

Mécanique en classe de troisième

MISE EN MOUVEMENT D'UN OBJET INITIALEMENT IMMOBILE

1) Quels contenus pour cette rubrique du programme ?

Pour tenter de répondre à cette question, on envisage ici deux exemples et on essaie, dans la suite de l'article, de transcrire les observations et les lois en termes accessibles aux élèves.

Mais, au préalable, quelques remarques s'imposent.

2) Remarques.

— Dans ces exemples, intervient le phénomène de frottement de glissement. Or, ni le programme, ni les instructions n'indiquent qu'une étude systématique de ce phénomène soit à faire. Aussi, n'est-il pas question ici de proposer une inflation qui amènerait, faute de temps, à négliger des aspects plus fondamentaux de ce programme. Mais, celui-ci prévoit l'introduction de quelques exemples de forces et, parmi celles-ci, les forces de contact. C'est pourquoi sont présentés ici des exemples où intervient le frottement de glissement, limité d'ailleurs au cas du mouvement de translation rectiligne d'un solide, pour simplifier le problème.

— Dans la vie pratique, le roulement remplace avantageusement le glissement. Son étude, plus délicate, ne fait pas l'objet de cet article.

— Enfin, dans la vie pratique, la mise en mouvement d'un véhicule est suivie, généralement, de son maintien en mouvement. Aussi, ces deux phases successives sont-elles envisagées ici et, plus précisément, la phase de maintien en mouvement rectiligne uniforme.

3) Etude d'un premier exemple au niveau du maître.

a) LA SITUATION.

Une caisse est posée sur le sol. On veut la déplacer en la faisant glisser. Plus précisément, on veut la mettre en mouvement lent de translation rectiligne par rapport au sol. Pour cela, une poignée étant solidement fixée à la caisse, on tire horizontalement sur cette poignée de plus en plus fort.

Autrement dit, on exerce en B, sur la caisse une force $\vec{F}$

horizontale, de direction invariable, d'intensité lentement croissante, le support de $\vec{F}$ étant contenu dans le plan vertical passant par le centre de masse I du solide (pour simplifier) (fig. 1).

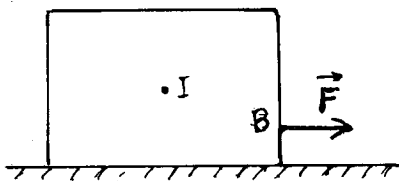


Fig. 1

Tant que l'intensité de $\vec{F}$ n'atteint pas une valeur suffisante F^* , (qu'on peut mesurer avec un dynamomètre), le solide reste immobile. Il est en équilibre par rapport au sol.

Quand l'intensité de $\vec{F}$ atteint cette valeur limite notée F_s , le solide glisse dans la direction et le sens de $\vec{F}$. Il y a rupture d'équilibre et mise en mouvement.

b) ETUDE SIMPLIFIÉE DE L'ÉQUILIBRE.

— Le solide soumis de la part de l'extérieur (Terre, opérateur, sol) :

- à « son poids » $\vec{P}$, connu,
- à la force motrice $\vec{F}$, connue,
- aux actions de contact du sol sur sa base qu'on admet équivalentes à une force unique $\vec{A}$ qu'on va étudier.

— Les conditions nécessaires d'équilibre sont :

- somme géométrique des forces extérieures exercées sur le solide : nulle,
- moment résultant, par rapport à tout point de l'espace, de toutes ces forces : nul.

Dans le cas de trois forces, cela revient à écrire :

- les trois forces $\vec{P}$, $\vec{F}$, $\vec{A}$ sont coplanaires et concourantes et on a :

(*) On convient de noter F l'intensité de $\vec{F}$.

$$\vec{P} + \vec{F} + \vec{A} = \vec{0} \text{ (fig. 2).}$$

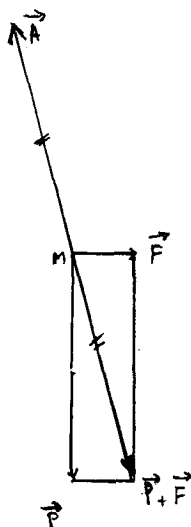


Fig. 2

Donc, le support de $\vec{A}$ passe par le point O de concours des supports de $\vec{P}$ et de $\vec{F}$ et $\vec{A}$ est nécessairement inclinée (fig. 3).

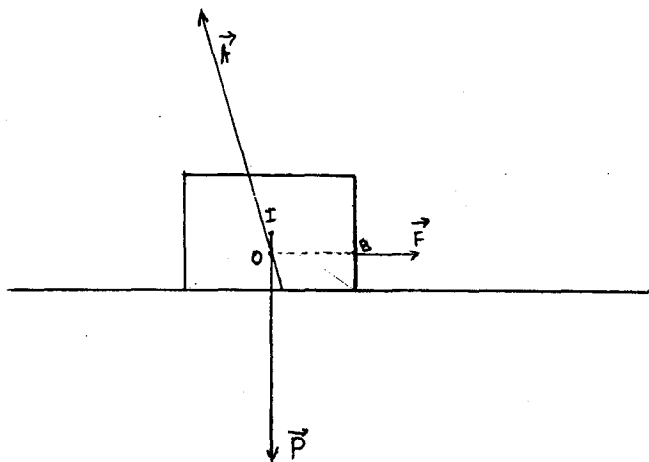


Fig. 3

Elle est équivalente à l'ensemble de ses composantes normale et tangentielle notées ici $\vec{S}$ et $\vec{R}$ en vue de la suite de l'article et telles que :

$$\vec{A} = \vec{S} + \vec{R} \text{ (fig. 4)}$$



Fig. 4

avec $S = P$ et $R = F$.

On nomme souvent $\vec{R}$ la force de frottement.

c) ÉTUDE DE LA FORCE DE FROTTEMENT ET DE LA MISE EN MOUVEMENT DU SOLIDE.

— Quand on ne tire pas sur la caisse, on a : $F = 0$. Les conditions d'équilibre se traduisent par :

$$\vec{P} + \vec{A} = \vec{0} \text{ soit } \vec{A} = -\vec{P} \text{ ou encore } A = P.$$

— Quand on tire de plus en plus fort sur la caisse et qu'elle reste immobile, l'intensité de $\vec{F}$ augmente progressivement (fig. 5)

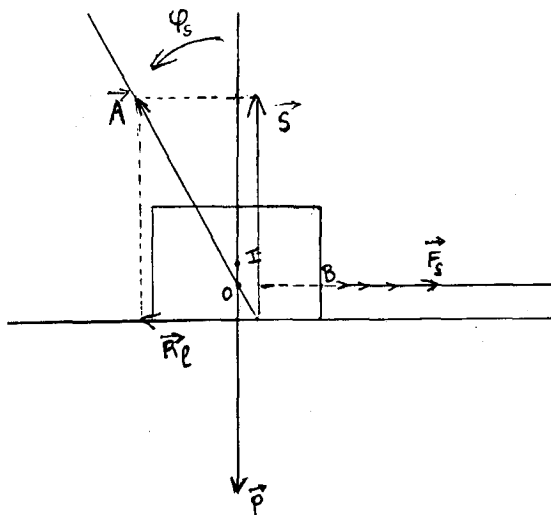


Fig. 5

et le support de $\vec{A}$ s'incline progressivement. L'angle φ qu'il fait avec la verticale est, à tout instant, tel que :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{S}.$$

La force de frottement $\vec{R}$ est opposée à $\vec{F}$; son intensité augmente donc avec celle de $\vec{F}$.

Dès que l'intensité de $\vec{F}$ dépasse légèrement celle de $\vec{R}$, la caisse démarre; il y a rupture de l'équilibre (on suppose la poignée placée de façon qu'il n'y ait pas basculement). En effet, il y a mise en mouvement dans le sens de $\vec{F}$, donc résultante non nulle et $F > R$. Le mouvement naissant de la caisse est accéléré.

Donc, à la rupture d'équilibre, l'intensité de $\vec{R}$ a atteint sa valeur limite R_s ; celle-ci dépend de la nature des surfaces en contact et du poids de la caisse. On peut dire aussi que le support de $\vec{A}$ a atteint son inclinaison limite mesurée par l'angle φ_s .

On a alors :

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{R_s}{S}$$

$\operatorname{tg} \varphi_s$ se nomme le coefficient de frottement de glissement statique.

Pratiquement, si le mouvement naissant se fait sans à-coup, on peut confondre F et R_s et l'on a $\operatorname{tg} \varphi_s \simeq \frac{F}{S}$; dans ce cas, on prend pour F ou R_s la valeur de F lue sur le dynamomètre au démarrage.

d) ÉTUDE DU MAINTIEN EN MOUVEMENT DE TRANSLATION RECTILIGNE UNIFORME.

Après la rupture de l'équilibre, on constate (à l'aide du dynamomètre) qu'il n'est plus nécessaire, pour que la caisse continue à glisser à vitesse constante, d'exercer sur elle une force $\vec{F}$ aussi intense qu'au démarrage. Il suffit que $\vec{F}$ ait pour intensité F_d légèrement inférieure à F_s .

Lors de cette phase de mouvement rectiligne uniforme, la résultante des quatre forces est nulle. Donc l'intensité de $\vec{R}$ est

R_d telle que $R_d = F_d$. L'inclinaison de $\vec{A}$ est, dans ce cas, légèrement plus faible que lors du démarrage. L'angle φ a pour valeur

$$\varphi_d \text{ tel que } \operatorname{tg} \varphi_d = \frac{R_d}{S}.$$

$\operatorname{tg} \varphi_d$ se nomme le coefficient de frottement de glissement dynamique.

Dans la pratique, les deux coefficients φ_s et φ_d ont souvent des valeurs voisines. Par exemple, pour le contact acier mi-dur/acier mi-dur $\operatorname{tg} \varphi_s = 0,25$, $\operatorname{tg} \varphi_d = 0,2$ pour des charges moyennes. Pour certains matériaux, la différence est plus sensible. Dans la suite de l'article, on n'envisagera que les matériaux pour lesquels les deux coefficients sont voisins.

4) Essai de transcription au niveau des élèves (•) et remarques (—).

— Il n'est nullement question d'employer tous ces outils mathématiques.

— Il y a tout d'abord un principe :

- si le solide est immobile, c'est que toutes les forces qui agissent sur lui compensent leurs effets ;
- par exemple, si on ne touche pas à la caisse, elle est immobile. Comme elle est pesante, c'est qu'il existe une force de soutien $\vec{S}$ du sol qui l'empêche de s'enfoncer. On a tout juste $P = S$;
- si on tire sur la caisse avec une force $\vec{F}$ et que la caisse ne bouge pas, c'est qu'il existe une force $\vec{R}$ résistante, due au frottement, juste opposée à $\vec{F}$. Alors, le mobile est soumis à quatre forces opposées deux à deux. Le bilan total est nul. $\vec{S}$ compense $\vec{P}$ et $\vec{R}$ compense $\vec{F}$.

— Il y a ensuite à compléter ce principe :

- si, à partir du repos, la caisse est mise en mouvement, c'est que l'intensité de la force motrice $\vec{F}$ arrive à dépasser celle de la force résistante $\vec{R}$;
- le bilan total n'est plus nul. Car, si $\vec{S}$ compense toujours $\vec{P}$, par contre, $\vec{F}$ dépasse $\vec{R}$.

— Il y a enfin à exploiter ce principe :

- si, après le démarrage, le mouvement devient uniforme, c'est qu'à nouveau, le bilan total est nul. $\vec{S}$ compense $\vec{P}$ et aussi, $\vec{F}$ compense $\vec{R}$. Son intensité est juste assez grande pour que le mobile continue « sur sa lancée ».

— L'existence de la force $\vec{S}$ n'est pas évidente car aucun effet sensible dû à cette force n'apparaît ; le sol est « solide ». Le recours à une expérience utilisant un support souple peut aider à faire accepter cette existence.

— Le bilan nul associé au repos est ressenti comme un résultat normal. Le fait que l'intensité de $\vec{R}$ soit variable en même temps que celle de $\vec{F}$ est à signaler car il n'est peut-être pas évident.

— C'est le mouvement uniforme qui soulève le plus de difficultés. Les enfants associent l'idée de mouvement à celle de force motrice et non de bilan nul ; à l'aide de « plus fort » et non pas « d'aussi fort ». Il faut probablement insister sur le fait qu'une fois lancé, le mobile pourrait continuer à condition, soit qu'on supprime le frottement (mobile sur coussin d'air : alors le poids $\vec{P}$ et la force $\vec{A}$ existent toujours mais $\vec{A}$ est verticale et telle que $A = P$ donc $R = 0$), soit qu'on « la neutralise » par l'action d'une force motrice.

— En résumé :

- mise en mouvement, à partir du repos, bilan non nul $F > R$,
- repos avant le démarrage ou maintien en mouvement uniforme, bilan nul : $F = R$.

5) Etude d'un deuxième exemple au niveau du maître.

a) LA SITUATION.

La même caisse étant immobile sur le sol, on veut la faire glisser à vive allure, en ligne droite.

Le mode opératoire est le même.

b) ETUDE SIMPLIFIÉE DE LA PHASE D'ACCÉLÉRATION.

La phase d'équilibre au cours de laquelle la force motrice n'est pas assez intense pour mettre le mobile en mouvement est bien plus brève que dans l'exemple précédent.

En revanche, la phase de mouvement accéléré peut être plus longue. Elle dure jusqu'à ce que le mobile atteigne la vitesse souhaitée.

Au cours de cette phase, l'intensité de la vitesse du mobile passe de la valeur zéro à une valeur appréciable ; alors que précédemment, il suffisait seulement d'un glissement lent.

La relation fondamentale appliquée au solide, en utilisant les notations précédentes s'écrit :

$$\vec{P} + \vec{F} + \vec{S} + \vec{R} = m \vec{\gamma}.$$

Elle prend la forme : $\vec{F} + \vec{R} = m \vec{\gamma}$, ou encore :

$$\vec{F} = m \vec{\gamma} - \vec{R}.$$

Ce qui signifie que la force motrice doit être d'autant plus intense que la masse à tirer est plus grande (ce qui était déjà vrai dans l'exemple précédent) mais aussi d'autant plus intense que l'accélération est plus grande.

c) ETUDE DU MAINTIEN EN MOUVEMENT UNIFORME.

Une fois atteinte cette vitesse, le terme $m \vec{\gamma}$ devient nul et l'intensité de la force $\vec{F}$ nécessaire au maintien en mouvement uniforme est égale à celle de $\vec{R}$. On retrouve le résultat de l'exemple précédent.

Quelle que soit la vitesse atteinte, pendant la phase de mouvement uniforme, on a :

$$\vec{P} + \vec{S} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0} \quad \text{soit} \quad F = R.$$

La force motrice reste constante pendant cette phase.

6) Essai de transcription au niveau des élèves (•) et remarques (—).

— Pendant le démarrage, la vitesse du mobile augmente beaucoup. Il faut donc que la force motrice dépasse largement la force de frottement pour communiquer au mobile la vitesse souhaitée au bout d'un temps donné.

— Quand le mobile est lancé, ce n'est plus la peine d'accélérer. Il suffit de maintenir une force motrice $\vec{F}$ qui compense la force de frottement $\vec{R}$.

— Le fait qu'il faut, dans ce dernier cas, développer une force moins intense est ressenti comme naturel, mais l'interprétation

donnée généralement est loin d'être satisfaisante : « le frottement est plus fort au démarrage qu'en cours de route », « le frottement diminue quand la vitesse augmente ».

S'il est exact que le coefficient de frottement dynamique soit légèrement inférieur au coefficient de frottement statique, ce n'est pas cette légère différence qui est en cause.

La différence fondamentale entre ces deux phases vient de ce qu'au démarrage, il faut *accélérer* le mobile ; pendant son mouvement uniforme, c'est inutile.

— Pendant le démarrage, il faut « vaincre le frottement et l'inertie » du mobile. Pendant le régime de croisière, il suffit de « vaincre le frottement ». « L'inertie du mobile l'aide à continuer sa route sur sa lancée ».

— L'inertie peut ainsi apparaître comme un facteur résistant (démarrage) et comme un facteur moteur (mouvement uniforme). En fait, il s'agit bien d'une opposition au changement de vitesse.

— On a volontairement employé ici des termes du langage courant. Ils ne sont pas à dédaigner s'ils permettent d'appréhender les phénomènes, à condition qu'on emploie, au moment opportun, les termes appropriés pour désigner les grandeurs physiques (la masse d'inertie, par exemple).

7) Réponse possible ?

L'examen de ces deux cas a pour but de présenter les résultats importants :

- pour mettre en mouvement (de translation rectiligne) un objet immobile, il faut exercer sur lui une force motrice telle que l'ensemble de toutes les forces qu'il subit aient un bilan non nul ;
- cette force doit être d'autant plus intense qu'on veut (toutes choses égales d'ailleurs) que le mobile atteigne plus vite une plus grande vitesse ;
- pour maintenir en mouvement (de translation rectiligne uniforme) un objet, quelle que soit sa vitesse (non nulle), il faut, dans la pratique, exercer une force motrice. Mais, il suffit que celle-ci compense tout juste les forces résistantes de façon que l'ensemble de toutes les forces exercées aient un bilan nul ;

- ah ! s'il n'y a pas de frottement, pas de force résistante, alors, plus besoin de force motrice pour entretenir le mouvement (de translation rectiligne et uniforme) !

Madeleine MESMIN,
(C.R.F. P.E.G.C. Paris Batignolles).
