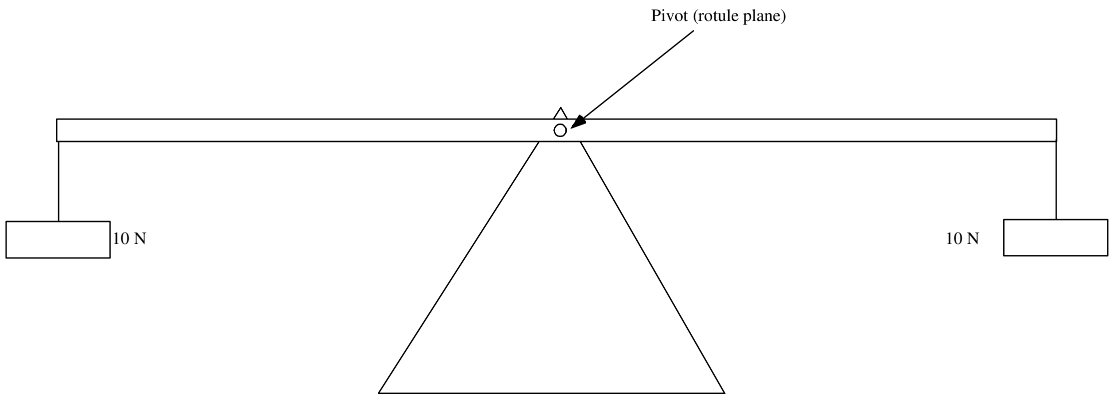
$$\boxed{\sum M_A = 0}$$

Un corps au repos n'est pas accéléré (condition #1) et n'a aucune tendance à tourner (condition #2).

Le point A (par rapport auquel on calcule les moments) **peut être n'importe quel point du plan.**

3.3.1 Force exercée par un pivot

Il est courant de rencontrer des objets attachés à des pivots. Par exemple : une roue de bicyclette est fixée à un essieu, autour duquel elle est libre de tourner, le fléau d'une balance est libre de tourner autour d'un pivot… Un **pivot** (ou **rotule plane**) n'entrave pas la rotation de l'objet mais il entrave cependant la translation de l'objet.



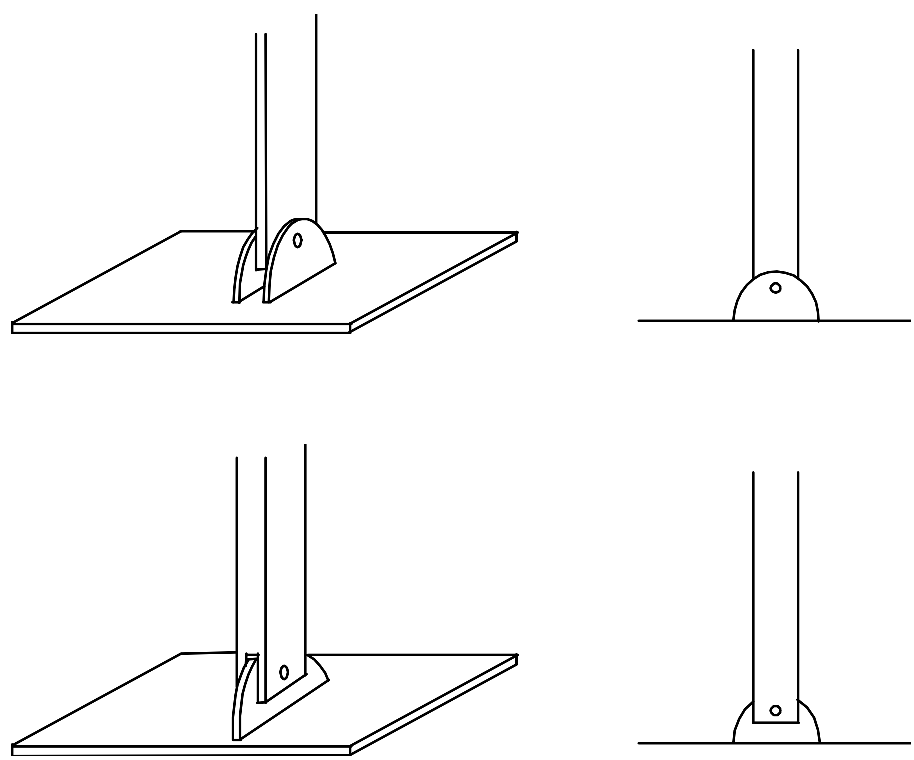


Figure 3.7 : Vues 3D et 2D d'un pivot (rotule plane).

Comme le pivot empêche l'objet de bouger en translation, il exerce une force sur l'objet. La force exercée par un pivot est habituellement de grandeur et de direction inconnues, ou, ce qui est équivalent, les **composantes** (x,y) de cette force sont **inconnues**. Cette force peut cependant se déduire à l'aide des conditions d'équilibre.

3.3.2 Méthode pour résoudre les problèmes d'équilibre

Il existe une méthode systématique et simple pour résoudre les problèmes d'équilibre, que nous avons déjà énoncée au chapitre 2.

Étape 1 : On choisit un objet.

Étape 2 : On dessine le **diagramme de forces** de l'objet, aussi appelé **DCL** (diagramme du corps libre). Il s'agit d'un dessin de l'objet choisi et des **forces** exercées **sur** l'objet. On peut y ajouter un système d'axes x-y.

Étape 3 : On écrit les conditions d'équilibre.

Étape 4 : On résout les équations.

Exemple 3.4 : Une tondeuse à gazon, de poids = 400 N, est immobile dans une pente. Si on néglige le frottement, calculez la force normale à l'avant, la force normale à l'arrière et la grandeur de la force *F*.

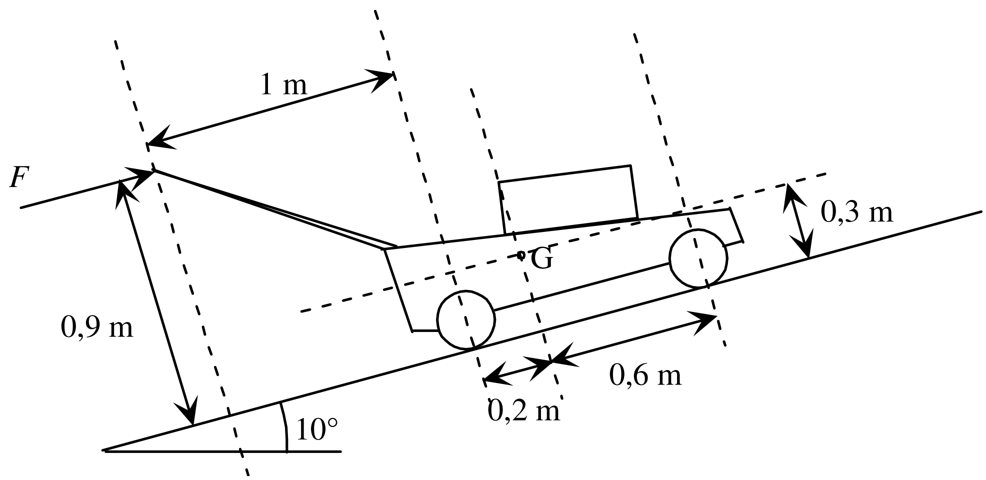
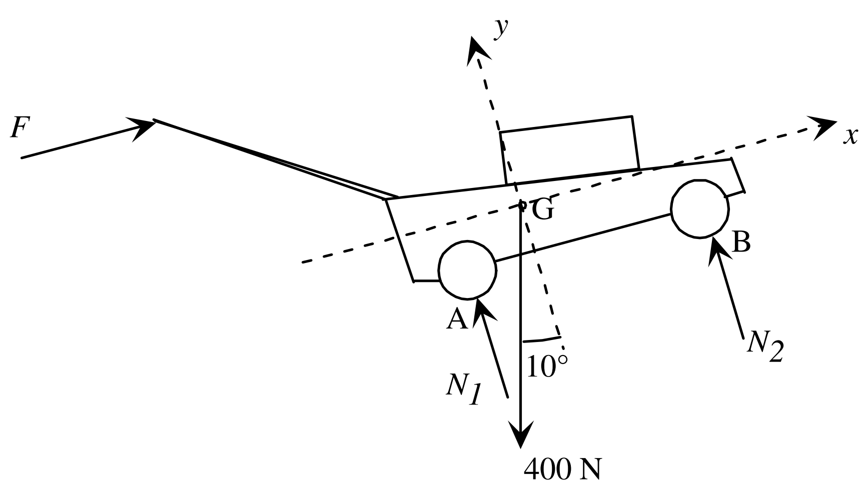


Diagramme de forces :



Conditions d'équilibre :

$\sum F_x = 0 \qquad F - 400\text{ N}\sin(10°) = 0$

$\sum F_y = 0 \qquad N_1 + N_2 - 400\text{ N}\cos(10°) = 0$

$\sum M_G = 0 \quad -(0{,}6\text{ m})(F) + -(0{,}2\text{ m})(N_1) + (0{,}6\text{ m})(N_2) = 0$

Pour le calcul des moments par rapport au point G, on a à chaque fois utilisé la distance perpendiculaire à la ligne d'action de la force. Nous avons 3 équations, 3 inconnues :

Réponses : ***F* = 69,46 N** **N_1 = 243,35 N** **N_2 = 150,58 N**

Pour le calcul des moments on aurait pu choisir un autre point. Si on choisit le point A, alors la 3ème équation devient :

$\sum M_A = 0$

$- (0{,}9 \text{ m})(F) + (0{,}3 \text{ m})(400 \text{ N} \sin(10°)) + -(0{,}2 \text{ m})(400 \text{ N} \cos(10°)) + (0{,}8 \text{ m})(N_2) = 0$

Et la réponse aurait été la même!

Exemple 3.5 : une échelle (poids = 400 N) repose au point A sur un sol rugueux et est appuyée sur un mur sans frottement au point B. Calculez les forces aux points A et B.

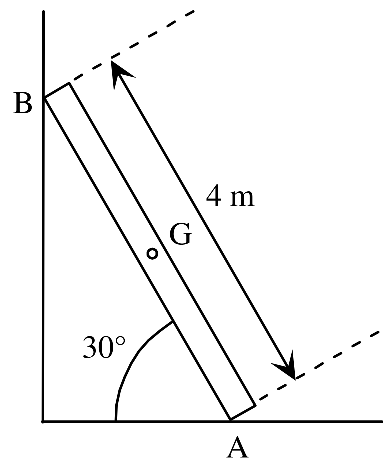
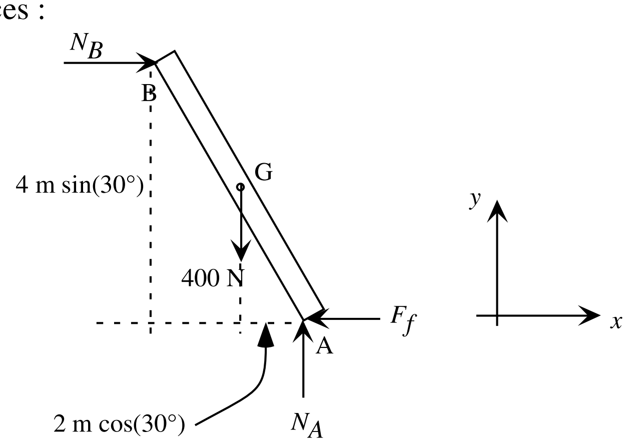


Diagramme de forces :



Conditions d'équilibre :

$\sum F_x = 0 \qquad N_B - F_f = 0$

$\sum F_y = 0 \qquad N_A - 400 \text{ N} = 0$

$\sum M_A = 0 \quad - (4 \text{ m} \sin(30°))\,(N_B) + (2 \text{ m} \cos(30°))\,(400 \text{ N}) = 0$

Réponses: $\boldsymbol{N_A}$ **= 400 N** $\boldsymbol{F_f}$ **= 346,4 N** $\boldsymbol{N_B}$ **= 346,4 N**

Exemple 3.6 : Une poutre (poids 1000 N) est maintenue à un mur par une rotule et par une corde. La corde passe par une poulie. Calculez la tension dans la corde ainsi que la force de la rotule sur la poutre.

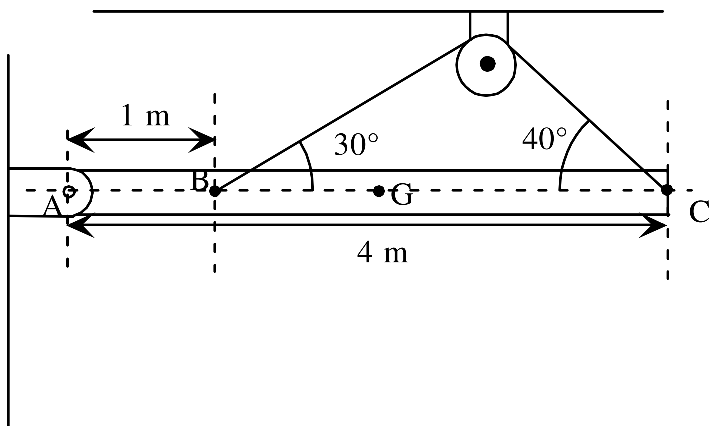
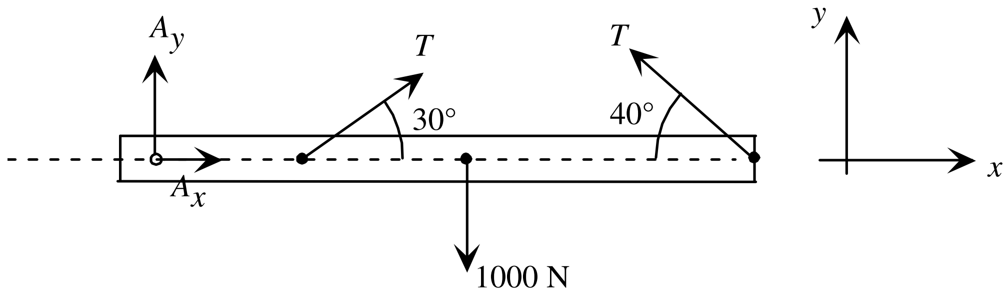


Diagramme de forces : (on se rappelle que la tension est la même dans la corde de chaque côté d'une poulie).



A_x et A_y sont les deux composantes de la force de la rotule sur la poutre.

Conditions d'équilibre :

$$\sum F_x = 0 \qquad A_x + T\cos(30°) - T\cos(40°) = 0$$
$$\sum F_y = 0 \qquad A_y + T\sin(30°) + T\sin(40°) - 1000\text{ N} = 0$$
$$\sum M_A = 0 \quad -(2\text{ m})(1000\text{ N}) + (1\text{ m})(T\sin(30°)) + (4\text{ m})(T\sin(40°)) = 0$$

Il est à remarquer que les composantes horizontales des tensions n'ont aucun moment par rapport au point A, puisque leur ligne d'action passe par le point A.

Réponses: $\boldsymbol{T}$ **= 651,22 N** $\quad A_x =$ -65,11 N $\quad A_y =$ 255,79 N

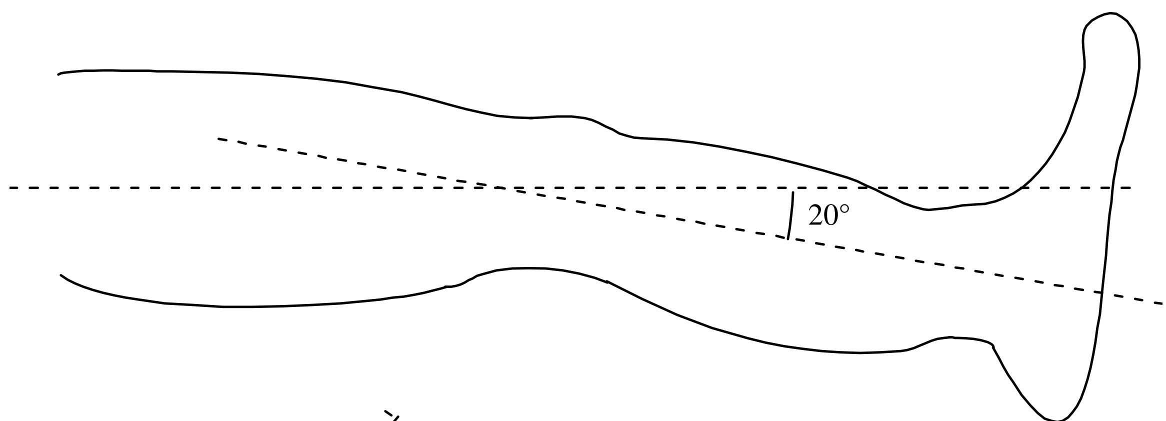
Force de la rotule sur la poutre : $\vec{\mathbf{A}} = \mathbf{-65{,}11N}\ \vec{\mathbf{i}} + \mathbf{255{,}79\ N}\ \vec{\mathbf{j}}$

La force de la rotule sur la poutre est vers la gauche et vers le haut. Donc si la rotule cassait tout à coup, le côté gauche de la poutre bougerait d'abord vers la droite et vers le bas!

Exemple 3.7 Modèle biomécanique de la jambe.

Voici un modèle mécanique acceptable pour une jambe typique, inclinée à 20° par rapport à l'horizontale. La force $\vec{\mathbf{F}}$ représente la force du quadriceps (muscle de la cuisse) agissant sur la jambe par l'entremise d'un tendon. La rotule du genou est représentée par ... une rotule (!) en A. Le poids de la jambe est de 30 N et le poids du pied est de 8 N.

Calculez la grandeur de la force exercée par le tendon (*F*) et la force exercée par la rotule.



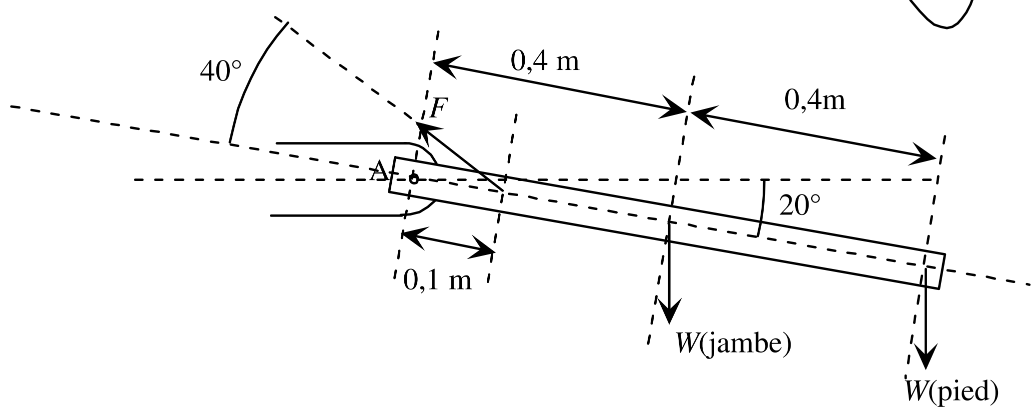
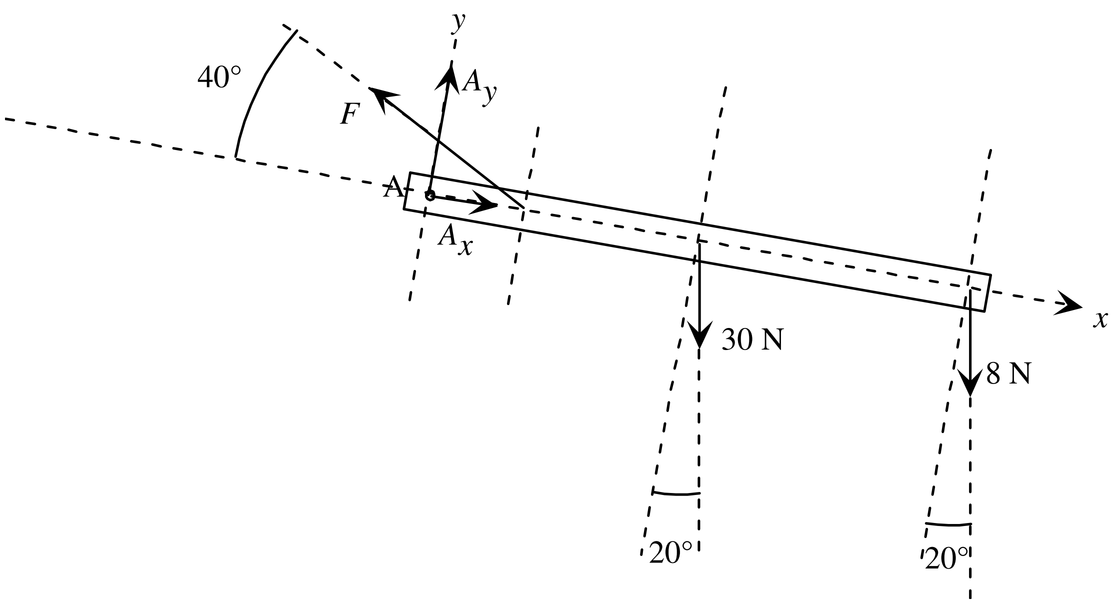


Diagramme de forces :



Conditions d'équilibre :

$$\sum F_x = 0 \qquad A_x + 30\text{ N}\sin(20°) + 8\text{ N}\sin(20°) - F\cos(40°) = 0$$
$$\sum F_y = 0 \qquad A_y - 30\text{ N}\cos(20°) - 8\text{ N}\cos(20°) + F\sin(40°) = 0$$
$$\sum M_A = 0 \qquad -(0{,}4\text{ m})(30\text{ N}\cos(20°)) - (0{,}8\text{ m})(8\text{ N}\cos(20°)) + (0{,}1\text{ m})(F\sin(40°)) = 0$$

Il est à remarquer que les composantes « en *x* » des forces n'ont aucun moment par rapport au point A, puisque leur ligne d'action passe par le point A.

Réponses: ***F* = 269 N** A_x = 193 N A_y = -137,2 N

Force de la rotule sur la jambe : $\vec{\mathbf{A}} = \mathbf{193\text{ N}}\ \vec{\mathbf{i}}\ \mathbf{-137{,}2\text{ N}}\ \vec{\mathbf{j}}$

Problèmes du chapitre 3:

Moment de force :

1. Une tige horizontale de masse négligeable est soumise à 2 forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ de grandeurs respectives 100 N et 60 N, tel qu'illustré à la Figure 1.
   Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

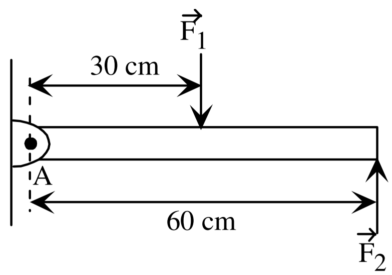


Figure 1

2. Une tige horizontale de masse négligeable est soumise à 2 forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ de grandeurs respectives 160 N et 20 N, tel qu'illustré à la Figure 2.
   Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

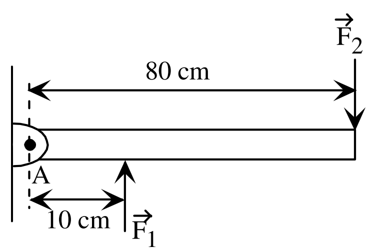


Figure 2

3. Une tige homogène horizontale de poids 30 N est soumise à 2 forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ de grandeurs respectives 60 N et 25 N, tel qu'illustré à la Figure 3.
   Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

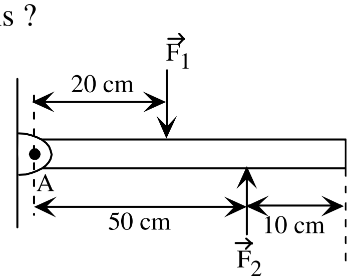


Figure 3

4. Une tige horizontale de masse négligeable est soumise à 2 forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ de grandeurs respectives 100 N et 50 N, tel qu'illustré à la Figure 4.
   Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

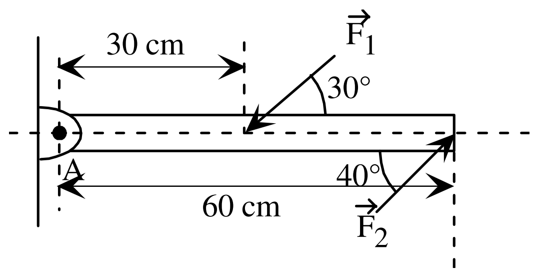


Figure 4

5. Une tige horizontale de masse négligeable est soumise à 2 forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ de grandeurs respectives 200 N et 80 N, tel qu'illustré à la Figure 5.
   Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

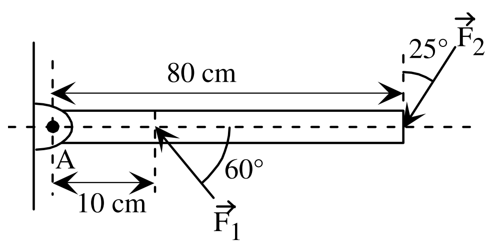


Figure 5

6. Une tige homogène horizontale de poids 10 N est soumise à 2 forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ de grandeurs respectives 150 N et 72 N, tel qu'illustré à la Figure 6.
   Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

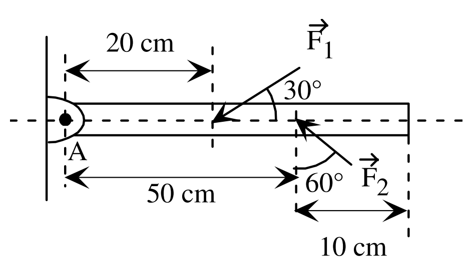


Figure 6

7. Une tige inclinée de masse m = 20 kg est soumise à une corde dont la tension est de 100 N, tel qu'illustré à la Figure 7.
Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

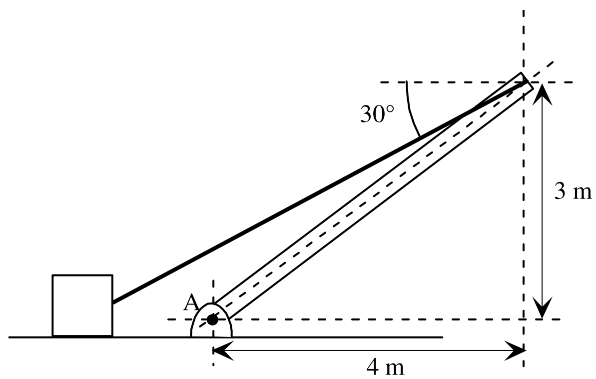


Figure 7

8. Une tige inclinée de masse négligeable est soumise à un contrepoids de masse 10 kg et à deux cordes dont les tensions sont respectivement T_1 = 50 N et T_2 = 60 N, tel qu'illustré à la Figure 8.
Déterminez le moment résultant par rapport au point A. Est-ce que la tige va tourner ? Dans quel sens ?

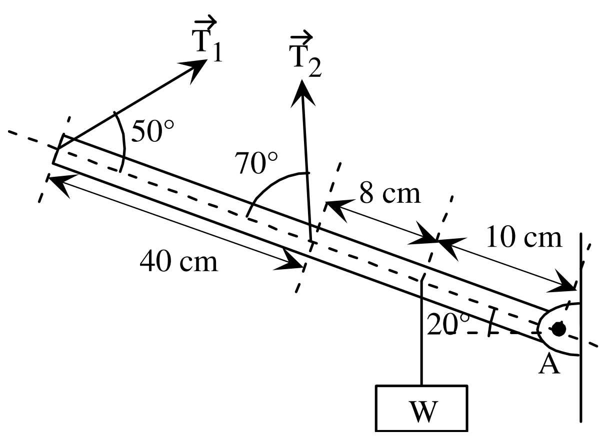


Figure 8

9. Une malle de poids 50 N pouvant pivoter au point B est soulevée par un homme, à l'aide d'une corde, avec une force de 200 N. Une force $\vec{F}_1$ dont la grandeur est 20 N est appliquée sur la surface supérieure comme cela est indiqué à la figure 9. Déterminez le moment résultant par rapport au point B. Est-ce que la malle va pivoter ? Dans quel sens ?

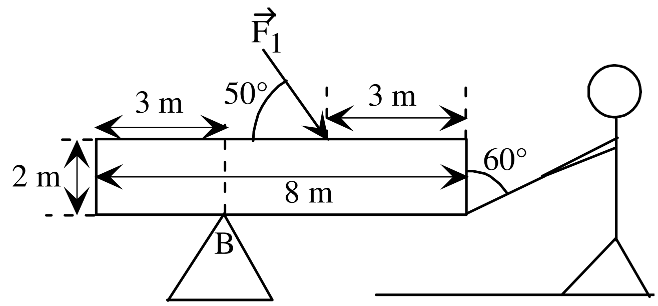


Figure 9

Statique de translation et de rotation :

10. Une poutre horizontale de 5 mètres de longueur s'appuie à un bout sur une rotule dans un mur vertical ; l'autre bout est soutenu par une corde faisant un angle de 45° avec le mur comme indiqué à la figure 10. La poutre pèse 600 N et supporte un homme de 720 N placé au bout supporté par la corde.
    Calculez :
    a) la tension dans la corde,
    b) la grandeur, la direction et le sens de la force exercée par la rotule sur la poutre.

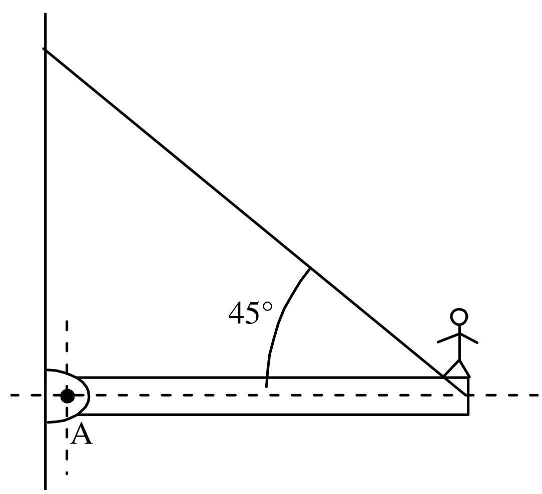


Figure 10

11. Une poutre uniforme AB de 10 m de longueur et de masse 100 kg est fixée à un mur vertical à l'aide d'une rotule A et d'un câble BC, comme illustré à la figure 11. Le câble et la poutre font un angle de 53° avec le mur. On suspend à l'extrémité B de la poutre une masse de 50 kg.
Déterminez :

a) la tension dans le câble BC ;
b) les composantes verticale et horizontale de la force exercée par la charnière sur la poutre ;
c) les caractéristiques (grandeur et orientation) de la force totale exercée par la rotule sur la poutre.

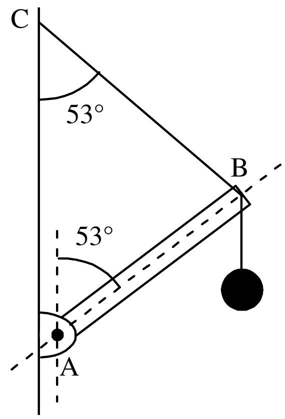


Figure 11

12. Une poutre uniforme AB de 10 m de longueur et de masse 100 kg est fixée au plancher à l'aide d'une rotule en A et d'un câble BC, comme illustré à la figure 12. La poutre fait un angle de 60° avec le plancher, et le câble, un angle de 30° avec le plancher. On suspend à l'extrémité B de la poutre une masse de 50 kg.
Déterminez :

a) la tension dans le câble BC ;
b) les composantes verticale et horizontale de la force exercée par la rotule sur la poutre.

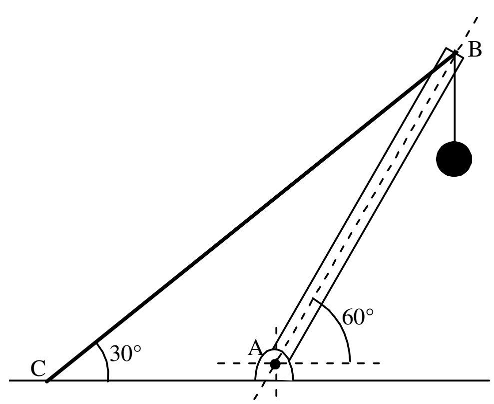


Figure 12

13. À l'aide d'un câble attaché en B, un ouvrier maintient immobile dans la position illustrée une charge pesant 1000 N accrochée à une poutre AB articulée en A par un pivot comme indiqué à la figure 13. La poutre est de poids négligeable et mesure 5 m de longueur ; la charge est placée à 2 m de l'extrémité A de la poutre.

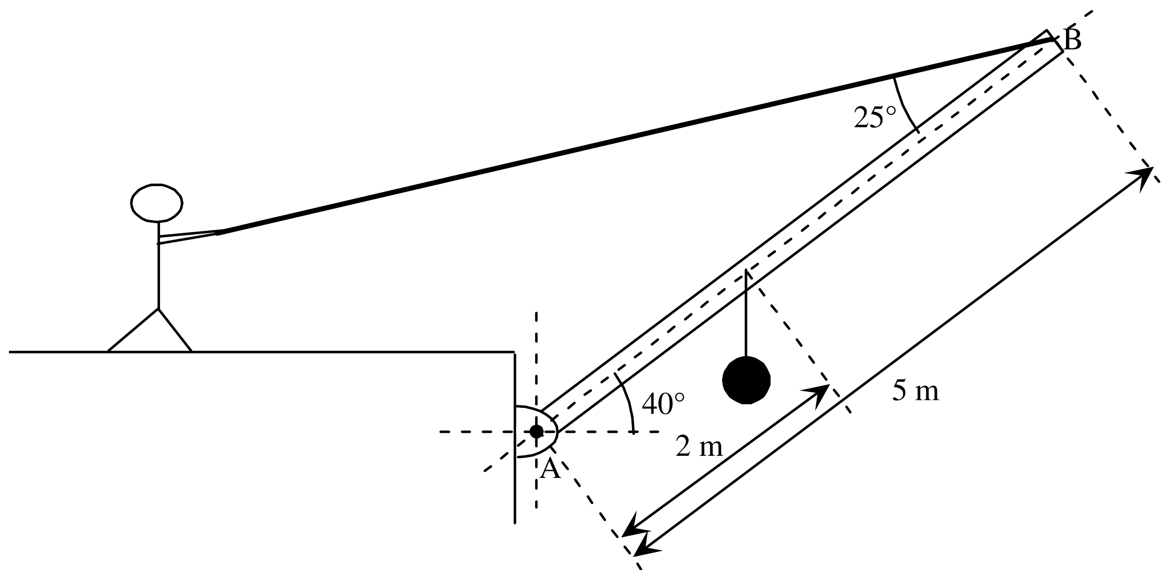


Figure 13

Pour pouvoir déterminer la section du câble et le diamètre de l'axe en A, il faut connaître la grandeur de la force exercée <u>sur</u> le câble et celle de la force exercée <u>sur</u> le pivot.
Déterminez:

a) la grandeur de la force exercée <u>par</u> le câble <u>sur</u> la poutre ;
b) la grandeur, la direction et le sens de la force exercée <u>par</u> la poutre (1) <u>sur</u> le pivot.

14. Une échelle ABCDE d'une longueur de 7 mètres, dont le poids est 50 N, est fixée en A par une rotule et appuyée contre un mur sans frottement en E ; elle fait un angle de 60° avec l'horizontale comme illustré à la figure 14. Un homme de 700 N est à 5 mètres du point A sur l'échelle. Une corde, passant par une poulie fixe en C (de rayon 0,1 m) a une extrémité fixée en F et un poids de 25 N attaché à l'autre bout.
Déterminez :

   a) les réactions horizontale et verticale au point A ;
   b) la réaction du mur en E.

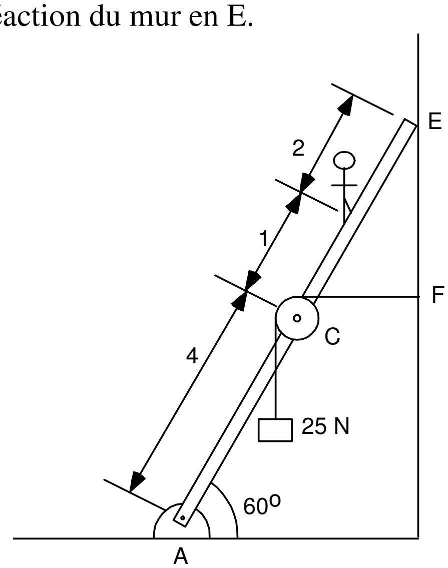


Figure 14

15. Un disque circulaire de 40 cm de diamètre, pivotant autour d'un axe horizontal à travers son centre, a une corde enroulée autour de sa jante. La corde passe sur une poulie sans frottement P et est attachée à un corps de poids 250 N. Une tige uniforme de 1,3 m de long est rattachée au disque avec un bout au centre du disque. Le montage est en équilibre, avec la tige horizontale, tel qu'illustré à la figure 15.
Déterminez :
   a) Quel est le poids de la tige ?
   b) Quelle est la nouvelle direction équilibrée de la tige quand un second corps de 20 N est suspendu à l'autre bout de la tige, tel qu'indiqué par la ligne pointillée ?

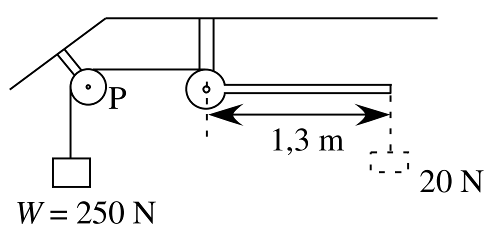


Figure 15

Quelques éléments de biomécanique…..

16. Un poids de 50 N est soutenu par la main d'une personne dont l'avant-bras est maintenu en position horizontale; cette dernière mesure 35 cm, comme l'indique la figure 16. Le biceps est fixé sur l'avant-bras, à 5 cm de l'articulation et fait un angle de 15° avec la verticale.

Déterminez :

a) la force ascendante exercée sur l'avant-bras par le biceps ;
b) la force exercée par l'humérus sur l'avant-bras, au niveau de l'articulation.

N.B. On néglige le poids du bras et de l'avant-bras. Considérez le coude comme une rotule et le biceps comme une « corde ».

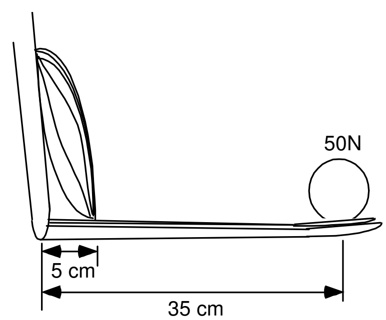


Figure 16

17. Considérons la situation où une personne se tient sur la pointe des pieds (figure 17-a). Le poids total du corps est équilibré par la poussée du sol sur les orteils. La figure 17-b présente un modèle mécanique de cette position, en mettant en évidence les grandeurs des forces présentes :

- ***T*** : tension dans le tendon d'Achille.
- *R* : réaction du tibia sur le pied.
- *N* : poussée normale du sol sur le pied (égale ici au poids de la personne).
- On néglige le poids du pied.

Déterminez les valeurs de ***T*** et *R* en utilisant les données de la figure 17-b, et sachant que $N = 700$ N.

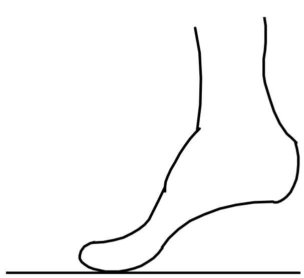


Figure 17-a

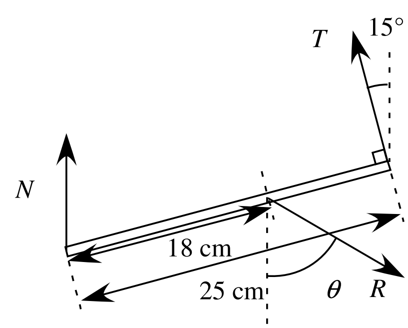


Figure 17-b

18. Une personne se tient penchée, en maintenant son dos horizontal ; il tient immobile un poids de 200 N (figure 18-a). Les muscles du dos sont fixés à la colonne vertébrale en un point situé aux deux tiers du dos ; ils exercent leur effet de traction avec un angle de 12° avec l'horizontale. La figure 18-b nous montre les forces du jeu. Sachant que la partie supérieure du corps pèse 350 N, déterminez :

    a) La tension T dans les muscles du dos ;
    b) La force de compression R_x dans la colonne.

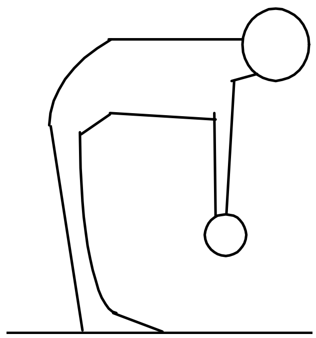


Figure 18-a

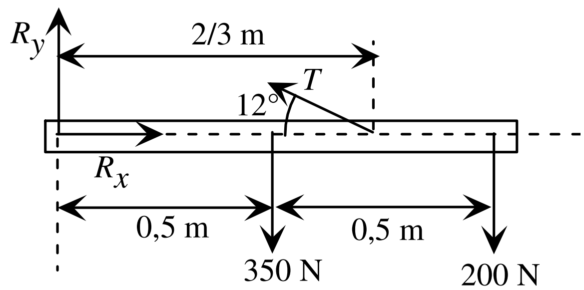


Figure 18-b

Réponses :

1. **6 Nm. Oui, sens anti-horaire.**
2. **0 Nm. Non.**
3. **-8,5 Nm. Oui, sens horaire.**
4. **4,28 Nm. Oui, sens anti-horaire.**
5. **-40,68 Nm. Oui, sens horaire.**
6. **0 Nm. Non.**
7. **-332,59 Nm. Oui, sens horaire.**
8. **-23,14 Nm. Oui, sens horaire.**
9. **393,65 Nm. Oui, sens anti-horaire.**

10. **a)** $T = 1442{,}5$ **N**

b) $A = 1063{,}2$ **N avec un angle de 16,4° au-dessus de l'horizontale (premier quadrant).**

11. **a)** $T = 815{,}03$ **N**

b) $A_x = +650{,}92$ **N ;** $A_y = +981$ **N**

c) $A = 1177{,}31$ **N, à** $\theta = 56{,}43°$ **(premier quadrant).**

12. **a)** $T = 981$ **N**

b) $A_x = +849{,}57$ **N ;** $A_y = +1962$ **N**

13. **a)** $T_B = 725{,}05$ **N**

b) $A = 1378{,}77$ **N, à** $\theta = 59{,}47°$ **(troisième quadrant).**

14. **a)** $A_x = +300{,}64$ **N;** $A_y = +775$ **N**

b) $N = 325{,}64$ **N**

15. **a)** $W_{tige} = 76{,}92$ **N**

b) **48,86° par rapport à l'horizontale.**

16. **a)** $F = 362{,}35$ **N**

b) $F = 314{,}32$ **N, à** $\theta = -72{,}64°$ **(4^{e} quadrant)**

17. $T = 1738{,}67$ **N** $R = 2421{,}6$ **N à** $\theta = 10{,}71°$

18. **a)** $T = 2705{,}48$ **N**

b) $R_x = +2646{,}35$ **N**