

Raisonnements des lycéens et des étudiants en mécanique du solide

par Jacqueline MENIGAUX
L.D.P.E.S. - Université Paris VII

1. INTRODUCTION

Ce travail porte sur la compréhension par des lycéens et des étudiants de la loi fondamentale de la dynamique appliquée à un solide. Plus spécifiquement, on s'interroge sur la manière dont sont envisagés deux des trois aspects de l'évolution d'un système : translation et rotation, ainsi que sur leur éventuelle simultanéité. Le troisième aspect, celui de la déformation du système, n'est pas directement abordé dans cet article mais il y sera fait référence.

Nous avons proposé à différents élèves une situation de mécanique mettant en cause un objet non assimilable à un point matériel et nous avons pu constater que la plupart d'entre eux ont tendance à considérer comme successifs voire exclusifs les phénomènes de rotation et de translation, qui, dans l'exemple choisi, se produisent simultanément ainsi qu'à faire jouer un rôle abusif au point d'application des forces dans le cas où ce point n'est pas pertinent.

On s'interroge, en fin d'article, sur les facteurs susceptibles d'intervenir dans les raisonnements observés. Ces facteurs sont probablement à chercher d'une part dans les composantes habituelles du raisonnement naturel, d'autre part, dans les caractéristiques de l'enseignement reçu. Quelques propositions suivent.

2. QUELQUES PRÉCISIONS THÉORIQUES

Le mouvement le plus général d'un solide libre de se déplacer peut être décomposé en une translation et une rotation simultanées. Il est particulièrement fructueux de prendre, pour les définir, le centre de masse G du solide.

Par définition, le mouvement de translation du solide est alors celui de son centre de masse. La généralisation de la loi fondamentale de la dynamique pour une particule (ou point matériel) à l'ensemble des particules d'un système quelconque, en particulier d'un solide, conduit à la relation fondamentale

$$\Sigma \vec{F} = M \vec{a}_G \quad (1)$$

dans laquelle $\Sigma \vec{F}$ est la résultante des forces appliquées au solide

M est la masse du solide

\vec{a}_G est l'accélération du centre de masse.

Cette relation est vérifiée quelque soit l'instant du mouvement de translation dans la limite où ce mouvement reste dans le cadre de la mécanique classique (vitesse de translation très inférieure à 10^8 m.s⁻¹).

Bien que décrivant l'accélération de translation du solide sous l'effet des forces qui lui sont appliquées, la relation (1) est donc identique à la relation fondamentale de la dynamique appliquée à un point matériel, le point G, de masse M égale à celle du solide et soumis à la résultante des forces subies par le solide. A ce niveau d'analyse, il est superflu de connaître le point précis d'application des forces sur le solide, il suffit d'affecter au solide étudié toutes les forces appliquées sur l'un quelconque de ses points.

L'étude de la rotation du solide se fait alors dans le référentiel du centre de masse G, que celui-ci soit galiléen ou non ; elle nécessite la connaissance de la position exacte de G et l'identification de toutes les forces avec, cette fois, pour chacune d'elles, leur point précis d'application ; elle passe par l'application du théorème du moment cinétique $\vec{\sigma}_G$ calculé en G :

$$\frac{d\vec{\sigma}_G}{dt} = \Sigma \vec{M}_G \vec{F}$$

où $\Sigma \vec{M}_G \vec{F}$ est la somme des moments par rapport à G des forces subies par le solide.

Cette relation est valable à tout instant de la rotation dans la mesure où le mouvement n'est pas relativiste.

Bien entendu, le cas le plus général d'évolution cinétique d'un solide est celui où translation et rotation sont susceptibles d'intervenir simultanément. Et s'il s'agit d'un système quelconque, il faut bien entendu inclure dans cette évolution la déformation.

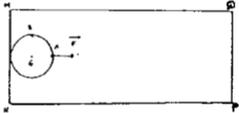
3. QUESTIONS ET RÉSULTATS

Cette enquête a été menée auprès de lycéens de première et terminale et d'étudiants de première et de deuxième année de DEUG A. Les questionnements ont été effectués sous forme de questionnaires papier-crayon.

On a présenté à des lycéens de première E (N = 17), de terminale C (N = 18) ainsi qu'à des étudiants de DEUG A première année (N = 41) et deuxième année (N = 12) la situation suivante :

Un palet autoporteur, de rayon R, initialement immobile contre l'un des bords MN d'une table à coussin d'air horizontale (schématisée par le rectangle MNPQ de la figure de l'encadré 1) traverse cette table sous l'action d'une force horizontale \vec{F} constante (direction : NP, sens : de N vers P, norme) exercée en permanence, grâce à un dispositif approprié, toujours au même point du palet, soit le point A (repéré par un point), soit le point B (repéré par une croix).

La question posée était la suivante : le palet mettra-t-il le même temps, plus de temps ou moins de temps pour heurter la paroi opposée PQ de la table selon que la force constante \vec{F} est exercée au point A ou au point B ?

<p>SITUATION: un palet sur une table à coussin d'air; on exerce une force \vec{F} constante toujours au même point.</p> 	<p>QUESTION: le palet mettra-t-il le même temps, plus ou moins de temps, pour heurter la paroi PQ selon que la force constante \vec{F} est exercée en permanence au point A ou au point B ?</p>
--	---

RÉPONSES DES LYCÉENS ET ÉTUDIANTS		REPONSE CORRECTE	
	le même temps	plus de temps si force en B	
1ère (N=17)	6%	83%	Le même temps quel que soit le point d'application de \vec{F} car la durée de traversée de la table par le palet ne dépend que du mouvement de G.
TC (N=18)	22%	61%	
DEUG A 1 et 2 (N=53)	24%	67%	

Encadré 1

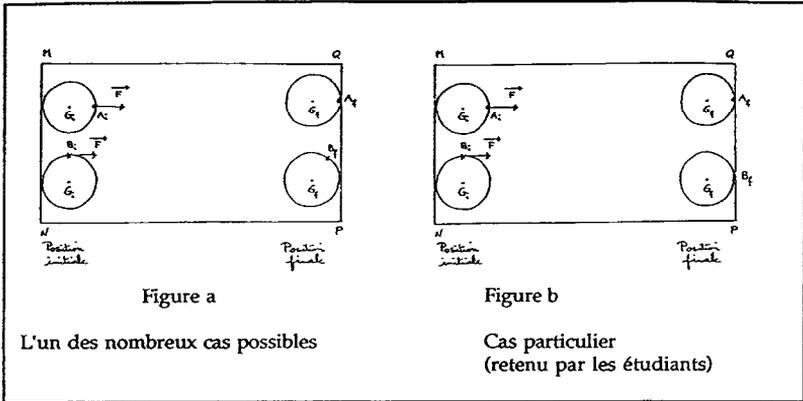
La réponse correcte à cette question (voir encadré 1) est immédiate compte tenu des quelques considérations théoriques précédentes : la durée de traversée de la table par le palet est la même dans les deux cas car elle ne dépend que de la translation du palet c'est-à-dire du mouvement de G ; or le mouvement de G est inchangé lorsque le point d'application de la force change (force exercée identique, mêmes positions initiales G_i et finale G_f du centre de masse comme le montre la figure a de l'encadré 2). Une telle réponse est suffisante ; cependant, on peut préciser que, lorsque la force est appliquée en B, le mouvement du palet est composé d'une translation, identique à celle que le palet a si la force est exercée en A, et d'un mouvement pendulaire simultané autour de l'axe vertical passant par G. En l'absence de données numériques (masse et rayon du palet, intensité de la force, distance à parcourir), on ne peut prévoir quel point du palet heurte la paroi PQ ; la figure a de l'encadré 2 représente l'un des nombreux cas possibles pour la position finale B_f de B. On peut alors expliquer les phénomènes en termes de travail de la force et d'acquisition d'énergie cinétique par le palet au cours de son mouvement. Ainsi, le travail de la force est-il plus grand que (ou à la limite égal à) celui de la force appliquée en A puisque la distance des projections de B_i à B_f sur NP est supérieure (ou à la limite égale) à A_i $A_f = G_i G_f$. Il en résulte que l'énergie cinétique finale du palet est plus grande (ou à la limite égale) si la force est appliquée en B que si la force est exercée en A. Cela signifie que le palet, lorsqu'il heurte la paroi PQ, possède une énergie cinétique finale de translation identique à celle qu'il a lorsque la force est appliquée en A et une énergie cinétique finale de rotation associée à son mouvement pendulaire*.

L'encadré 1 résume la réponse correcte à la question posée et fournit celle des élèves interrogés ; pour plus de 60 % d'entre eux, toutes populations regroupées, le palet mettra plus de temps pour heurter la paroi PQ lorsque la force F est exercée en B que lorsqu'elle est exercée en A.

Parmi ceux qui donnent cette réponse, plus de 60 % des lycéens et 20 % des étudiants la justifient de la façon suivante (voir encadré 3) : lorsque la force F est exercée en B, le palet, avant de se translater suivant le

* L'énergie cinétique finale de rotation est comprise entre 0, lorsque la projection sur NP de B_i B_f est égale à G_i G_f et une valeur maximum lorsque la projection sur NP de $B_i B_f$ vaut $(G_i G_f + R)$; ce dernier cas, le seul retenu par les élèves interrogés, est schématisé sur la figure b de l'encadré 2.

sens de \vec{F} , effectue une rotation de $\frac{\pi}{2}$ (B est alors à la place initiale de A) pour que la droite d'action de la force passe par le centre de masse G ; ensuite seulement, le palet effectue un mouvement de translation identique à celui qu'il a si la force \vec{F} est appliquée directement en A, c'est-à-dire si la droite d'action de \vec{F} passe, dès l'instant initial, par le centre de masse.



Encadré 2

<u>JUSTIFICATIONS LES PLUS FREQUENTES DES ETUDIANTS</u>			
Le palet mettra plus de temps pour heurter la paroi PQ si la force constante \vec{F} est exercée en B parce que:			
N= 61	La rotation de $\frac{\pi}{2}$ se produit avant la translation	la simultanéité de la translation et de la rotation augmente la durée de traversée	le point B parcourt une distance plus grande que le point A
1ère	73% 	6% 	13%
TC	63% 	0% 	36%
DEUG A 1 et 2	20% 	20% 	37%

Encadré 3

En effet, les justifications données par ces élèves sont du type :

«le solide va d'abord subir une rotation de 90 degrés puis le solide va se mettre en mouvement, alors le temps total = temps de rotation + temps de translation > temps de translation seul» (1^{ère})

«il faut attendre que le mobile fasse une rotation de 90 degrés afin que la force s'applique en A» (1^{ère})

«dans un premier temps, avant de se déplacer, le mobile va effectuer une rotation d'un quart de tour pour que B soit à l'endroit de A ; ensuite, il effectue un mouvement rectiligne uniforme*» (TC)

« \vec{F} va entraîner une rotation du solide sur lui-même pendant un temps limité ($t <$ temps de déplacement) ce qui va introduire un retard» (TC)

«la force commence par donner un mouvement de rotation au palet avant que celui-ci commence à avancer» (DEUG A 1^{ère} année)

«rotation de $\pi/2$ avant déplacement rectiligne» (DEUG A 2^{ème} année).

Selon ces justifications, la rotation de l'objet survient prioritairement à la translation jusqu'à ce que le solide soit en «position adéquate» pour se translater. Les deux mouvements, qui se produisent simultanément dans l'exemple choisi, sont donc dissociés par les élèves.

La simultanéité de la rotation et de la translation n'est cependant pas systématiquement absente des justifications fournies, mais elle n'apparaît que chez 20 % des étudiants et chez 6 % des lycéens (cf encadré 3). Pourtant, le temps mis par le palet pour heurter le bord opposé de la table est plus grand, pour ces lycéens et étudiants, si \vec{F} est appliquée en B que si \vec{F} est appliquée en A car :

«pour une même force, on aura un mouvement conjugué de rotation autour de G et de translation» (1^{ère})

- * L'affirmation incorrecte du mouvement de translation rectiligne uniforme du palet est faite par plus d'un lycéen sur deux et semble encore très fréquente chez les étudiants ; les motifs invoqués sont que le palet est pseudo-isolé - ce qui est inexact mais reflète bien l'utilisation traditionnelle de la table à coussin d'air - ou que la somme des forces est constante - ce qui est exact. On peut envisager deux explications non exclusives à cette mise en relation «somme des forces constante \leftrightarrow vitesse constante» : incompréhension des termes «rectiligne uniforme» et/ou confusion du mot « uniforme» avec celui «d'uniformément accéléré», assimilation force-vitesse établie depuis longtemps en mécanique [1]

«le déplacement du palet se décompose en deux : une translation accompagnée d'une rotation, ce qui augmente la durée du déplacement» (DEUG A 1^{ère} année)

«tout en avançant, le solide va tourner sur lui-même» (DEUG A 2^{ème} année).

Selon ce second type de justifications, la simultanéité de la rotation et de la translation du palet n'est pas mise en cause mais l'existence de la rotation se traduit par un allongement de la durée de traversée de la table par le palet (les durées de rotation et de translation s'ajoutant vraisemblablement). La simultanéité de la translation et de la rotation est reconnue mais son traitement est mené de façon incorrecte.

Les justifications qui viennent d'être citées ne comportent aucun élément qui puisse laisser supposer que le palet en mouvement sur la table à coussin d'air soit appréhendé par les élèves interrogés comme un point matériel.

Un troisième type de justifications va nuancer cette constatation. L'encadré 3 indique qu'une proportion importante de lycéens (36 % en TC) et d'étudiants (37 % en DEUG A) estime que le temps de traversée du palet sera plus grand lorsque \vec{F} est exercée en B que lorsque \vec{F} est exercée en A car le point B est plus éloigné du bord PQ que le point A :

«la distance ($x_{\text{bord}} - x_B$) est supérieure à ($x_{\text{bord}} - x_A$)» (1^{ère})

«la distance sera plus grande» (1^{ère})

«le plus court chemin pour parvenir à un point est la ligne droite» (TC)

«B parcourt plus de distance, B est plus loin que A» (TC)

«même si la vitesse est la même, le point B parcourt une plus longue distance que le point A (points où sont appliquées les forces)» (DEUG A 1^{ère} année)

«la distance de A à PQ est plus petite» (DEUG A 1^{ère} année)

«on exerce la force sur une distance plus grande» (DEUG A 2^{ème} année).

Sûrement doit-on rapprocher de ces justifications certains commentaires évoquant le travail de la force F , déclaré à juste titre supérieur lorsque cette force est appliquée en B mais les détours en sont souvent difficiles à interpréter. Il reste que, dans ces raisonnements, l'argumen-

tation repose (80 % des cas) sur une formule valable pour un point matériel : $dW = \vec{F} \cdot \vec{v} \cdot dt$.

Dans ces justifications, comme dans celles qui sont centrées sur «une distance plus grande à parcourir», les raisonnements mis en œuvre ne portent donc que sur un seul point du solide, qui n'est pas le centre de masse G mais le point d'application de la force.

Pour les élèves interrogés, il n'est donc nullement compris que la translation d'un solide ne dépend pas du point d'application des forces et, par conséquent, pas de l'existence d'une rotation de l'objet sur lui-même, toutes choses étant égales par ailleurs.

4. DISCUSSION ET SUGGESTIONS

Les résultats acquis lors de ce travail prouvent que la plupart des lycéens et étudiants interrogés ont en commun les raisonnements suivants à propos du solide :

- une tendance à considérer comme successifs dans le temps des mouvements qui, de fait, se produisent simultanément,
- lorsque la simultanéité des mouvements est reconnue, une tendance à considérer que les mouvements influent l'un sur l'autre,
- une tendance à ne faire porter l'analyse que sur un point matériel, celui où la force est appliquée en permanence.

De tels raisonnements sont facilement explicables, d'une part, parce que certains d'entre eux relèvent d'un raisonnement décrit par ailleurs, le raisonnement linéaire causal, et, d'autre part, parce que tous sont induits par le type d'enseignement reçu.

Rappelons l'aspect important, qui nous concerne ici, du raisonnement linéaire causal, détecté en mécanique par S. FAUCONNET [3] et en électrocinétique par J.L. CLOSSET [4] puis mis en évidence en thermodynamique par S. ROZIER [5] : lorsque deux ou plusieurs phénomènes affectant la même objet sont concomitants, le raisonnement naturel tend à les considérer comme successifs. Nos résultats s'inscrivent tout à fait dans cette analyse.

Quant à l'enseignement reçu, il est essentiellement centré, de façon implicite au lycée et explicite à l'université, sur la mécanique du point matériel. Dans l'enseignement secondaire, il existe une certaine ambiguïté : on y affiche la volonté d'y étudier des objets, plus en prise avec la réalité qu'un point matériel, alors qu'en fait, souvent, on y étudie seulement un point matériel. Cette ambiguïté n'existe théoriquement plus dans les études universitaires, au moins dans la première année de DEUG scientifique qui est dominée par la mécanique newtonienne du point matériel, bien que les exemples traités concernent des objets. Il n'est donc pas surprenant que lycéens et étudiants fassent jouer un rôle important au point d'application précis des forces dans la translation du solide et qu'ils en viennent à une focalisation abusive sur ce point d'application.

Une deuxième caractéristique de l'enseignement de mécanique, qu'il soit secondaire ou supérieur, est de faire étudier séparément les phénomènes : d'abord la translation puis la rotation et enfin, si besoin est, la déformation. Le choix des situations étudiées est révélateur d'une telle démarche : lorsqu'on étudie la translation d'un objet, on «gèle» le plus souvent sa rotation en limitant les forces qu'il subit ou bien en le déclarant ponctuel ; on «gèle» aussi sa déformation en le déclarant indéformable ; lorsqu'on étudie la rotation d'un objet sur lui-même, objet indéformable bien sûr, on lui ôte toute velléité de translation en déclarant l'axe de rotation fixe dans l'espace ; enfin, lorsqu'on étudie la déformation, il s'agit du ressort dont une des extrémités est fixe (pas de translation d'ensemble possible) et dont l'autre extrémité est soumise à une force dans l'axe du ressort (pas de rotation possible). Les lycéens et les étudiants sont donc habitués à étudier séparément les phénomènes et le pas est vite franchi qui consiste à amalgamer étude séparée des phénomènes, par souci compréhensible de simplification de la part de l'enseignement, et incompatibilité de la coexistence dans le temps de ces phénomènes. On comprend ainsi plus aisément pourquoi certains élèves interrogés méconnaissent ou excluent la simultanéité de la translation et de la rotation.

Quelle qu'en soit la cause - tendance naturelle débordant largement le cadre de la mécanique et/ou conséquence de l'enseignement reçu dans ce domaine - les raisonnements spécifiques au solide mis en évidence dans ce travail sont le fait de plus de deux tiers des élèves interrogés ; ils ne peuvent donc être méconnus de la communauté enseignante. Si la compréhension des points évoqués ci-dessus est un

objectif recherché par l'enseignement, alors quels sont les moyens susceptibles d'y contribuer ?

Les grandes tendances du raisonnement naturel ne sauraient être infléchies par une action ponctuelle isolée. Seul, un ensemble de telles actions menées dans plusieurs domaines de la physique peut éventuellement modifier cette exclusivité du raisonnement «à une seule variable» ou «à un seul phénomène» à la fois. Le problème évoqué ici est l'une des bonnes occasions de contribuer à cet ensemble d'actions. Par ailleurs, faudrait-il enseigner tellement plus de choses qu'à l'heure actuelle ? Dans le secondaire comme dans le supérieur, la relation $\Sigma \vec{F} = M \vec{a}_G$ est donnée, voire démontrée. Elle devrait donc permettre de répondre à la question posée ici. Simplement, la plupart du temps, c'est à un solide en translation qu'on applique cette relation, avec un point d'application de forces bien orthodoxe (point «dans l'axe du mouvement» ou centre de masse), sans se rendre compte que, par ce choix, on restreint involontairement la portée de la relation ; de ce fait, on ne «voit» pas, si l'on peut dire, que cette relation contient toutes les informations nécessaires. La question décrite dans cet article est un exemple de ce que l'on peut proposer pour faire dire son maximum à une relation formelle, sans plus de calculs. Dans la même logique, on peut se demander pourquoi, lorsqu'on est censé ne traiter que la translation des objets (programme de terminale C, D, E), on continue à faire semblant d'attribuer de l'importance au point d'application précis des forces, en accrochant scrupuleusement le poids au centre de masse et la réaction d'un plan incliné sur un bloc au centre de la face en contact [2]. Et si on estime devoir le faire absolument, il faut savoir que le prix à payer risque bien d'être ce que nous observons ici : une centration exclusive sur ce point d'application, là où il n'est pas pertinent. C'est donc, comme toujours pour ce type d'investigations, sur un problème d'objectifs d'enseignement que nous débouchons.

RÉFÉRENCES

- [1] L. VIENNOT 1979, Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire, éd. Hermann, Paris.
- [2] L. VIENNOT 1989, Bilans des forces et loi des actions réciproques. Analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques, B.U.P. n° 716, pp. 951-971.

- [3] S. FAUCONNET 1981, Étude de résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique, Thèse 3^{ème} cycle, Université Paris VII (disponible au L.D.P.E.S.).
- [4] J.L. CLOSSET 1989, Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique, B.U.P. n° 716, pp. 931-949.
- [5] S. ROZIER 1988, Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire, Thèse (nouveau régime), Université Paris VII (disponible au L.D.P.E.S.).