

ANNEXES

Présentation

Chacun s'accorde pour penser que l'enseignement de la physique doit s'améliorer ; rares sont ceux qui justifient les procédés qu'ils préconisent pour y parvenir. C'est ce qui va être fait dans les annexes en présentant des applications du modèle proposé au premier chapitre de *La démarche expérimentale*. Notons que les différentes conséquences pratiques de la théorie montrent qu'elle est utile, ce qui participe à sa validation¹.

Craignant que ceux des lecteurs qui ont toujours été rebutés par les matières scientifiques à cause des mathématiques soient effarouchés, j'ai préféré placer les arguments comportant un peu de technique en annexe. Cependant il n'est pas absolument nécessaire de savoir faire les calculs pour saisir le sens des raisonnements et, à peu de choses près, il suffit d'avoir les bases correspondant à celles qui sont requises pour passer le baccalauréat pour les comprendre.

Comme par ailleurs, il est aussi possible de développer les annexes à l'infini, je ne garde que l'essentiel dans le manuel, on trouvera des compléments sur la toile². Ainsi sera-t-il éventuellement possible de les enrichir par la suite.

Description

Dans les annexes 1, 2 et 3 sont confrontés les **énoncés des lois fondamentales de la mécanique classique** telles qu'elles sont enseignées et ceux que je propose qui, curieusement, sont les seuls à être utilisables rationnellement. On y trouvera donc :

- la loi des actions réciproques ;
- la loi fondamentale de la dynamique ;
- le principe de la conservation de l'énergie.

On y trouvera aussi les définitions :

- des référentiels galiléens ;
- du travail ;
- de l'énergie potentielle ;
- de l'énergie cinétique.

Dans l'annexe 4 je montre comment rédiger des textes d'exercices que les étudiants puissent résoudre en utilisant leur raisonnement au lieu de leur mémoire. J'ai pris comme modèle des textes soigneusement élaborés par Yvan Simon. Ils m'ont permis de définir les critères qui caractérisent des textes de problèmes dont il est possible d'argumenter la solution. J'exposerai ensuite les principes auxquels une telle argumentation doit satisfaire en montrant comment procéder.

¹ Notons que les références aux chapitres se rapporteront à *La démarche expérimentale*. Voir chapitre 1.

² <http://www.courville.org/mediawiki/index.php/Brenasin>

On trouve les valeurs des constantes utiles dans l'annexe 5 afin de pouvoir résoudre dans l'annexe 6 une série de petits exercices ayant pour objectif de calculer des **ordres de grandeurs**. Il faut les connaître pour élaborer un problème en justifiant les approximations qui interviennent dans la modélisation des systèmes matériels.

Dans l'annexe 7 je donne un exemple du jeu auquel il est possible de se livrer avec les étudiants en leur proposant sur l'expérience de Millikan un texte « théorique » puis un texte « empirique » selon les définitions données au chapitre 4.

J'analyse dans l'annexe 8 un texte d'exercice tellement formel qu'il ne se réfère à aucune situation : ni matérielle ni théorique. Il est pris dans les séries de travaux dirigés de DEUG à l'université Pierre et Marie Curie du temps où j'enseignais encore. Il peut sembler caricatural, mais il présente des caractéristiques que de nombreux textes partagent à des degrés divers que ce soit au lycée ou à l'université.

Je mets en exergue dans l'annexe 9 ce qui me semble critiquable dans les verbalisations habituelles. L'analyse, ligne par ligne, des termes utilisés dans un texte d'exercice montre qu'ils ne respectent pas le statut des entités telles que je les ai définies dans l'ouvrage. J'insiste, il ne s'agit pas de mettre en cause les enseignants mais leur pratique, en précisant qu'il leur est impossible de la modifier tant que leur propre formation ne leur explicite pas le déroulement effectif d'une démarche expérimentale. Je montre ce qui change lorsqu'on s'en préoccupe et je propose les éventuelles modifications qui en résultent.

J'illustre dans l'annexe 10 pourquoi, contrairement à des idées communes, les questionnaires ne créent pas de connaissance³.

J'attire l'attention dans l'annexe 11 sur quelques mots pièges qui illustrent l'usage de la langue de bois en physique.

Annexe 1 Les lois de Newton

J'ai constaté que les étudiants éprouvent de grandes difficultés à utiliser les lois élémentaires de la dynamique telles qu'elles sont généralement enseignées. Nous pouvons en comprendre les raisons : leurs formulations reprennent des expressions probablement historiques⁴ sans que leur soient restitués le contexte et la problématique qui les ont générées⁵. Mais ce n'est pas l'essentiel, elles se sont fossilisées dans une forme que l'on n'a jamais songé à rendre efficace, si bien que les étudiants sont mis dans l'impossibilité de résoudre les problèmes que nous posons. C'est pourquoi je crois utile de décrire les difficultés intrinsèques qu'elles génèrent et les conclusions auxquelles je suis parvenue afin de convaincre d'adopter les solutions que je préconise.

³ Voir au Chapitre 5 dans le paragraphe « quelques recherches sur les travaux pratiques » ce que j'ai affirmé de façon qui pouvait paraître abrupte.

⁴ Il serait intéressant de rechercher comment leurs formulations se sont élaborées au cours de l'histoire.

⁵ Remarquons que les physiciens ne sont pas des parangons de l'épistémologie.

Commençons par la loi des actions réciproques dite aussi loi de l'action et de la réaction, dite encore troisième loi de Newton⁶. Nous en aurons besoin pour introduire la loi fondamentale de la dynamique, dite deuxième loi de Newton.

Précisons le champ de validité⁷ des énoncés :

Le domaine de validité des lois de la mécanique classique concerne la description du mouvement des objets généralement macroscopique^{8,9} dont la vitesse est faible par rapport à celle de la lumière. La mécanique classique est dite non relativiste et non quantique.

Énoncé de la loi des actions réciproques ou encore : Principe de l'action et de la réaction

Si un objet A exerce sur un objet B une force $\vec{F}_{A/B}$ ¹⁰, alors B exerce sur A une force $\vec{F}_{B/A}$ telle que : $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$ et ceci même si les objets se déplacent.

L'expression de cette loi montre bien que, lorsqu'on cite une force \vec{F} sans plus de précision, personne ne peut savoir s'il s'agit de $\vec{F}_{A/B}$ ou de $\vec{F}_{B/A}$. C'est pourquoi, quitte à alourdir l'écriture, je porterai toujours en indice le symbole des objets entre lesquels s'exerce la force prise en compte.

Énoncé traditionnel de la loi fondamentale de la dynamique

L'énoncé traditionnel stipule que la somme des forces est égale au produit de « la masse » par « l'accélération ». Soit :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \vec{a}$$

Comme l'indique l'indice de la force, les forces sont souvent qualifiées « d'extérieures », sans que l'on sache à quoi : en effet le choix du système de référence n'est généralement pas explicitement désigné¹¹. Qui plus est, ce ne sont pas les forces, mais les objets qui sont extérieurs au système. **Il n'est donc pas possible d'utiliser rationnellement l'expression de la loi.** De plus les étudiants ne peuvent pas savoir à quel objet se rapporte la masse et l'accélération lorsque les concepts de vitesse et d'accélération sont présentés indépendamment des objets qu'ils caractérisent. L'habitude a été prise de le faire en cinématique ; je suppose par un souci d'abstraction. En conséquence, ne sachant pas celle qu'ils doivent utiliser, les étudiants prennent au hasard : la force $\vec{F}_{A/B}$ ou $\vec{F}_{B/A}$ ou encore la

⁶ Notons que ces dénominations multiples ne sont pas faites pour simplifier l'enseignement. Numéroter les lois de Newton me semble inutile. Gardons la première expression qui est proche du sens de la loi.

⁷ Voir chapitre 1.

⁸ Voir les travaux de Claude Cohen-Tannoudji.

⁹ Ce n'est évidemment pas le cas de l'atome de Bohr !

¹⁰ Qui s'énonce : force de A sur B.

¹¹ Il ne peut pas l'être à cause du phénomène de disparition des objets. Voir chapitre 1.

somme $\vec{F}_{B/A} + \vec{F}_{A/B}$ dans l'application de la loi. Ceci n'aurait aucune raison de se produire s'ils disposaient d'une définition appropriée, utile et claire.

Notons que les énoncés des cours de mécanique de Berkeley¹² et d'Alonso et Finn¹³ à quelques nuances près ne procèdent pas autrement. Est-ce la preuve que ce type d'énoncé traduit bien un phénomène d'enseignement qui n'a peut-être pas de frontière ?

Nouvel énoncé de la loi fondamentale de la dynamique

Dans un repère galiléen \mathcal{R} , la somme des forces que les objets extérieurs à B (objet immuable assimilable à un point) exercent sur B est égale au produit de la masse de B par l'accélération de B.

$$\sum \vec{F}_{O_{ext}/B} = m_B \vec{a}_B$$

En particulier lorsque $\sum \vec{F}_{O_{ext}/B} = 0$, l'objet B est immobile ou bien sa vitesse est constante¹⁴.

Réciproquement : dans un référentiel galiléen \mathcal{R} , lorsque B est immobile ou se déplace avec une vitesse constante, alors les objets qui lui sont extérieurs exercent sur lui une force totale nulle :

$$\sum \vec{F}_{O_{ext}/B} = \vec{0}.$$

Comment reconnaît-on un référentiel galiléen ?

Un référentiel galiléen est, par définition, un référentiel \mathcal{R} dans lequel le principe d'inertie s'applique. C'est-à-dire que :

- **Si on observe qu'un objet a une vitesse constante ou nulle, et si on sait que les objets qui lui sont extérieurs exercent sur lui une force totale nulle,**
- **Alors il se meut dans un référentiel galiléen, c'est-à-dire que son mouvement est rectiligne et sa vitesse constante.**

Procédure d'utilisation de la loi fondamentale de la dynamique :

Comment procéder pour utiliser la loi fondamentale de la dynamique ?

- **Sélectionner par la pensée l'objet B dont on veut connaître le mouvement. B représenté par un point, est caractérisé par une masse m_B et une accélération $\vec{a}_B(t)$ ¹⁵.**

¹² Berkeley Cours de mécanique volume 1. Armand Colon. 1984. p. 55.

¹³ Marcelo Alonso, Edward J. Finn. *Physics*. Addison-Wesley. 1992. p. 109.

¹⁴ On dit généralement en langage stéréotypé « est animé d'un mouvement rectiligne uniforme ». Or « animé » se dit « des personnes et des animaux qui bougent » spécifie le Robert. Concernant des objets inanimés l'expression est donc impropre... malgré la question lamartinienne « objets inanimés avez-vous donc une âme... ? »

¹⁵ L'accélération est éventuellement variable au cours du temps d'où la notation $a(t)$ qui se lit : fonction du temps t .

- **Répertorier tous les objets qui sont à l'extérieur de B et qui exercent une force « notable » sur B. Ils forment le système S'. Il faut donc absolument connaître les ordres de grandeur des différentes interactions¹⁶ pour modéliser la situation et résoudre le problème.**

Le choix des éléments qu'il faut attribuer au système dépend du problème à traiter ; pour une situation donnée il diffère selon qu'il est plus judicieux d'utiliser les lois de Newton ou le principe de la conservation de l'énergie, par exemple.

Ainsi pouvons-nous aussi donner une réponse aux débutants qui se posent souvent des questions métaphysiques du genre : si un livre exerce une force sur une table, alors la table exerce une force sur le sol et le sol sur la Terre, où cela se termine-t-il ? Bien entendu « cela » n'a aucune raison de s'arrêter. Leurs préoccupations sont facilement surmontées lorsque nous leur expliquons comment l'utilisation d'un système de référence leur évite de se perdre dans le choix des objets exerçant les forces à prendre en compte.

Le test du pouce

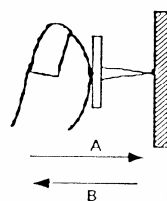
Exprimée sous la forme (1) la loi fondamentale de la dynamique n'est pas utilisable de façon autonome par les étudiants.

$$(1) \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Ils « l'appliquent » disent-ils, utilisant le mot dans son sens véritable, ils la plaquent, ils la placent, ils la posent en essayant d'imiter les solutions trouvées sur des situations analogues. Notons que les professeurs ne peuvent pas enseigner une argumentation à laquelle ils n'ont jamais été initiés, en conséquence chacun ne peut¹⁷ que réciter des solutions apprises par cœur. L'exemple suivant montre qu'il suffit de les questionner sur des situations qui ne sont pas stéréotypées pour s'en convaincre.

Le texte cité faisait partie d'une épreuve¹⁸ censée tester les connaissances des étudiants à l'entrée de l'université. Il illustre particulièrement bien la validité de mes remarques¹⁹.

3) ACTION-REACTION



a) Indiquer si la proposition suivante est vraie ou fausse :

"Lorsqu'on parvient à enfoncer une punaise dans un tableau, c'est que la réaction du tableau ne peut plus équilibrer l'action de la punaise."

VRAIE
 FAUSSE
 Je ne sais pas

Photocopie d'une des questions posées dans le test.

¹⁶ Voir annexe 6 le calcul des ordres de grandeurs.

¹⁷ Je ne parle pas des professeurs réels, mais du concept d'enseignant. Voir chapitre 2.

¹⁸ Proposé en 1993, le test a été élaboré par le Groupe Inter Universitaire de l'Ile de France.

¹⁹ Notons que la situation devient particulièrement inquiétante lorsqu'elle se veut normative.

Notons incidemment que le schéma représentant la situation matérielle n'est pas complet; un pouce ne tient pas seul dans l'espace ! Ce n'est pas sans importance ; pour s'en convaincre, il suffit d'essayer d'enfoncer un clou sur le panneau posé sur un mur en portant des chaussures de cuir glissant parfaitement sur un sol verglacé !

Les réponses au test, notées d'une croix sur les figures, nous avaient été données afin de nous permettre de le corriger très vite sans avoir à perdre du temps à le résoudre par nous-mêmes. Comme je n'ai jamais corrigé aucune épreuve sans me mettre à la place de l'étudiant, je me suis, comme d'habitude, posé une multitude de questions. Finalement je n'étais pas d'accord avec la réponse attendue par les concepteurs du test parce que [la loi des actions réciproques](#) stipule que l'action de la punaise sur le tableau est égale et opposée à l'action du tableau sur la punaise (appelée réaction), elles s'équilibrent donc même lorsque la punaise s'enfonce dans le tableau. Donc la croix doit figurer dans la case « faux ».

Compléments. Remarque liminaire ; quel sens attribuer aux deux flèches **A** et **B** qui figurent sous le dessin ? il n'est pas précisé : la flèche **A** nous indique-t-elle le sens de l'action de la punaise sur le tableau ? **B** celle de la réaction du tableau ?

Le traitement formel qui suit n'ajoute rien à la verbalisation précédente, il s'agit seulement d'approfondir l'analyse de la situation. Désignons les forces en leur assignant les indices indiquant l'objet d'origine et du destinataire, **Pu** pour la punaise, **Po** le pouce et **Ta** le tableau, la loi des actions réciproques pour la punaise et le tableau nous indique que :

$$(1) \vec{F}_{Pu/Ta} = -\vec{F}_{Ta/Pu}$$

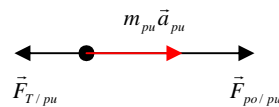
Donc, même au cours du mouvement, « l'action » de la punaise sur le tableau est égale et opposée à la « réaction » du tableau sur la punaise. Autrement dit encore, « la réaction du tableau équilibre l'action de la punaise » au cours du mouvement²⁰. Ceci choque le sens commun et on se demande : alors comment se fait-il que la punaise s'enfonce dans le tableau ? Patience.

Mais, d'abord finissons la critique de la question. La difficulté de la situation présentée provient du fait qu'il y a quatre objets en présence si on compte la Terre. L'action de la punaise peut désigner son action sur le tableau mais [aussi](#) celle qu'elle exerce sur le pouce ! Alors que répondre dans ce cas ? Au lieu de jouer aux devinettes, développons l'argumentation en utilisant l'énoncé des lois afin de donner une solution inattaquable.

Le mouvement de la punaise est décrit par [la loi fondamentale de la dynamique](#) appliquée à la punaise choisie comme système de référence. Les objets extérieurs à la punaise **p_u** sont : la Terre, **T**, le pouce **p_o** et le tableau **T_a**²¹ :

²⁰ Notons la difficulté supplémentaire introduite pas la formulation de la question sous forme négative.

²¹ Voir le paragraphe « calcul des ordres de grandeur » pour comprendre pourquoi les armoires de la pièce n'interviennent pas.



Représentation des vecteurs figurant dans la relation (2)

$$(2) \vec{F}_{T/Pu} + \vec{F}_{Po/Pu} + \vec{F}_{Ta/Pu} = m_{Pu} \cdot \vec{a}_{Pu}^{22}$$

Supposons que le mouvement de la punaise soit horizontal, alors, **d'après la loi fondamentale de la dynamique**, la somme des composantes verticales des forces que les trois objets exercent sur la punaise est nulle (ainsi disparaît le rôle de la Terre), et il ne reste plus qu'à écrire la somme algébrique des composantes horizontales²³. En tenant compte des directions opposées de l'action du tableau et du pouce sur la punaise, nous obtenons la relation :

$$(2)' F_{Po/Pu} - F_{Ta/Pu} = m_{Pu} \cdot a_{Pu}$$

La relation algébrique traduit bien le fait constaté : pour que la punaise s'enfonce dans le tableau, il faut que le pouce appuie suffisamment sur la punaise pour vaincre la résistance que le tableau exerce sur la punaise. Ce qui ne contredit pas **le principe de l'action et de la réaction** qui stipule que la punaise n'appuie pas plus sur le tableau que le tableau n'appuie sur la punaise !

Résumons la réponse au test : Si « l'action de la punaise » indique le module de l'action de la punaise sur le pouce, alors la réponse correcte est : « vraie », si elle désigne l'action de la punaise sur le tableau, la réponse correcte est : « faux ».

Conclusions

L'étudiant ne sachant pas ce que le concepteur a en tête ne peut pas répondre à la question et le correcteur n'ayant aucun moyen de savoir ce que l'étudiant a en tête, ne peut pas corriger la réponse²⁴.

Ce test est un exemple entre mille autres situations de stress dont je souhaite pouvoir réduire le nombre en utilisant des énoncés de lois dépourvus d'ambiguïté.

²²L'indice p_u qui apparaît dans tous les termes peut finir par disparaître, mais pas en période d'apprentissage.

²³ Comme la Terre n'intervient pas dans la solution, dans un premier temps j'avais oublié de l'introduire dans l'argumentation ; la rigueur est un art difficile et chacun de nous peut se faire piéger.

²⁴ Dois-je préciser que je fus la seule à m'insurger ? C'est la preuve les enseignants qui réussissent à répondre à des problèmes mal formulés ont une faculté d'adaptation dont l'ouvrage se fait l'écho au chapitre 3.

Contrairement à une idée admise par la plus part de mes collègues :

La connaissance de l'expression mathématique d'une loi est insuffisante pour que les étudiants sachent comment l'utiliser. Pour les y aider :

- **Il faut choisir des symboles traduisant toutes les caractéristiques des grandeurs physiques ;**
- **Il faut ajouter une description de la façon de l'utiliser.**

J'ai cité l'exemple du pouce parce qu'il illustre de façon particulièrement significative la nature de tous les dysfonctionnements que j'ai analysés au cours de l'ouvrage et nous voyons précisément en quoi la forme habituelle de l'énoncé des lois est trop synthétique pour être utilisable lors des apprentissages au lycée ou au DEUG²⁵.

La pratique de la démarche expérimentale exerce la faculté de corriger ses erreurs. Étant particulièrement distraite, j'en fais moi-même un grand nombre, ce qui explique pourquoi j'attache une telle importance aux moyens de contrôle²⁶.

Posons-le en un principe d'enseignement :

L'important n'est pas d'éviter les erreurs, celles des élèves pas plus que celles des professeurs, mais de se donner les moyens de les corriger.

Annexe 2 Le travail

La fonction du travail :

Par définition : la fonction du travail est de traduire une forme de transfert d'énergie d'un système à un autre.

L'énergie potentielle est un terme particulier de l'énergie totale d'un système comportant au moins deux objets. Certains lecteurs se demanderont peut-être : mais qu'est-ce que l'énergie ? Il n'y a pas de réponse à cette question²⁷. C'est une grandeur physique, c'est-à-dire un outil de la pensée qui est doté de certaines caractéristiques que nous décrirons plus loin. Patience, il en faut beaucoup je sais, mais il nous faut commencer par définir le travail. Comparons là encore la définition traditionnelle et celle que je propose afin de la rendre opératoire.

Définition traditionnelle : travail « d'une force »

Au niveau élémentaire, de nombreux manuels définissent le travail W comme le travail d'une force constante \vec{F} dont le point d'application M effectue un déplacement \vec{l} ²⁸. Il est calculé à partir du produit scalaire suivant :

²⁵ Il n'est pas certain que cette remarque ne concerne que l'enseignement de la physique.

²⁶ Je profite de cette occasion pour demander l'indulgence des lecteurs qui, malgré ma vigilance, trouveraient encore des erreurs et je les prie de bien vouloir me les signaler.

²⁷ Voir le statut des grandeurs physiques : chapitre 1.

²⁸ Appréciez le caractère éthéré de la définition : a-t-on jamais vu un concept « travailler » ? Dans une telle définition, nous voyons la force « exister » par elle-même comme nous l'avons remarqué dans le chapitre 2.

$$W = \vec{F} \cdot \vec{l} = Fl \cos \alpha$$

α étant l'angle compris entre les vecteurs représentant respectivement \vec{F} et \vec{l} . Si α est aigu, W est positif, le travail est dit moteur, s'il est obtus, W est négatif et il est dit résistant.

Lorsque la force \vec{F} varie au cours du déplacement, il devient impossible de faire l'opération algébrique précédente. Cependant la définition reste la même pour un déplacement élémentaire représenté par le vecteur $d\vec{M}$ ²⁹ dont il suffit de choisir la norme suffisamment petite pour que la force ne varie pas sensiblement au cours du déplacement. Il est alors possible de définir un travail élémentaire δW par l'expression similaire :

$$\delta W = \vec{F}(M) \cdot d\vec{M}$$

Et le travail total s'exprime par :

$$W = \int_{M_1}^{M_2} \vec{F}(M) \cdot d\vec{M}$$

Où l'intégrale est calculée le long d'un chemin décrit par le point matériel M de sa position initiale M_1 à sa position finale M_2 .

Critique de la définition traditionnelle

Répetons-le : dans ces « formules³⁰ » la force \vec{F} est définie sans être reliée à un système matériel, ainsi est-il impossible de savoir d'où elle provient. Il devient alors tout aussi impossible de connaître le sens physique de l'opération mathématique.

Avantage : il faut bien que cette « définition » en ait pour qu'elle ait perduré. Cette façon de procéder permet d'atteindre un haut niveau d'abstraction et de traiter toutes les forces à la fois indépendamment de la nature des objets qui interagissent. Certains pensent faire ainsi de grandes économies de pensée³¹.

Inconvénient : Un tel niveau d'abstraction est un leurre, au moins pour les débutants, parce que cette façon de procéder, d'une part ne tient pas compte des difficultés liées au choix de la force à prendre en compte, et, d'autre part, passe sous silence des propriétés essentielles du travail, qu'il est pourtant important de connaître pour résoudre les problèmes. En effet :

La définition formelle ne permet pas d'attribuer au travail les propriétés suivantes :

- **La grandeur physique « travail » décrit le transfert d'énergie d'un système S' à un autre système S .**
- **Les états d'énergie de chacun des systèmes qui échangent du travail varient.**

²⁹ Mon logiciel ne me permet pas de faire porter la flèche sur l'ensemble dM .

³⁰ C'est-à-dire des relations mathématiques dont l'élève ignore le statut.

³¹ On peut comprendre que seule une certaine « élite » parvienne à faire croire qu'elle utilise facilement un tel formalisme ! Mais quelle élite et à quel prix ? Celui de se passer de la réalité ? Nous voyons malheureusement trop souvent les dégâts que cela entraîne.

- Pour une transformation donnée, le travail transféré d'un système à un autre, dépend de la façon dont s'effectue la transformation³².

Nouvelle définition du travail élémentaire

Par définition : le travail qu'un système extérieur S' fournit algébriquement à un système S pour déplacer un de ses éléments B, qui se situe au point M, se calcule à l'aide de la relation :

$$(1) \quad \delta W = \vec{F}_{S'/B}(M) d\vec{M}$$

Où $\vec{F}_{S'/B}(M)$ désigne la force que le système S', exerce sur l'élément B appartenant à S pendant qu'il effectue un petit déplacement représenté par le vecteur $d\vec{M}$.

Il en découle les propriétés suivantes :

- δW est une grandeur algébrique (signe du produit scalaire). La notation δ associée à la grandeur travail signifie que l'on considère une petite quantité de travail échangé. J'insiste : le travail W n'est pas une grandeur associée à l'état d'un système mais à des échanges d'énergie entre des systèmes, il ne peut donc pas être rendu infinitésimal.
- Le travail traduit une forme particulière de transfert d'énergie, qui correspond à un transfert ordonné d'énergie. Il est égal à l'énergie « fournie algébriquement », par le système extérieur S' au système S considéré. Si $\delta W > 0$ le système S reçoit du travail et son énergie augmente d'autant, dans le cas contraire il fournit le travail et son énergie diminue d'autant.
- Ces précisions rendent **inutiles les notions de travail moteur et de travail résistant** qui sont ambiguës lorsque la force qui intervient dans le calcul n'est pas spécifiée ; en effet ce peut être aussi bien celle que S' exerce sur B que l'opposée, ce qui change la valeur algébrique du travail calculé et ne permet pas de conclure sur le gain ou la perte d'énergie du système de référence.

Les notions de travail moteur et de travail résistant sont ambiguës donc inutilles.

Ces notions sont inutilles au même titre que les notions d'action et de réaction dont elles découlent.

Une conséquence mathématique de la définition proposée est que le travail ne peut pas être représenté par une fonction d'état, c'est-à-dire une fonction qui varie continûment avec une ou plusieurs grandeurs qui caractérisent l'état du système.

Notations : Étant donné que le travail n'est pas assimilable à la variation d'une fonction d'état d'un système, et qu'une petite quantité de travail ne peut être traitée comme une différentielle d , un δ grec est utilisé pour désigner un petit travail élémentaire δW . Ceci entraîne en particulier qu'il n'existe pas de « variation » de W . W peut être échangé en plus ou

moins grande quantité mais forcément finie. En conséquence toute notation du type « ΔW », que l'on rencontre parfois dans certains manuels non recommandables, est dépourvue de sens.

Pour aider mes étudiants à comprendre la différence entre une quantité échangée et une variation de fonction d'état, je me servais d'une analogie avec l'utilisation de l'argent. Les gains ou les dépenses sont des échanges qui peuvent être grands ou petits ; ils sont représentés par W ou δW , selon que l'on touche un salaire ou bien que l'on achète une baguette de pain. En revanche, ces grandeurs interviennent pour décrire la fonction d'état du compte en banque qui peut être figuré par une courbe retraçant l'évolution de son montant³³.

Annexe 3 Principe de la conservation de l'énergie

Énoncé traditionnel :

L'énergie se conserve.

Toute seule ? Une telle formulation est inutilisable. Notons que cette façon de s'exprimer résulte du phénomène de disparition des objets³⁴.

Nouvel énoncé du principe de conservation de l'énergie

Pour appliquer le principe de façon efficace il vaut mieux dire :

L'énergie totale d'un système isolé est constante.

Procédure d'utilisation :

Pour pouvoir utiliser le principe de conservation de l'énergie il est impératif ;

- **De construire le système isolé S pris en compte. Il faut donc répertorier les objets qui en font partie. Pour y parvenir il faut connaître les ordres de grandeur des différentes interactions en présence ;**
- **De préciser l'état initial du système. C'est celui qui correspond au moment où la contrainte extérieure qui le maintenait en équilibre est relâchée ;**
- **De préciser les conditions de l'évolution du système ;**
- **De préciser certaines caractéristiques de l'état final du système afin de pouvoir le caractériser.**

Pour qu'un étudiant puisse utiliser le principe de conservation de l'énergie, il doit disposer des informations qui lui permettent d'effectuer les opérations décrites ci-dessus. Cette remarque serait d'une banalité à pleurer si les auteurs n'omettaient pas de les indiquer dans de nombreux textes d'exercices. C'est le cas lorsqu'ils décrivent les situations en termes de grandeurs physiques : des charges se déplacent dans des champs magnétiques ! Comment constituer des systèmes isolés dans des conditions où interviennent forcément toutes les

³³ Comme toute analogie celle-ci a ses limites : la fonction d'état d'un compte en banque n'est pas une fonction dont les variations sont continues.

³⁴ Voir chapitre 2.

sources d'énergie permettant d'assurer les propriétés désirées du « champ magnétique » dont on a besoin³⁵ ?

Dans le cas particulier où le système S ne comporte que deux objets A et B, l'énergie totale de S comporte l'énergie potentielle du système A-B et l'énergie cinétique de chacun des constituants. Pour décrire l'évolution de systèmes complexes, il faut tenir compte de toutes les formes d'énergie qui interviennent dans la situation. Les anglo-saxons dont l'enseignement est infiniment plus pragmatique que le nôtre ne sont généralement pas plus clairs que nous. Alonso et Finn parlent de la conservation de l'énergie totale d'une particule en lui attribuant une énergie potentielle³⁶.

Il n'existe qu'une énergie potentielle, mais elle peut prendre plusieurs formes mathématiques selon que les objets ont chacun une très grande masse, ou qu'ils sont chargés électriquement ou qu'ils sont complexes, l'énergie potentielle est alors qualifiée de : gravitationnelle, électrique, élastique, etc. Par ailleurs il existe encore un grand nombre d'autres sortes d'énergie qui sont examinées dans les cours au fur et à mesure des besoins. Pour en savoir plus au sujet de l'énergie je vous conseille vivement de lire ce qu'en écrit Feynman dans son cours de mécanique³⁷.

C'est un fait, ou si vous voulez une loi, qui gouverne³⁸ tous les phénomènes naturels connus à ce jour. Il n'y a pas d'exception connue à cette loi - elle est exacte pour autant que nous sachions -. La loi est appelée conservation de l'énergie³⁹. Elle affirme qu'il y a une certaine quantité que nous appelons énergie, qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature. C'est une idée très abstraite, car c'est un principe mathématique; ce principe dit qu'il existe une quantité numérique, qui ne change pas, lorsque quelque chose se passe. Ce n'est pas la description d'un mécanisme, ou de quoi que ce soit de concret; c'est simplement ce fait étrange que nous puissions calculer un certain nombre et que, lorsque nous avons terminé d'observer l'évolution de la nature et que nous recalculons ce nombre, il soit le même...

Puisque c'est une idée abstraite, nous illustrerons sa signification par une analogie.

³⁵ Des collègues m'ont signalé que même des chercheurs faisaient parfois des erreurs ayant pour origine cette méconnaissance !

³⁶ Marcelo Alonso, Edward J. Finn. *Physics*. Addison-Wesley. 1992. p. 174.

³⁷ R. Feynman, *Le cours de physique, Mécanique 1*. InterEdition. 1986. Chapitre 4, p. 42.

³⁸ Le mot « gouverne », de caractère anthropomorphique, est-il celui que Feynman utilise ou un effet de la traduction ?

³⁹ Même Feynman ne mentionne pas dans ce paragraphe que la conservation de l'énergie ne concerne que des systèmes isolés !

Quant aux échanges d'énergie entre les systèmes, ils sont de deux sortes seulement ; soit ils sont ordonnés et appelés travail (électrique ou mécanique) ou bien ils sont désordonnés et appelés chaleur. Il y a aussi des échanges par rayonnement mais qui peuvent être classés dans la deuxième catégorie.

L'énergie cinétique

Par définition, l'énergie cinétique de translation⁴⁰ d'un objet A, de masse m_A et de vitesse v_A se calcule de la façon suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} m_A v_A^2$$

Elle fait partie des caractéristiques de A.

Ici encore nous précisons en indice l'objet dont nous considérons la masse et la vitesse, alors qu'elles sont souvent citées comme si elles existaient indépendamment de l'objet qu'elles caractérisent.

Nouvelle définition de l'énergie potentielle

Nous qualifierons⁴¹ de *potentielle* toute variation d'énergie $\Delta E = \Delta E_p$ associée à un pur changement de *position* ou de *configuration* des objets M_i constituant le système S. Dans une transformation où il n'y a de changement ni de vitesse, ni de structure interne, la variation d'énergie du système se confond avec sa variation d'énergie potentielle qui se calcule de la façon suivante :

La variation d'énergie potentielle ΔE_p du système S, entre son état initial 1 et son état final 2, est égale au travail « *quasistatique* » qu'un système extérieur S' doit lui fournir pour le faire passer d'un état à l'autre en agissant par exemple sur un des éléments B appartenant à S. Donc :

$$\Delta E_p = E_p(2) - E_p(1) = W = \int_1^2 \vec{F}_{S'/B}(M) d\vec{M}$$

Cette définition implique la nécessité de connaître les états du système, c'est-à-dire la position des objets matériels avant et après le déplacement, pour calculer des **différences d'énergie potentielle qui seules ont un sens**. En conséquence l'énergie potentielle n'est calculable que pour des systèmes comportant nécessairement au moins deux objets ; en effet l'opérateur ne dépense aucune énergie pour déplacer le premier objet dans un espace supposé encore vide ; il s'agit, là encore, d'une opération par la pensée.

Par définition : Lorsqu'un opérateur ou un système S' fournit un travail *quasistatique*, il déplace les objets sans leur communiquer de vitesse.

⁴⁰ C'est-à-dire qui se déplace sans tourner.

⁴¹ Cette façon de procéder est largement inspirée d'Yvan Simon : *Énergie et entropie*. Armand Colin.

Il fait passer le système de l'état 1 à l'état 2 par une succession d'états d'équilibre. C'est, bien évidemment, une nouvelle opération irréalisable sauf par la pensée. Son objectif est de ne pas avoir à tenir compte des énergies cinétiques des objets dans les bilans d'énergie, mais cela ne peut se faire qu'au prix d'un effort intellectuel peu banal⁴², celui d'imaginer parvenir à déplacer des objets sans leur communiquer de vitesse.

L'énergie totale d'un système

$$E_T = E_C + E_p + E_{int}$$

L'énergie totale E_T d'un système comporte l'énergie potentielle E_p et l'énergie cinétique E_C totale des composantes du système et aussi éventuellement leur énergie interne E_{int} lorsqu'elle varie⁴³. Dans les exercices de mécanique où les objets sont immuables cette dernière énergie n'intervient pas. En effet seules les variations d'énergies potentielles interviennent dans les bilans, ce qui se voit en écrivant, par exemple que l'énergie totale d'un système isolé est la même à l'état initial du système et à l'état final :

$$E_{T_i} = E_{C_i} + E_{p_i} = E_{T_f} = E_{C_f} + E_{p_f}$$

Remarque : l'énergie interne comporte elle aussi la somme des énergies cinétiques et potentielles des constituants mais à une échelle microscopique.

Annexe 4 Comment rédiger et résoudre un problème

Yvan Simon s'inspire toujours de problèmes théoriques ou expérimentaux que pose la compréhension de la physique pour concevoir ses énoncés. La clé de leur intérêt est qu'ils n'ont jamais pour objectif de « faire calculer » les étudiants⁴⁴ mais de compléter leur compréhension. Il m'a autorisé à publier les textes suivants⁴⁵.

Exercice 1 ; Travail fourni au cours d'une compression

Un récipient cylindrique fermé par un piston mobile (et sans frottements) contient de l'air. L'air initialement enfermé dans le cylindre occupe un volume $V_1 = 5$ litres, et sa pression P_1 est égale à la pression atmosphérique extérieure $P_o = 1$ bar. Le piston soumis de part et d'autre à des pressions égales est immobile.

⁴² À mon avis, c'est là que réside le véritable effort d'abstraction.

⁴³ Cela se produit par exemple lorsqu'un objet se casse en atteignant le sol, ou bien lorsque le mouvement de l'objet se produit en frottant un autre objet. Comme seules les variations d'énergies interviennent dans les bilans, on évite de mentionner celles qui restent constantes.

⁴⁴ Pour le physicien le calcul n'est qu'un outil.

⁴⁵ Je serais favorable à ce que les textes de problèmes et d'exercices créés, tout comme les problèmes donnés aux concours soient signés par leurs auteurs, cela les responsabiliserait et permettrait, entre autres, d'avoir le droit d'exercer un contrôle sur les solutions parfois fausses vendues dans les livres d'exercices corrigés.

Agissant sur le piston, un opérateur comprime très lentement le gaz jusqu'à un volume $V_2 = 1$ litre. En supposant que, dans ces conditions, le produit PV du gaz reste constant au cours de la compression (loi de Mariotte), calculez le travail W fourni *par l'opérateur*.

À la fin de cette opération, l'opérateur exerce une force φ_2 sur le piston. Quel aurait été le travail W si l'opérateur avait appliqué brusquement une force φ_2 ?

Caractéristiques du texte :

- Le texte fait référence à des objets ; le récipient cylindrique, l'air, l'opérateur ;
- La situation est modélisée : le piston est « sans frottement »
- Les objets participent à des événements : le piston se déplace ;
- Le mouvement du piston et la nature de la transformation de la situation sont bien spécifiés ;
- Les caractéristiques de l'état initial et de l'état final du système matériel (gaz et piston) sont précisément indiquées ;
- L'exercice présente un enjeu : comparer l'énergie fournie au système lorsque, à partir du même état initial, l'opérateur procède de deux façons différentes : lentement c'est-à-dire de façon quasistatique, ou brusquement.

Comment procéder pour résoudre un problème ?

Quelques conseils aux étudiants :

Lire attentivement le texte, cela va sans dire, mais comment ? Agir est le meilleur moyen d'entrer dans le processus de résolution. Alors que faire ?

- **Regrouper les informations concernant le système matériel étudié en repérant, par exemple, ses caractéristiques et ses différents états, les symétries ;**
- **Se représenter la situation, au besoin en faisant un ou plusieurs schémas ;**
- **Traduire les unités dans le système MKSA, lorsque cela s'avère nécessaire.**

Ensuite, et ensuite seulement, essayer de répondre aux questions.

Résolution d'exercice : exemple d'argumentation

Dans les conditions décrites ci-dessus il devient possible d'argumenter la solution.

Analysons la situation : Il s'agit de se représenter la situation de la façon la plus précise qui soit.

a) L'opérateur comprime « lentement » le gaz signifie que ce dernier subit une transformation *quasistatique*. Pour y parvenir l'opérateur doit exercer une force variable $\varphi(x)$ sur le piston, ajustée afin que le piston passe de l'état initial à l'état final par une succession d'équilibre.

b) **Par hypothèse**, au cours de la transformation le produit $PV = cst$ est constant. [Lorsque le piston et les parois du cylindre conduisent parfaitement la chaleur, ce qui est une modélisation, les expérimentateurs ont constaté que (loi de Mariotte), la transformation du gaz est isotherme, c'est-à-dire que la température du gaz est constante et égale à celle du milieu ambiant⁴⁶.]

Le produit de P par V étant constant il a, en particulier, la valeur qu'il avait à l'état initial. **D'après les caractéristiques de l'état initial** :

$$PV = cst = P_1V_1$$

c) Pour conceptualiser la situation lorsque le cylindre est vertical, il vaut mieux représenter l'action de l'air sur le piston comme celui d'un objet **A** de masse **M** situé dans le vide et qui reposerait sur le piston supposé sans masse dont la fonction serait seulement de tenir le gaz enfermé dans le cylindre.

Pour traiter la première question, les deux transformations ont même état initial et même état final, l'énergie potentielle du système (A+piston+Terre) reste constante.

Momentanément il est plus simple d'imaginer que le piston est horizontal, ce qui élimine les questions sur la variation d'énergie potentielle du système (A+piston+Terre) puisque A et le piston restent toujours au même niveau au cours de la transformation.

Conventions :

Choisissons de le poser horizontalement. Choix des axes et des repères : Voir figure 1.

Caractéristiques de la situation :

Le choix des notations est conventionnel. Il est toujours délicat et demande réflexion ; ou bien les notations sont imposées par le texte ou bien l'étudiant doit les déterminer et les définir et j'ai constaté que c'était toujours une opération difficile.

Notations : φ est le symbole réservé pour désigner la force qu'exerce l'opérateur : ici de l'opérateur sur le piston⁴⁷.

F_0 désigne la force constante que l'atmosphère exerce sur le piston. S étant la surface du piston, **la définition de la pression** permet d'écrire la relation : $F_0 = P_0S$, où P_0 désigne la pression atmosphérique constante.

- **À l'état initial** : Le texte indique les caractéristiques de la situation. Lorsque le volume du gaz vaut $V_1 = 5 \text{ litres} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, le piston est situé en x_1 . L'opérateur exerce une force $\varphi = \varphi_1 = 0$. Seule l'atmosphère exerce une pression P_0 sur le piston à l'extérieur. $P_1 = P_0 = 10^5$ Pascals, désigne la pression initiale du gaz à l'intérieur du piston.

⁴⁶ Cette information n'est pas utile pour résoudre algébriquement le problème.

⁴⁷ Ceux qui cherchent l'efficacité conservent les mêmes notations ; ainsi Yvan Simon réserve la notation φ pour l'action de l'opérateur dans tous les exercices ; ceci permet une grande économie de temps de réflexion

- À l'état final : Le texte indique la valeur du volume du gaz : $V_2 = \frac{V_1}{5}$, le piston est situé en x_2 , l'opérateur exerce une force φ_2 . Par définition de la pression, la pression finale du gaz vaut $P_2 = \frac{F_0 + \varphi_2}{S}$
- Par hypothèse, dans un état intermédiaire la pression du gaz vaut : $P = \frac{F_0 + \varphi}{S}$ et

$$PV = P_1V_1$$

Où P est une fonction du volume V , notée $P(V)$ et où la force exercée par l'opérateur $\varphi(x)$ dépend de la position x du piston, sachant que par définition le volume s'exprime par :

$$V = S \cdot x.$$

Cas de la transformation quasistatique.

L'état d'un gaz est défini par trois grandeurs, sa pression P , son volume V et sa température T .

Par définition le travail s'écrit :

$$(1) \quad \delta W = \vec{F}_{S'/B}(M) d\vec{M}$$

Pour calculer le travail que l'opérateur fournit au gaz, choisissons le piston comme système de référence B. Désignons par φ la force que l'opérateur exerce sur le piston.

Quels sont « les objets » qui agissent sur le piston ? L'opérateur, l'atmosphère et le gaz. D'après la loi fondamentale de la mécanique, le piston passant par une succession d'états d'équilibre, la somme de leurs forces est nulle :

$$(2) \quad \vec{\varphi} + \vec{F}_0 + \vec{F}_{\text{gaz/piston}} = 0$$

Nous pouvons exprimer⁴⁸ la force que le gaz exerce sur le piston $\vec{F}_{\text{gaz/piston}}$ en fonction de V et P . Par définition la pression que le gaz exerce sur le piston s'exprime par :

$$P = \frac{F_{\text{gaz/piston}}}{S_{\text{piston}}} = \frac{F}{S}$$

reportés dans l'équation (2) nous obtenons que :

$$\varphi = -P \cdot S$$

Lors d'un déplacement $d\vec{M}$ du piston, le volume $V = S \cdot x$ du gaz varie de : $dV = S \cdot d\vec{M}$, si bien que le travail δW qu'il faut fournir au gaz pendant cette transformation élémentaire s'exprime par définition par la relation :

$$(3) \quad \delta W = -P \cdot dV$$

Cette relation, valable dans tous les cas de figure, exprime que lorsque le volume du gaz diminue, l'opérateur fournit positivement de l'énergie au gaz. L'expression (3) devient une définition secondaire⁴⁹ qui pourra par la suite être utilisée directement.

⁴⁸ Cela ne s'invente pas, c'est l'expérience acquise en faisant des exercices qui permet de le savoir.

⁴⁹ J'entends par là qu'elle découle des définitions fondamentales et n'apporte rien de nouveau, mais elle est utile à connaître pour simplifier le travail d'argumentation.

Cette expression qui comporte à la fois P et V masque le fait que, pour une transformation donnée, la pression P et le volume V du gaz ne sont pas des grandeurs indépendantes. Pour calculer la somme des travaux élémentaires fournis au gaz pendant toute la transformation, il faut exprimer l'intégrale d'une fonction qui ne dépend que d'une seule grandeur physique. Comme nous connaissons la valeur du volume au début et à la fin de la compression, stratégiquement le plus simple est d'exprimer P en fonction de V . Ainsi l'équation peut être écrite : $\delta W = -P(V) \cdot dV$ qui ne dépend que d'une seule grandeur indépendante et peut donc être intégrable.

Utilisons la traduction mathématique de l'**hypothèse de travail** exprimée dans le texte : le produit PV reste constant. Il est donc aussi égal à la valeur qu'il avait lorsque le système était à son état initial.

$$PV = P_1V_1 \Leftrightarrow P(V) = \frac{P_1V_1}{V}$$

Dire que le gaz subit **une transformation quasistatique** revient à dire que **ses états d'équilibres sont représentés par la courbe** d'équation : $P(V) = \frac{P_1V_1}{V} = \frac{C}{V}$ voir figure.

C'est le système gaz qui sert de référence ; cela signifie que si la valeur de W est positive, le gaz reçoit effectivement du travail, sinon c'est le gaz qui en fournit, le piston qui ne stocke pas d'énergie sert seulement d'intermédiaire.

Le travail fourni par le système extérieur S' (opérateur+atmosphère) au système gaz pendant la compression de V_1 à V_2 dépend de la façon dont la pression P_i du gaz varie en fonction de V et qui ici s'exprime à l'aide de la relation 1) :

$$W = \sum_i -P_i dV = \int_{V_1}^{V_2} -P dV = -P_1V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = P_1V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} = 800 \text{ Joules}$$

Par définition, le travail total fourni au gaz est représenté par l'aire sous la courbe $P(V) = \frac{P_1V_1}{V}$.

Le calcul précédent comporte le travail fourni au système gaz par l'opérateur et par l'atmosphère. L'atmosphère exerçant une pression constante de valeur P_0 sur le piston, le travail qu'elle fournit au gaz se calcule simplement par ;

$$W_0 = -P_0(V_2 - V_1) = 400 \text{ Joules}$$

L'opérateur ne fournit donc que $800 - 400 = 400$ joules. Figure 1.

D'une façon générale, **par convention**, le système considéré sert de référence. Si le travail est positif, il est effectivement fourni au système ; s'il est négatif, c'est le système qui fournit effectivement du travail à l'extérieur.

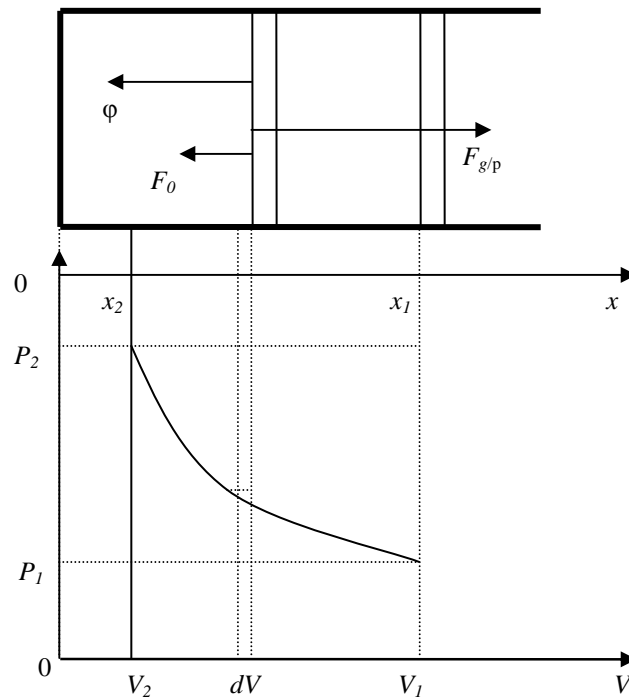


Figure 1. En haut la figure représente le cylindre et le piston mobile entre les positions extrêmes x_1 et x_2 .

N.B. Lorsque le système gaz est comprimé, le travail qu'il reçoit est forcément positif. Si le calcul ne donne pas ce résultat, c'est que nous nous sommes trompés !

N.B. Pourquoi avons-nous présenté cet exercice comme étant de principe ? Il comporte une modélisation forcément réductrice de la représentation d'une situation matérielle réelle. Par exemple nous supposons implicitement que le piston glisse sans frottement dans le cylindre. Ce qui revient à négliger les échanges d'énergie sous forme de chaleur entre le piston et le cylindre. Que se passe-t-il dans le cas contraire ? Patience, il n'est pas possible de traiter toutes les situations à la fois⁵⁰.

Cas de l'opération brusque.

Comment réaliser pratiquement une opération brusque ?

Le calcul précédent est encore valable si le cylindre est placé verticalement. L'opérateur n'intervient plus. Il lui suffit de poser un objet de masse M sur le piston **bloqué** par un clapet. **À l'état initial le piston est situé à la cote z_1** et le clapet débloque le piston instantanément.

Calculons la masse M qu'il faut poser sur le piston pour que la pression finale du gaz soit égale à : $P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$. La pression totale initiale sur le piston est due à l'atmosphère et à la pression que l'objet de masse M exerce sur le piston : **Par définition** elle est donc donnée par la relation :

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = P_0 + \frac{Mg}{S}$$

⁵⁰ Le charme de la physique est que l'histoire ne se termine jamais !

Dès que le clapet fixant le piston est débloqué, la Terre agit sur l'objet de masse M qui agit sur le piston, la force appliquée au piston correspond à la pression P_2 atteinte par le gaz à la fin de la transformation lorsqu'elle était *quasistatique*, le travail total fourni au gaz par le nouveau système extérieur S_1' (Terre+objet de masse M +atmosphère) vaut :

$$W_i = -P_2(V_2 - V_1) = P_2(V_1 - V_2) = -\frac{P_0 V_1}{V_2}(V_2 - V_1) = 5 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 2000 \text{ Joules}$$

qui est représenté par l'aire du grand rectangle.

Commentaire.

Le système extérieur S_1' fournit une énergie beaucoup plus grande au gaz quand l'opération est brusque que dans le cas où l'opération se fait de façon *quasistatique*, alors que les deux opérations conduisent le gaz du même état initial au même état final. Que se passe-t-il ?

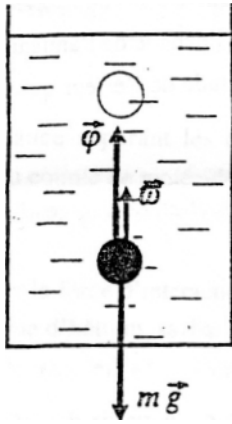
Notons que rien ne permet de dire au bout de quel délai l'état d'équilibre sera atteint, le piston peut osciller avant d'atteindre l'état final. La répartition du supplément d'énergie fourni dans la deuxième façon de procéder dépend des conditions expérimentales et il faut utiliser les principes de la conservation de l'énergie des systèmes isolés et ceux de la thermodynamique pour les traiter⁵¹.

Exercice 2 : Poussée d'Archimède

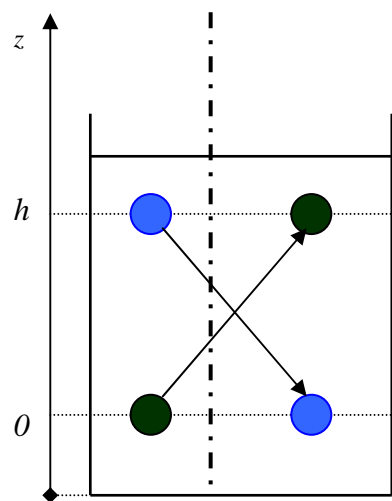
L'exercice de principe suivant est théorique, mais cela n'empêche pas de se référer à une situation matérielle !

On sait que, grâce à la poussée d'Archimède ω , la force $\varphi = -(mg + \omega)$ nécessaire pour manipuler (de façon *quasistatique*) un corps immergé dans l'eau, est plus faible, et donc que le travail W nécessaire pour soulever le corps d'une hauteur h est plus petit que mgh . Si l'énergie potentielle de gravitation du système [corps+Terre] est bien mgz , n'est-on pas devant une contradiction ? Cette contradiction n'est qu'apparente, car en fournissant le travail W de P , on ne manipule pas que le corps, ni même le système [corps+Terre], mais le système [corps+Terre+ eau]. C'est là un exemple de l'erreur classique, qui consiste à mal définir le système dont on parle. En analysant le changement de configuration du système [corps+Terre+ eau] (Fig. 1), faire le bilan correct de la variation d'énergie potentielle quand le corps immergé est levé de h , et en déduire que, selon l'expression consacrée, ω est une poussée dirigée vers le haut et de valeur égale au poids de l'eau déplacée.

⁵¹ Dans de nombreuses circonstances pour résoudre des problèmes il est impossible de séparer la mécanique de la thermodynamique. Voir Y. Simon, *Mécanique et thermodynamique, Tomes 1 et 2*. Vuibert. À paraître.



Solution



La figure 2 représente, à gauche du trait vertical, l'état initial du système avec la bille au niveau $z = 0$ en bas et la goutte d'eau en bleu, de même volume, en haut à la cote $z = h$.

À droite, l'état final du système avec la bille en haut qui remplace le même volume d'eau qui est en bas.

Supposons que le corps immergé soit constitué par une bille de masse m_1 , de volume V_0 et de masse volumique ρ_1 située initialement à un niveau $z=0$ à l'intérieur d'un bac contenant de l'eau.

Il faut se représenter l'évolution de la situation ; lorsqu'un opérateur soulève la bille, au fur et à mesure qu'il la monte, le volume qu'elle occupait l'instant précédent est remplacé par de l'eau. Il ne fait donc pas que modifier la position de la bille par rapport à la Terre, mais il fait aussi, simultanément et involontairement, descendre le même volume d'eau. Si bien qu'à la fin de l'opération, la bille étant passée du niveau 0 jusqu'au niveau h , tout se passe comme si une sphère d'eau de même volume V_0 et de masse volumique ρ_0 était passée du niveau $z=h$ au niveau $z=0$.

Par définition la densité volumique d'un objet homogène de masse m et de volume V s'exprime par :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Appliquée à la bille et à l'eau :

$$m_0 = \rho_0 V_0 \text{ et } m_1 = \rho_1 V_0.$$

Calculons l'énergie potentielle du système S (bille+sphère d'eau+Terre) au début et à la fin de la transformation en prenant comme origine des énergies potentielles la cote $z=0$, donc $E_p(0)=0$. L'énergie potentielle au voisinage de la Terre est de la forme approchée $E_p = mgz$.

Voir fig.

- **À l'état initial** : Le centre de la bille de volume V_0 est au niveau $z=0$ et le centre de la sphère virtuelle d'eau de volume V_0 au niveau $z=h$. L'énergie potentielle initiale E_{pi} totale du système S (bille+eau+Terre) ne comporte que l'énergie potentielle du système (bille+Terre) qui est nulle lorsque $z=0$ et l'énergie potentielle du système (sphère d'eau+Terre) :

$$E_{pi} = 0 + \rho_0 V_0 g h$$

- **À l'état final**, le centre de la bille est au niveau h , le centre de la sphère d'eau au niveau 0 . L'énergie potentielle totale finale E_{pf} se réduit à la seule énergie potentielle du système (bille+Terre). Elle se calcule comme précédemment :

$$E_{pf} = \rho_1 V_0 g h + 0$$

Analyse de la situation.

Au cours de la transformation l'énergie fournie par le manipulateur au système S sert à augmenter l'énergie potentielle de S, mais elle sert aussi inmanquablement à augmenter la vitesse de la bille et des molécules d'eau qui se déplacent. Elle fournit donc aussi de l'énergie cinétique au système S. Si nous pouvons admettre que la vitesse de la bille est nulle à la fin de la transformation, nous ne pouvons rien affirmer au sujet de la vitesse des molécules de l'eau que nous ne pouvons pas contrôler. Cependant comme la manipulation est *quasistatique*, l'énergie cinétique transmise à l'eau au cours de la transformation peut être admise comme négligeable devant la variation d'énergie potentielle de S mais de plus elle peut être rendue aussi petite que l'on veut en ralentissant suffisamment le mouvement. Dans ces conditions la variation d'énergie potentielle du système vaut :

$$\Delta E_p = \rho_1 V_0 g h - \rho_0 V_0 g h = (m_1 g - m_0 g) h$$

Et elle peut être identifiée au travail⁵² que l'opérateur extérieur lui a fourni en exerçant sur la bille une force constante verticale ascendante d'intensité φ . D'après [la loi fondamentale de la dynamique](#) le système étant pratiquement à l'équilibre, la somme des forces que la Terre et le manipulateur exercent sur la bille est nulle :

$$\vec{\varphi} + m_1 \vec{g} = 0$$

$$\Delta E_p = (m_1 g - m_0 g) h = W = \varphi h$$

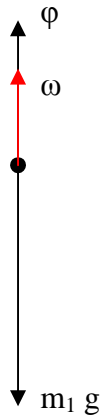
par conséquent :

$$\varphi = m_1 g - m_0 g > 0$$

⁵² Voir les paragraphes précédents.

$-m_1 \cdot g$ représente la force que la Terre exerce sur la bille. Et $m_0 \cdot g$ est égale en module au « poids du volume d'eau déplacé » comme on dit habituellement en omettant de préciser d'où à où. La poussée d'Archimède a donc pour expression :

$$\vec{\omega} = m_0 g$$



La figure 2 représente les forces agissant sur la bille : ϕ la force de l'opérateur, $m_1 g$ la force de la Terre et ω la force de l'eau.

Le manipulateur qui monte la bille dans l'eau a l'impression qu'elle est moins lourde que dans l'air à cause de la poussée d'Archimède. Voir fig. 2.

Notons qu'en toute rigueur, il existe aussi une poussée d'Archimède dans l'air dont on ne parle pratiquement jamais parce que la masse volumique de l'air est environ 800 fois plus petite que celle de l'eau, son effet n'est pas sensible et il est généralement négligé sans même qu'on l'évoque.

Plus fondamentalement, cet exercice montre que la poussée d'Archimède n'est pas un concept indépendant nouveau. Son expression découle des lois fondamentales de la mécanique.

Comment argumenter la solution d'un problème ?

Quelles règles pouvons-nous déduire des solutions précédentes ? Après avoir mis au point la stratégie de résolution, il faut assortir la solution de justifications en :

- **Énonçant le statut des relations mathématiques tirées de la théorie : principes, lois, définitions etc.**
- **Rappelant les propriétés et les caractéristiques de la situation utilisées ;**
- **Énonçant les hypothèses de travail ;**
- **Résolvant les équations algébriques ;**
- **Répondant à la question posée et en commentant si besoin les difficultés rencontrées.**

Annexe 5 Table des constantes

Pour éviter que les étudiants adoptent une stratégie de résolution des exercices en devinant les relations à utiliser par la reconnaissance des grandeurs qui interviennent, j'avais préconisé de leur fournir le tableau des valeurs des grandeurs universelles. De plus cela évite de gâcher du papier à les reproduire inutilement. Voici le tableau que nous distribuons aux étudiants.

Valeurs des constantes utiles à la résolution des problèmes

Les valeurs des constantes universelles ont été évaluées soit théoriquement soit par des mesures avec parfois des précisions extrêmement grandes allant jusqu'à 10 ou 11 chiffres, mais cela coûte très cher, soit par des caractéristiques matérielles dont les valeurs sont établies par des mesures faites par des laboratoires spécialisés. Elles sont regroupées dans le *Handbook of Physics*, sorte de bible du physicien.

Nous avons réunies ici celles qui sont nécessaires à la résolution des exercices de DEUG. Je ne les préciserai pas de nouveau dans les textes suivants.

Accélération de la pesanteur à la surface de la Terre:	$g_0 = 9,8 \text{ m s}^{-2}$.
Charge de l'électron:	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$
Constante de gravitation:	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
Constante de Planck:	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante électrique:	$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ MKSA}$
Constante de Boltzmann	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,31$
Densité du cuivre	8,9
Densité du mercure	13,6
Densité de la glycérine	1,35
Distance Terre Lune:	$D_{TL} = 384000 \text{ km}$
Distance Terre Soleil:	$D_{TS} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$
Energie de « combustion » du pétrole:	12200 kWh/tonne
Energie de fission de l'Uranium 235:	200 mev/noyau
Masse de l'électron:	$m_e = \frac{1}{1836} m_p = 0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Masse atomique de l'hélium	$M = 2$.
Masse de la molécule gramme de l'hydrogène:	$M_{H_2} = 2$
Masse de la Terre:	$M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Masse du proton:	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masse du Soleil:	$M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Masse de la molécule gramme de l'or:	197 g.
Masse volumique de l'air:	$\rho = 1,3 \text{ g / l}$

Masse volumique de l'eau :	1 g/cm^3
Masse volumique du mercure:	$\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$
Masse volumique de l'or:	$\rho = 19,3 \text{ g/cm}^3$
Masse volumique de la glycérine:	$\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$
Nombre d'Avogadro:	$N_0 = 6,023 \cdot 10^{23}$
Rayon de l'atome d'hydrogène:	$a_0 = 0,5 \text{ \AA}$
Rayon de la Terre:	$R = 6\,400 \text{ km}$.
Rayon du Soleil:	$R_s = 7 \cdot 10^5 \text{ km}$
Température du Soleil:	$T_s = 5700 \text{ K}$
Vitesse de la lumière:	$c = 300\,000 \text{ kms}^{-1}$
Viscosité de l'eau	$\eta = 10^{-3} \text{ Poiseuille}$
Chaleur massique de l'eau	$c = 1 \text{ cal/g.k}$
Chaleur massique de la glace	$c_g = 0,5 \text{ cal/g.k}$
Chaleur latente de fusion de la glace	$L = 80 \text{ cal/g}$
Unités :	
L'électron volt ;	$eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
La calorie ;	$c = 4,18 \text{ J}$

Annexe 6 Les ordres de grandeurs

J'ai regroupé ici quelques exercices ayant pour objectif de calculer les ordres de grandeurs les plus importants à connaître lorsque nous voulons constituer les systèmes à prendre en compte lors de l'utilisation des lois de la mécanique. Il faut les retenir afin de pouvoir justifier les modélisations des situations. Ils permettent de répondre à la question de savoir, par exemple, pourquoi nous n'avons pas tenu compte du bocal contenant l'eau dans l'exercice d'Archimède⁵³ etc. Il n'est pas question ici d'une progression d'exercices. À chacun de voir à quel endroit ils s'insèrent. Il s'agit essentiellement de fournir des réponses aux questions que l'étudiant attentif pourrait éventuellement se poser.

Avec quelle approximation pouvons-nous "considérer" que la Terre peut constituer un repère galiléen?

Exercice préliminaire.

Cet exercice vise à faire la distinction entre la Terre et le sol afin de résoudre des exercices mettant en jeu des objets immobiles. La Terre est momentanément supposée constituer un repère galiléen \mathcal{R} .

Un objet S de masse m est posé sur le sol, quelle force le sol exerce-t-il sur lui ?
Supposons que l'objet soit posé sur une table t .

⁵³ Cette remarque n'est pas anodine. Les livres du secondaire ne font pas appel aux systèmes. Seule la connaissance des ordres de grandeurs permet de construire des systèmes isolés.

D'après la [loi fondamentale de la dynamique](#), l'objet étant immobile, la somme des forces que les objets qui lui sont extérieurs exercent sur lui, est nulle.

Qu'est-ce qui agit sur l'objet **O** ?

- La table qui exerce une force dirigée vers le haut que nous notons : $\vec{F}_{t/O}$

- La Terre :

Donc :

$$\vec{F}_{T/O} + \vec{F}_{t/O} = m_O \cdot \vec{g}_0 + \vec{F}_{t/O} \Rightarrow \vec{F}_{T/O} = -m_O \cdot \vec{g}_0$$

D'après [la loi de la gravitation](#), la Terre exerce une force dirigée vers le bas dont l'expression approximative au voisinage de la Terre est :

$$\vec{F}_{T/O} = m_O \cdot g_0$$

Nous voyons bien que dans ces équations il faut distinguer la force qu'exerce la table sur l'objet et celle de la Terre. Or le sol n'est jamais qu'une table à laquelle on aurait coupé les pieds. Cet exercice vise à montrer que pour résoudre des problèmes d'équilibre, il faut distinguer la Terre du sol, ce qui n'est pas évident.

1) La Terre tournant sur elle-même peut-elle être « considérée » comme un repère galiléen ?

Évaluons l'incidence de la rotation de la Terre autour du Soleil sur la valeur de g_0 .

La Terre tourne sur elle-même et elle tourne autour du soleil. Évaluez l'ordre de grandeur de l'erreur commise sur l'accélération subie par un objet posé sur le sol lorsque nous supposons que le laboratoire est un repère galiléen en tenant compte : de la rotation de la Terre sur elle-même d'une part, puis de la rotation de la Terre autour du soleil.

Résolution

Choisissons le cas le plus défavorable : l'objet est posé sur le sol à l'équateur, il constitue le système **S** ponctuel de masse m .

Quels sont les objets extérieurs à **S** qui agissent sur **S** ?

1) Selon [la loi de gravitation](#), la Terre qui exerce sur **S** une force exprimée par :

$$(1) \vec{F}_{T/S} = \frac{-GM_T m_S}{R_T^2} \cdot \vec{u}_r = -m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r$$

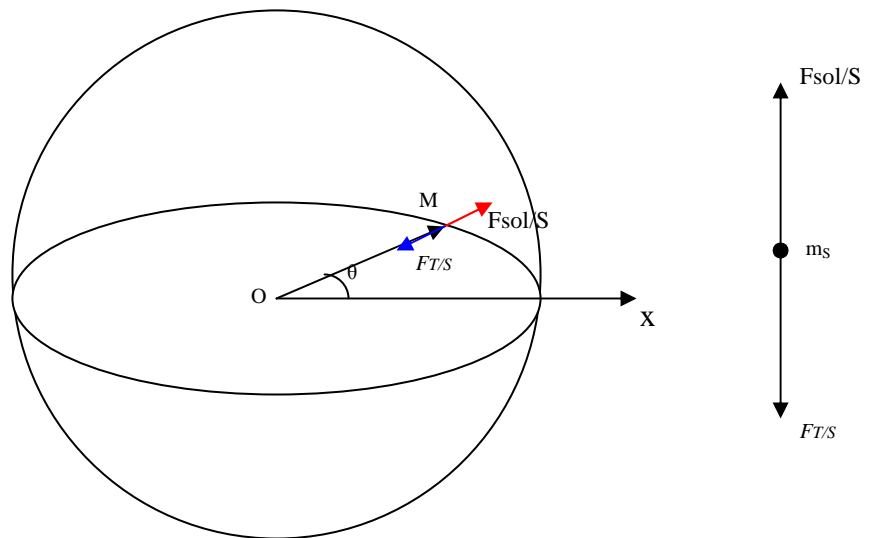
Où G désigne la constante universelle de gravitation, M_T la masse de la Terre, m_S celle de l'objet, R_T le rayon de la Terre, \vec{u}_r le rayon vecteur unitaire et \vec{u}_θ le rayon vecteur perpendiculaire. Voir fig.

2) Le sol qui exerce sur l'objet une force dont nous ignorons l'expression mais que nous pouvons désigner⁵⁴ par : $\vec{F}_{Sol/S}$.

⁵⁴ Je trouve que l'opération intellectuelle qui consiste à résoudre des problèmes par le seul fait de désigner des grandeurs dont nous ignorons tout est suffisamment remarquable pour être soulignée.

Dans le repère absolu galiléen lié aux étoiles \mathcal{R}_0 , et dont l'origine O peut être choisie au centre de la Terre, la loi fondamentale de la dynamique s'applique à l'objet S que nous isolons par la pensée.

$$(2) \vec{F}_{T/S} + \vec{F}_{sol/S} = -m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r + \vec{F}_{sol/S} = m_S \cdot \vec{a}_S$$



La figure de gauche représente les forces qui agissent sur S dans le repère galiléen absolu \mathcal{R}_0 lié aux étoiles, ayant pour origine le centre O de la Terre. Trop petit par rapport aux autres grandeurs, $m_S a_S$ n'a pas été représenté sur la figure.

La figure de droite représente les forces dans le repère supposé galiléen \mathcal{R} lié à l'objet. La trajectoire de S ne doit pas être figurée dans cette représentation contrairement à ce qu'on observe parfois dans certains ouvrages.

Cherchons l'expression de l'accélération \vec{a}_S de l'objet S :

La position M de l'objet S est repérée par le rayon vecteur :

$$(3) \vec{OM} = R_T \cdot \vec{u}_r$$

et l'angle polaire : $O\vec{x}, O\vec{M} = \theta$.

Nous supposons que le mouvement de l'objet S posé à la surface de la Terre est circulaire donc $r=R_T=Cst$, et que la vitesse angulaire ω de la rotation de la Terre est constante donc notée ω_0 .

Par définition la vitesse angulaire de la Terre s'exprime par :

$$\omega_0 = \frac{d\theta}{dT}$$

Elle est supposée uniforme

Par définition : la vitesse de S se calcule en dérivant le rayon vecteur en fonction du temps :

$$\vec{v} = \frac{dOM}{dt} = R_T \cdot \frac{d\vec{u}_r}{dt} = R_T \cdot \frac{d\vec{u}_r}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = R_T \cdot \omega_0 \cdot \vec{u}_\theta$$

Elle est portée par le vecteur unitaire \vec{u}_θ perpendiculaire à \vec{u}_r .

Par définition : l'accélération s'obtient en dérivant une seconde fois⁵⁵ :

$$(4) \vec{a}_S = \frac{d^2OM}{dt^2} = -R_T \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u}_r$$

Reportons l'expression de l'accélération dans l'équation (2) :

$$(5) -m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r + \vec{F}_{sol/S} = -m_S \cdot R_T \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u}_r$$

L'expression de la force que le sol exerce sur l'objet devient :

$$(5) \vec{F}_{sol/S} = -m_S \cdot R_T \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u}_r + m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r = m_S (g_0 - R_T \cdot \omega_0^2)$$

La valeur de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre n'est plus g_0 elle est diminuée. Donc nous pouvons dire que tout se passe comme si l'accélération de la pesanteur g_0 était modifiée, g effectif s'exprime par :

$$g = g_0 - R_T \omega_0^2$$

La rotation de la Terre modifie bien la valeur apparente de g_0 , mais de combien ?

Évaluons l'incidence de la rotation de la Terre sur elle-même sur la valeur de l'accélération de la pesanteur g_0 au voisinage de la Terre.

La table des constantes précise que :

- Le rayon de la Terre $R_t = 6,4 \cdot 10^6$ m.

- La période de la rotation de la Terre sur elle-même est d'une journée si bien que la modification précédente vaut dans ce cas :

$$R_T \cdot \omega_0 = 6,4 \cdot 10^6 \cdot \frac{2\pi}{24 \cdot 3600} = 460 \cdot m \cdot s^{-1} \cong (1650 \cdot km \cdot h^{-1}).$$

$$R_T \cdot \omega_0^2 = 6,4 \cdot 10^6 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{24 \cdot 3600} = 3 \cdot 10^{-2} ms^{-2}$$

Nous pouvons calculer **l'erreur relative** commise sur la valeur de l'accélération de la pesanteur due à la rotation de la Terre. **Par définition :** elle est donnée par le rapport :

$$\frac{R_T \cdot \omega_0^2}{g_0} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ soit } 0,3\%$$

Ce qui répond à la question.

Revenons cependant sur l'interprétation de l'expression (5)

$$(5) \vec{F}_{sol/S} = -m_S \cdot R_T \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u}_r + m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r$$

Lorsque nous écrivons l'équilibre d'un objet S posé sur le sol dans le référentiel Terre considéré comme galiléen nous négligeons le terme : $-m_S \cdot R_T \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u}_r$ et nous écrivons directement :

⁵⁵ Je ne détaille pas le calcul algébrique qui est dans tous les cours.

$$(5)' \vec{F}_{sol/S} - m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r = 0$$

Le terme relatif à l'accélération due au mouvement de rotation de la Terre est homogène à une force. Il est parfois **qualifié de pseudo force**. Cette notion est inutile puisque nous avons pu nous en passer. À mon avis il ne fait que créer la confusion. Il vaut mieux dire dès le départ : (1) que la loi fondamentale de la dynamique n'est valable que dans un repère absolu galiléen \mathcal{R} lié aux étoiles, (2) justifier les approximations qui permettent de traiter la Terre comme un repère galiléen et (3) montrer comment s'effectuent les changements de repères, au lieu de fournir des recettes dont le domaine de validité n'est pas explicité.

2) La Terre tourne autour du soleil

Évaluons l'incidence de la rotation de la Terre autour du soleil sur la valeur de g_0 .

La formalisation du problème est la même que dans le cas précédent.

Il s'agit de calculs d'ordres de grandeurs, nous pouvons donc supposer que la trajectoire de la Terre autour du soleil est un cercle de rayon $R = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. La période de rotation $T = 365$ jours = 365. 24. 3600 s.

$$R_{TS} \cdot \omega_T^2 = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{9 \cdot 10^8}{1,5 \cdot 10^{11}} \right)^2 = 6 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{R_{TS} \cdot \omega_T^2}{g_0} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ soit } 0,05 \%$$

Ces valeurs montrent qu'il est inutile de prendre en compte la rotation de la Terre lorsque la précision des résultats ne doit pas excéder le millième. Bien que la Terre, tournant sur elle-même et autour du soleil, ne soit pas en toute rigueur un repère galiléen, il est possible de la "considérer" comme un repère galiléen, c'est à dire animé d'un mouvement rectiligne uniforme, lorsque les exigences sur la précision des résultats n'excèdent pas le centième. La petitesse relative des corrections explique pourquoi nous ne percevons pas la rotation de la Terre comme nous ressentons celle d'une voiture dans un virage.

3) Rotation de la Terre

Rien n'interdit de poser des problèmes amusants, bien au contraire !

Il ne faudrait pas que la rotation de la Terre, supposée uniforme, soit beaucoup plus rapide, pour que ses effets ne soient plus du tout négligeables. Quelle devrait être par exemple la durée du jour en heures pour qu'à l'équateur, un individu se trouve en état d'apesanteur. Cette durée dépend-elle de la masse de l'individu choisi⁵⁶?

En utilisant les résultats précédents, la force que le sol exerce sur l'individu devient nulle lorsque la valeur ω_l de la vitesse angulaire de la Terre satisfait la relation :

⁵⁶ Texte d'Yvan Simon.

$$R_T \cdot \omega_l^2 = g_0 \Leftrightarrow T_0 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g_0}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{6,4 \cdot 10^6}{10}} = 5000 \text{ s soit environ 1,4 heures, valeur}$$

indépendante de la masse de l'individu. Nous l'avons échappé belle si la Terre tournait à cette vitesse nous ne serions probablement pas là !

Pseudo force

Notez que nous n'avons pas eu besoin d'utiliser le faux concept de pseudo force pour résoudre les exercices précédents. Je ne tiens pas à rallonger excessivement ces annexes c'est pourquoi je ne ferai que deux remarques :

- Les pseudos forces ne s'exercent pas comme des forces véritables entre des objets.
- L'utilisation des pseudos forces au lieu des véritables accélérations dans des repères galiléens absolus, ne pose-elle pas plus de problèmes qu'elle n'en résout dans les repères qui ne sont plus galiléens sans que cela soit spécifié ?

Dans l'exemple de la Terre qui tourne sur elle même, l'équation :

$$(5) \vec{F}_{sol/S} = -m_S \cdot R_T \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u}_r + m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r = m_S (g_0 - R_T \cdot \omega_0^2)$$

nous permettait d'écrire l'équilibre de l'objet placé sur le sol en nous plaçant dans le repère de l'objet. Mais ce repère n'est pas galiléen puisque, lié à la Terre, il tourne. Nous ne pouvons donc pas écrire directement la loi fondamentale de la dynamique. Ce que nous avons fait sans difficulté dans le repère absolu avec l'équation :

$$(2) \vec{F}_{T/S} + \vec{F}_{sol/S} = -m_S \cdot g_0 \cdot \vec{u}_r + \vec{F}_{sol/S} = m_S \cdot \vec{a}_S$$

Le concept de force fictive, dite encore pseudo-force, est un faux concept dont il est superflu d'encombrer les étudiants. Les Anglo saxons parlent plus judicieusement d'accélération.

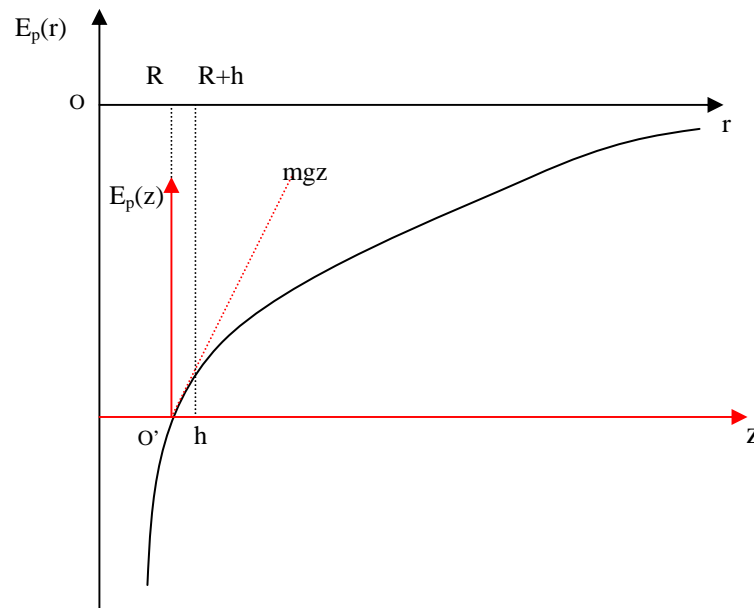
Approximations au voisinage de la Terre

1) Pour quelle valeur de g_0 la valeur de la force $|\mathbf{F}| = G \frac{M \cdot m}{r^2}$ que la Terre exerce sur un objet de masse m est-elle égale à l'expression : $|\mathbf{F}| = m \cdot g_0$?

2) L'expression de l'énergie potentielle (1) $E_p(r) = -\frac{GMm}{r}$, d'un système S constitué par un objet quelconque de masse m et la Terre de masse M en fonction de la distance r des centres de gravité de la Terre et de l'objet, est-elle compatible avec l'expression (2) $E_p(z) = m \cdot g_0 \cdot z$ donnée lorsque l'objet est à une altitude $z = h$. Il est conseillé de développer l'expression de $E_p(r)$ au voisinage de la surface de la Terre, c'est-à-dire pour $r = R + h$, lorsque $\frac{h}{R} \ll 1$. Jusqu'à quelles altitudes h_0 et h'_0 de h ces deux expressions différent-elles de moins de 1%, de moins de ; 1/1000 ?

En gardant le critère de précision de 1% décrire le volume dans lequel il est possible de considérer que l'énergie potentielle du système s'exprime par : $E_p(z) = m \cdot g_0 \cdot z$.

Représentez sur un même graphique les fonctions $E_p(r)$ et $E_p(z)$.



La figure⁵⁷ représente la variation de l'énergie potentielle du système [Terre +Objet] qui est indépendante des axes de référence. La même courbe $E_p(r)$ donc représentée en fonction de la distance r de l'objet au centre de la Terre se confond avec $E_p(z)$ au voisinage de la Terre sur une petite hauteur h .

1) D'après la loi de gravitation :

$$|F| = G \frac{M \cdot m}{r^2} = G \frac{M \cdot m}{R^2}$$

À la surface de la Terre $r = R$, l'égalité stricte est respectée :

$$|F| = G \frac{M \cdot m}{r^2} = G \frac{M \cdot m}{R^2} = g_0 \cdot m$$

D'où nous pouvons déduire la valeur de g_0 dite « accélération de la pesanteur » :

$$g_0 = G \frac{M}{R^2} \Rightarrow G \cdot M = g_0 \cdot R^2$$

Si h désigne l'altitude au-dessus de la Terre, h étant infiniment plus petit que R , l'expression peut être développée lorsque h est beaucoup plus petit que R en fonction de h/R :

$$E_p(z) = -\frac{GMm}{r} \Rightarrow E_p(R+h) = -\frac{GMm}{R+h} = -\frac{GMm}{R} \left(\frac{1}{1+\frac{h}{R}} \right) = -m \cdot g_0 \cdot R \cdot \left(\frac{1}{1+\frac{h}{R}} \right)$$

Utilisons le développement mathématique de la forme :

$$(1 + \varepsilon)^m = 1 + m \cdot \varepsilon + \frac{m \cdot (m-1)}{2!} \cdot \varepsilon^2$$

⁵⁷ On ne comprend cette figure qu'en essayant de la construire soi-même.

Utilisée au premier ordre pour : $\frac{h}{R}$:

$$\left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-1} = 1 - 1 \cdot \frac{h}{R}$$

$$E_p(R+h) = -m \cdot g_0 \cdot R \cdot \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-1} = -m \cdot g_0 \cdot R \cdot \left(1 - \frac{h}{R}\right)$$

Pour $h=0$

$$(1) E_p(R) = -\frac{GMm}{R} = -m \cdot g_0 \cdot R$$

Pour que l'erreur sur la valeur de E_p soit inférieure à 1% il faut que:

$$\frac{E_p(R+h) - E_p(R)}{E_p(R)} = -\frac{h}{R} - 2 \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2 < 1\%$$

Ce qui fixe la valeur h_0 de la hauteur h qui réalise la condition.

$$\frac{h_0}{R} = \frac{1}{100} \Rightarrow h_0 = \frac{R}{100} = 64 \text{ km}$$

$$h_0 = 6,4 \text{ km}$$

Généralement, l'énergie potentielle des systèmes **S** (objet + Terre) s'exprime par l'expression approchée : $E_p(z) = m \cdot g_0 \cdot z$ dans une coque sphérique entourant la Terre de hauteur 64 km à 1% près.

Un calcul similaire permet de déterminer que l'expression de la force **mg** au voisinage de la Terre est une bonne approximation de l'expression rigoureuse à 1% près est de 34 km.

Ces résultats expliquent pourquoi il est possible de ne tenir compte que des expressions approchées des forces **mg₀** et des énergies potentielles **mg₀z** pour des événements qui se produisent dans le laboratoire. En revanche dès que les objets s'éloignent de la Terre, il faut prendre l'expression exacte des lois.

Ce développement montre aussi que les qualificatifs « petit » ou « grand » n'ont pas de sens tant que nous ne fixons pas les degrés de tolérance.

Comparaison des ordres de grandeur des forces

Ordre de grandeur de la force qui s'exerce entre la Terre et un objet ayant une masse de 1 kilogramme placé à sa surface.

L'expression exacte de la force que la Terre de masse **M** exerce sur un objet ponctuel de masse **m** donnée par la [loi de la gravitation](#) s'écrit:

$$2) F_{t/o} = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2}$$

L'expression approchée de la loi de Newton au voisinage de la Terre s'écrit :

$$1) F_{t/o} = m \cdot g_0 = 10 \text{ Newtons}$$

Pour calculer des ordres de grandeur, il suffit de prendre la valeur approximative de g_0 égale à 10. Il faut retenir cette valeur pour avoir une référence de comparaison, mais il faut aussi comprendre d'où elle provient.

C'est parce que la Terre **T** a une masse énorme qu'elle seule exerce une force notable sur les objets.

Ordre de grandeur de la force de gravitation qui s'exerce entre deux objets A et B ayant chacun une masse de 1 kilogramme et dont les centres sont distants de 1 mètre

$$F_{A/B} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1 \cdot 1}{1^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Newtons}$$

Ce résultat est incommensurablement plus faible que les 10 newtons calculés précédemment.

Seul la connaissance de cet ordre de grandeur permet de comprendre pourquoi nous pouvons construire des systèmes isolés (Terre +objet) sans avoir à prendre en compte les objets environnants⁵⁸ :

$$\frac{F_{T/B}}{F_{A/B}} \approx 10^{11}$$

Ce qui est négligeable dans la plupart des circonstances.

Impossible, sans ce calcul, de choisir les objets qui exercent une force notable sur celui dont on veut caractériser la position d'équilibre ou caractériser le mouvement.

Généralement nous pouvons négliger les forces qui s'exercent entre les objets dont la charge électrique est globalement neutre.

Ordre de grandeur de la force que la Terre exerce sur une molécule d'oxygène

La force que la Terre exerce sur une molécule d'oxygène vaut :

$$m_{O_2} \cdot g = \frac{32 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} \cdot 10 \cong 10^{-25} \text{ Newton}$$

Nous pouvons commencer à comprendre pourquoi les molécules d'oxygène ne tombent pas ; une chance car sinon il faudrait ramper pour respirer !

Exception :

Tous ceux qui ont manipulé des lames de microscope savent que lorsqu'elles sont préalablement mouillées, et qu'elles ont été rapprochées, elles semblent collées. Il devient impossible de les séparer en les arrachant et il faut les faire glisser l'une sur l'autre pour y parvenir. Ce phénomène se manifeste parce que les molécules des deux lames sont suffisamment proches pour interagir à l'échelle microscopique. Un langage que j'estime épistémiquement contestable exprimerait les choses en disant que ce phénomène « met en évidence » l'existence des interactions faibles entre les atomes. Je préfère dire que les interactions faibles permettent de décrire ce phénomène.

⁵⁸ C'est l'ignorance des ordres de grandeurs qui explique la répugnance des enseignants à parler de systèmes isolés. Voir chapitre 2.

Comparaison entre les forces de gravitation et les forces électriques

Comparaison de l'ordre de grandeur de la force électrique et de la force de gravitation qui s'exercent entre un proton et un électron distant de 1 Angström

$$\frac{F_e}{F_G} = \frac{k \cdot e^2}{r^2} \cdot \frac{r^2}{G \cdot m_p \cdot m_e} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{1,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1836 \cdot (0,9 \cdot 10^{-30})^2} \cong 10^{40}$$

C'est un ordre de grandeur difficilement concevable. Pour essayer d'en avoir une idée, comparez le au nombre de secondes qui se sont écoulées depuis la création du monde.

Dès que les objets portent une charge, la force électrique qu'ils exercent les uns sur les autres est incommensurablement plus grande que les forces de gravitation.

Nombre d'Avogadro

Le nombre d'Avogadro est le nombre d'atomes ou de molécules contenues dans 12 grammes de carbone⁵⁹. De nombreuses propriétés de la matière résultent de l'énormité de ce nombre : $N_0 = 10^{23}$.

Quelle durée faudrait-il passer pour compter les molécules contenues dans une goutte d'eau en supposant qu'on en compte 5 par seconde. Comparez le résultat à l'âge de l'univers ;

Cherchons le nombre de molécules contenues dans une goutte d'eau de diamètre approximativement de 1 millimètre = 10^{-3} mètres. Son volume est $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 5 \cdot 10^{-8} m^3$

Une mole d'eau, soit 18 grammes, contient par définition N_0 molécules donc le nombre de molécules contenues dans la goutte d'eau est $n = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{18} \cdot 6 \cdot 10^{23} = 2 \cdot 10^{19}$

La durée nécessaire en secondes pour compter les molécules est $4 \cdot 10^{18}$ secondes, soit quatre fois la durée de l'univers évalué à 30 milliards d'années ! Cette évaluation vise à donner une vague idée de la colossale valeur du nombre d'Avogadro qui a des conséquences importantes.

Notez que fournir un résultat avec plus d'un chiffre significatif n'a aucun sens pour des évaluations. On aurait pu prendre une goutte cubique sans modifier le résultat. Il est possible de chercher à évaluer le domaine d'application de la mécanique newtonienne classique, sans avoir à tenir compte des effets relativistes ou des effets quantiques. En revanche certains effets macroscopiques ne s'expliquent pas sans l'intervention de la mécanique quantique.

Il est impossible d'avoir une idée du fonctionnement du monde matériel si on n'a pas en tête ces ordres de grandeurs.

Force d'interaction gravitationnelle : distribution linéique de la masse

Voilà encore un autre texte pris dans les annales de la fac conçu pour faire calculer inutilement les étudiants, comme si la physique par elle-même ne présentait pas assez de

⁵⁹ Ce nombre a été mesuré dans de multiples expériences par Jean Perrin.

difficultés à résoudre. Pour interpréter le texte avec les grandeurs physiques que nous avons définies, il suffit de remplacer « potentiel gravitationnel » par énergie potentielle et « champ gravitationnel » par force de gravitation.

1) On se propose de déterminer le potentiel gravitationnel qu'exerce une baguette, d'épaisseur uniforme négligeable, de longueur L , de densité linéique de masse μ , fixe dans l'espace, sur un point O , placé dans son prolongement à une distance a . Pour cela on découpera la baguette en petits éléments, le potentiel total exercé en O étant la somme des potentiels élémentaires qu'ils créent en O .

Application numérique $a = 100$ mm, $L = 9$ mm, $\mu = 5$ g.cm⁻¹ et $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.

2) Déterminer l'expression du champ gravitationnel créé par la baguette au point O sur un point matériel de masse $m' = 1$ g⁶⁰.

Commentaires

Avant de nous lancer dans un calcul intégral un peu lourd, évaluons sa pertinence. Calculons un ordre de grandeur de la valeur de la force que la baguette exerce sur « le point matériel » de masse m' , en remplaçant la baguette b par un « point matériel » de masse m_0 et situé à 10 centimètres de m' .

Calculons la masse m' de la baguette:

$$m' = L \cdot \mu = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot \frac{10^{-3}}{10^{-2}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$F_{b/m_0} = G \cdot \frac{m' \cdot m_0}{d^2} \cong 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{10^{-2}} \cong 3 \cdot 10^{-14} \text{ N}$$

La relation entre la force exercée par la baguette⁶¹ sur m_0 et celle de la Terre créée sur m_0 vaut :

$$\vec{F}_{T/m_0} = m_0 \cdot \vec{g} = 10^{-3} \cdot 10 = 10^{-2} \text{ N}$$

Soit la force terrestre divisée par :

$$\frac{F_{T/m_0}}{F_{b/m_0}} \cong 10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$$

L'évaluation précédente montre que les valeurs demandées sont tellement faibles qu'elles ne sont même pas mesurables ! Elles n'interviennent dans aucune situation matérielle. Cet exercice montre à quel point la méconnaissance des ordres de grandeur dans l'enseignement universitaire conduit certains collègues à poser des problèmes à grand pouvoir d'abstraction et qui n'ont aucun intérêt pratique !

⁶⁰ Ce problème, qui fait calculer des potentiels de gravitation et des champs, a un plus grand pouvoir d'abstraction que ceux qui utilisent les concepts d'énergie potentielle et de force dont il ne diffère que par la masse de l'objet test.

⁶¹ Le fait que le texte ne cite pas l'objet de masse m_0 pose un problème de notation qui m'entraîne à transgresser les lois que j'ai énoncées : et voilà comment se perpétue le conditionnement que j'essaie de décrire.

Les évaluations précédentes permettent de comprendre pourquoi l'exercice précédent ne présente qu'un intérêt algébrique⁶²; il s'agit de faire calculer une intégrale aux étudiants. Je considère que ce type d'exercice concerne plus l'enseignement des techniques mathématiques que celui de la physique.

Remarques diverses.

Notons incidemment qu'un potentiel ne s'exerce pas ! Cette formulation est symptomatique du peu d'importance accordée au statut des grandeurs physiques utilisées.

Une bonne question à se poser lors de la rédaction d'un exercice ; quel est son enjeu ?

Annexe 7 : Comparaison des textes d'exercices «théoriques » et «expérimentaux » ; Expérience de Millikan

Il peut paraître paradoxal de faire une différence entre exercices théoriques et expérimentaux lorsque les étudiants ne travaillent qu'avec du papier et un crayon. Les exercices sont toujours résolus dans le domaine théorique, alors que les expériences utilisent du matériel et font partie du domaine expérimental. Cependant, il est possible de distinguer différentes sortes d'exercices : ceux qui concernent des questions théoriques et qui se limitent le plus souvent à un jeu de calculs sur des grandeurs physiques, et ceux qui demandent de résoudre des questions relatives à une situation expérimentale. En réalité, même pour agir effectivement avec des objets, il faut savoir ce que l'on fait et, pour cela, il est bon de réfléchir à l'aide d'un papier et d'un crayon. La réalisation d'une situation expérimentale nécessite d'être prévue donc modélisée et conceptualisée. En réalité les domaines ne sont pas aussi strictement séparés que la modélisation pourrait le laisser croire si elle avait pour objectif de décrire la réalité, ce qui n'est jamais le cas⁶³.

Il s'agit donc de montrer comment les questions que l'on se pose varient selon qu'elles sont envisagées du point de vue théorique ou bien du point de vue expérimental et non de proposer une résolution le problème.

L'expérience de Millikan, qui se prête très bien à ce genre de démonstration, vise à «mettre en évidence » le fait qu'une charge est toujours un multiple entier d'une charge élémentaire, celle d'un électron⁶⁴.

Exercice préliminaire de principe

⁶² Dont le seul objectif est de faire calculer même si c'est pour rien !

⁶³ Je disais bien dans le chapitre 1 que les trois mondes du modèle étaient étroitement imbriqués.

⁶⁴ Les textes originaux sont en caractères gras.

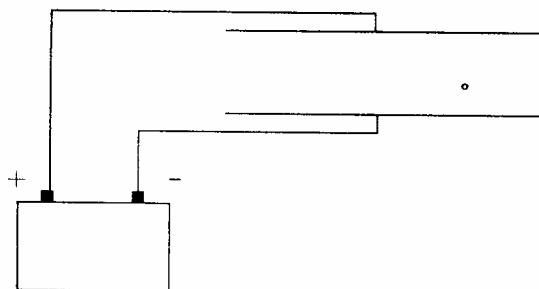


Figure 1 Millikan.

Une goutte d'huile de masse $m = 10^{-14}$ kg portant une charge élémentaire est injectée latéralement, à l'aide d'un vaporisateur, entre les plaques horizontales d'un condensateur plan distantes de $d = 6$ mm. Lorsqu'il n'y a aucune différence de potentiel aux bornes du condensateur, l'expérimentateur observe que la goutte tombe et atteint une vitesse limite v_1 . Cet effet peut être décrit en supposant que l'air exerce sur la goutte une force proportionnelle à la vitesse de chute ($\vec{f} = -k \cdot \vec{v}$). Établissez l'expression de v_1 en fonction de m et k .

1) Pour une valeur précise $\Delta V = U_0$ de la différence de potentiel (d.d.p.) appliquée aux bornes du condensateur, la goutte s'immobilise. La polarité étant celle indiquée sur la figure, quel est le signe de la charge portée par la goutte ? Quelle est la valeur de U_0 ? Quelle serait la valeur de U_0' d'équilibre si on multipliait par 10 l'écartement des plaques ? Que se passe-t-il si, avec la même d.d.p., on ne fait qu'inverser la polarité des plaques ?

2) Si au lieu de la goutte, l'expérimentateur avait introduit un électron libre entre les plaques du condensateur quelle serait en principe la d.d.p. ΔV à appliquer pour l'immobiliser sachant que sa masse est de l'ordre de 10^{-30} kg ?

Qu'en concluez-vous sur l'ordre de grandeur comparé des forces électriques et gravitationnelles ?

Exercice fondé sur l'expérience de Millikan⁶⁵

Pour effectuer l'expérience de Millikan, un expérimentateur vaporise des gouttelettes d'huile entre les plaques d'un condensateur. Dans cette situation, à la différence d'un exercice de principe tel que celui qui précède, nous ne connaissons ni la taille, ni la masse, ni la charge portée par la goutte injectée. En revanche nous pouvons connaître la masse volumique $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ de l'huile et le coefficient de viscosité $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ de l'air qu'il est possible de trouver dans les tables (telles que le Handbook de physique). La loi de Stokes stipule que le coefficient qui intervient dans l'expression de la force de frottement que l'air exerce sur la goutte supposée être solide et de forme sphérique de rayon r , s'exprime par : $k = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r$.

Dans l'exercice de principe précédent nous avons ignoré une autre force, celle que l'air exerce sur la goutte (dite poussée d'Archimède), et qui est égale au poids du volume d'air que la goutte déplace. Cette approximation est-elle justifiée compte tenu de la masse volumique de l'air $\rho' = 1,3 \text{ kg/m}^3$?

⁶⁵ Texte de Jacqueline Brenasin.

L'expérience permet de mesurer la différence de potentiel (d.d.p.) U_0 appliquée au condensateur et v_1 la vitesse limite de la goutte. L'expérimentateur procède de la façon suivante. Il repère une goutte particulière, commence par mesurer la valeur U_0 de la d.d.p. qu'il lui faut appliquer aux bornes du condensateur pour l'immobiliser, puis il coupe la d.d.p. en déclenchant son chronomètre afin de mesurer la vitesse v_1 de la goutte.

1) Démontrez que la mesure de la vitesse limite v_1 de la goutte permet de calculer la valeur r_0 de son rayon. Déduisez-en la masse m_0 de la goutte.

2) Démontrez qu'il devient alors possible de déduire la valeur de la charge q_0 que porte la goutte en fonction de r_0 et de U_0 .

Les valeurs mesurées par des étudiants en travaux pratiques ont été par exemple :

$U_0 = 292$ Volts, $v_1 = 6 \cdot 10^{-5}$ m s⁻¹ Calculez le nombre de charges élémentaires portées par la goutte observée.

3) N'avons-nous pas commis une erreur dans le calcul de la vitesse limite en ne tenant pas compte de la durée du régime transitoire du mouvement de la goutte⁶⁶ ?

- Décrivez le mouvement de la gouttelette avant qu'elle ait atteint sa vitesse limite v_1 .

- Combien de temps met-elle pour atteindre 99% de sa vitesse limite ?

La durée du régime transitoire a-t-il une influence significative sur le résultat de v_1 ?

Exercices de contrôle⁶⁷

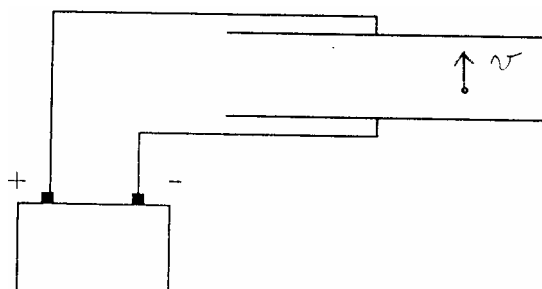


Figure 2 Millikan.

Une petite bille de plastique, dont la masse m connue est $2,0 \cdot 10^{-15}$ kg, est placée entre les plaques horizontales d'un condensateur plan distantes de 4 mm. Une batterie de 500 V est branchée aux bornes du condensateur plan selon la figure 2. On constate que la bille monte avec une vitesse \bar{v} qui est, en module, égale à la vitesse de la bille observée lorsqu'on débranche la batterie.

Calculez le signe et la valeur de la charge portée par la bille⁶⁸.

Commentaires

Quelles sont les caractéristiques des textes précédents ?

⁶⁶ C'est à dire le délai qui lui est nécessaire pour passer d'une vitesse nulle à la vitesse limite.

⁶⁷ Texte d'Yvan Simon.

⁶⁸ Texte d'Yvan Somon.

Même pour un exercice théorique, la situation est décrite en termes d'objets participant à des événements. **Une goutte d'huile de masse $m = 10^{-15}$ kg portant une charge élémentaire, est injectée entre les plaques horizontales d'un condensateur plan distantes de $d = 6$ mm.**

Dans le texte de principe, l'objectif consiste à trouver les caractéristiques des événements en fonction de l'état initial du système matériel et des caractéristiques des objets : calcul de la vitesse limite v_1 de la goutte d'huile en fonction de sa charge, de sa masse, de son rayon, de l'accélération de la pesanteur, qui comporte les caractéristiques de la Terre, de la masse volumique de l'huile, de l'air, de la viscosité de l'air, et de la tension appliquée au condensateur. Les valeurs de la charge et de la masse sont imposées et fixées arbitrairement, mais doivent être plausibles.

Le fait que le texte exprime une nette distinction entre les grandeurs physiques caractéristiques des objets et celles qui caractérisent les événements, constitue une aide précieuse pour comprendre l'objectif des calculs⁶⁹.

Le deuxième exercice est formulé du point de vue d'un observateur de la situation expérimentale. Il a pour objectif de préparer les étudiants à refaire une expérience analogue à celle qui a permis d'établir que les charges portées par un corps quelconque sont les multiples entiers d'une charge élémentaire qui vaut $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Ce principe porte le nom de «la quantification de la charge».

Le texte est rédigé de façon à ce que l'étudiant sache qui fait quoi et d'où proviennent les informations qui lui sont fournies. Des laboratoires spécialisés dans les mesures établissent les caractéristiques des matériaux qu'on peut trouver dans des tables. Les manipulations sont faites par un expérimentateur⁷⁰, et si le texte est réussi, l'étudiant sait ce qu'il doit établir.

Les approximations sont explicitées et évaluées. La question suivante : **La durée du régime transitoire a-t-il une influence significative sur le résultat de v_1 ?**, peut sembler aussi vague que celle qui est critiquée dans l'annexe à propos du manège. Cependant, dans ce dernier cas, elle permet de tirer les conclusions attendues parce qu'elle suit une question très précise qui est : **Combien de temps met-elle pour atteindre 99% de sa vitesse limite** qui permet de quantifier les grandeurs permettant de répondre à la question. De plus, la durée obtenue est si petite, de l'ordre de 10^{-4} seconde, qu'elle n'est même pas mesurable avec les chronomètres utilisés par les étudiants.

Les valeurs des mesures ne sont pas inventées : ce sont celles que des étudiants ont trouvées en travaux pratiques. Les questions portant sur les évaluations des approximations illustrent la façon dont sont opérées les modélisations et comment les justifier. Les différentes réponses entraînent de nombreux calculs algébriques qui, d'habitude, sont développés séparément, sur

⁶⁹ Je ne donne pas la solution parce que lorsque les conditions d'un bon énoncé sont réunies il est facile de résoudre les relations algébriques et de se concentrer sur l'interprétation des phénomènes.

⁷⁰ Voir lexique les mots opérateur et expérimentateur.

des situations conceptualisées.

La résolution de l'exercice de contrôle nécessite d'avoir compris l'ensemble des concepts et comment fonctionne le dispositif expérimental⁷¹.

Comparaison du texte précédent avec un exercice classique

Le texte suivant fait partie des exercices que l'on peut lire dans les séries de travaux dirigés proposés en DEUG. Il porte sur une situation analogue à celle qui vient d'être analysée. Comparons-le au précédent afin d'en spécifier les caractéristiques.

Texte original anonyme :

Une sphère homogène de rayon a , de masse volumique ρ , est lâchée sans vitesse initiale dans un liquide de masse volumique ρ_L .

La sphère est ainsi soumise à trois forces :

- son poids⁷²
- la poussée d'Archimède, qui est égale en valeur absolue au poids de la quantité de liquide déplacé par la sphère (soit un volume de liquide équivalent au volume de la sphère) et qui s'oppose au mouvement naturel de la sphère.
- une force de frottement visqueux égale à $6 \pi \eta a \|v\|$, où v est la vitesse de la sphère.

On rappelle le volume d'une sphère de rayon a : $4/3 \pi a^3$

La masse volumique d'un objet de masse m et de volume V : m/V

1. Quelle est la dimension du coefficient η ?
2. Écrire sous forme vectorielle la 2LN⁷³ appliquée à la sphère assimilée à un point.
3. Projeter la relation obtenue sur les axes x , y , z de la figure.

Comment se fait le mouvement ?

4. Trouver l'équation différentielle permettant de déterminer la vitesse de la sphère en fonction du temps. On introduira, pour simplifier les notations, le paramètre $\tau = m/(6 \pi a) = 2a^2 \rho/(9 \eta)$ dont on donnera la dimension.

5. Résoudre l'équation du (4).

Montrer que la sphère atteint une vitesse limite v_1 , que l'on calculera.

Déterminer le temps à partir duquel le mouvement est pratiquement uniforme.

On donne :

- pour la bille d'acier $a = 0,1$ cm et $\rho = 7,9$ g cm⁻³
 - pour la glycérine, $\rho_L = 1$ g cm⁻³, $\eta = 14$ g cm⁻¹ s⁻¹.
- $g = 9,8$ m s⁻².

⁷¹ Je le dois à Yvan Simon qui l'a proposé pour un examen.

⁷² Souligné dans le texte original. Serait-ce utile si les étudiants étaient habitués à repérer les objets qui interagissent ?

⁷³ Je suppose qu'il s'agit de la deuxième des lois de Newton !

6. Est-il possible d'étudier de la même façon la chute libre d'une bille d'acier dans l'air sachant que la valeur de η est ($1,8 \cdot 10^{-5} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$) ?

Commentaires

Les objets matériels sont remplacés par des concepts mathématiques, il s'agit d'étudier le mouvement d'une « sphère » dans un fluide. En conséquence, les valeurs de leurs caractéristiques ne sont pas précisées avant les applications numériques finales. Au départ, il peut tout aussi bien s'agir du mouvement d'une bille de liège dans de l'eau (auquel cas le « mouvement naturel » se produirait vers le haut) que d'une bille de plomb dans de l'eau (auquel cas le « mouvement naturel » se produirait vers le bas). Nous voyons ici à l'œuvre l'esprit d'abstraction dont se prévaut l'enseignement généraliste et dont nous pouvons percevoir ici la nature profonde. Nous pensons pouvoir faire des économies de pensée en rédigeant un exercice sensé traiter toutes les situations à la fois, ce qui a pour résultat que les étudiants n'en comprennent aucune à fond. De tels objectifs obligent à parler d'une sphère homogène et non d'une goutte d'huile.

Cette sorte de textes élude le travail de modélisation des situations réelles. Prendre une sphère, c'est « considérer » un objet de forme parfaite et non pas une goutte qui pourrait se déformer. Je cite là une objection que m'a faite un éminent collègue. Sa préoccupation n'est pourtant pas légitime ; l'expérience faite en travaux pratiques montre que les résultats obtenus permettent de trouver un nombre entier de charges, avec une dispersion des valeurs inférieure à 5%.

La sphère est ainsi soumise à trois forces : Les forces existent et les objets leur sont soumis, tel est le statut épistémologique implicite que cette verbalisation implique.

Où **v est la vitesse de la sphère**. En réalité la lettre **v** n'est pas la vitesse de la bille, elle la **désigne** et la **représente**. « Ceci n'est pas une pipe ».

La masse volumique d'un objet de masse m et de volume V : m/V. La précision concernant la définition de la masse volumique est inutile si l'unité de sa valeur numérique est spécifiée. Les valeurs ne peuvent pas être fournies pour des objets conceptualisés tels que des sphères et des fluides. Notons que le guidage des calculs est rendu d'autant plus nécessaire que son objectif n'est pas explicité.

On introduira : Ici « on » désigne l'étudiant. Il serait instructif de faire la liste de tout ce que ce pronom représente, par exemple dans **On donne**, « on » est inconnu mais fait partie du corps enseignant ou des physiciens des poids et mesures qui élaborent des dispositifs complexes permettant de mesurer les grandeurs que nous « donnons ». Quant à l'étudiant, il n'a aucun moyen de savoir qui est « on » !

Étudier. Mot vide de sens. Nous constatons ici que l'utilisation de ce mot oblige effectivement l'étudiant à deviner ce que le professeur attend de lui.

Déterminer le temps à partir duquel le mouvement est pratiquement uniforme.

Dans ce cas, le mot temps désigne le délai à partir duquel le mouvement est uniforme. Nous avons vu qu'il est impossible de répondre tant que n'est pas précisé ce que l'auteur entend par

« pratiquement » ; est-ce à 10%, 1%, 1/1000 près ? Rappelons par ailleurs que l'utilisation du mot temps crée la confusion tant qu'il désigne à la fois des notions aussi différentes que : la date, la durée ou le délai, et enfin le temps, la grandeur physique qui permet de décrire l'évolution des événements.

η est très faible. Tout d'abord, et en dehors de toute autre considération, encore une fois une valeur n'est jamais faible en soi, elle ne l'est que par rapport à une autre grandeur qu'il est absolument nécessaire de spécifier.

Le fait de traiter les objets matériels comme s'ils étaient des concepts mathématiques risque d'entraîner les auteurs à ne pas prendre en compte le champ de validité des lois et leur condition d'utilisation. **Ainsi le texte cité affirme quelque chose de faux.**

La loi de Stokes qui stipule la forme mathématique que prend le « frottement visqueux » mentionnée dans le texte, **suppose que soit réalisée la condition suivante : la valeur du nombre de Reynolds doit être inférieure à 1.** Le nombre de Reynolds est un test qui a pour expression $R = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}$. Dans le cas du déplacement d'une goutte d'eau dans l'air, ρ , qui

désigne la masse volumique de l'air, vaut 1,3 kilogramme par mètre cube, la viscosité η vaut $1,8 \cdot 10^{-5}$ SI⁷⁴, d le diamètre de la goutte d'eau et v_l sa vitesse limite varient selon la sorte de « pluie » concernée. Contrairement à ce qu'affirme trop légèrement le texte, le nombre de Reynolds sera d'autant plus petit que η sera... grand. Prenons des exemples précis. Selon une étude faite par Yvan Simon, qu'il a eu la gentillesse de me communiquer, si nous utilisons *a priori* l'expression de Stokes pour calculer les vitesses limites⁷⁵ des gouttes de pluie de différents diamètres, nous trouvons les ordres de grandeurs suivants :

	D	v_l
Brouillard	2 μ	$1,2 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$
Bruine	100 μ	$0,3 \cdot \text{ms}^{-1}$
Pluie	1 mm	$30 \cdot \text{ms}^{-1}$

La valeur trouvée pour la vitesse de la pluie ($30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) est excessive ; d'après notre expérience dans la vie courante, nous avons le sentiment qu'une goutte de pluie met nettement plus d'une seconde pour tomber de la hauteur d'un immeuble. Dans ce cas, la valeur de la vitesse trouvée par le calcul à partir de l'expression de Stokes est manifestement fausse.

⁷⁴ SI signifie Système (d'unité) International ou MKSA pour Mètre, Kilogramme, Seconde, Ampère.

⁷⁵ La vitesse limite constante v_l de la goutte se calcule en utilisant la loi fondamentale de la dynamique. Nous écrivons que la somme des forces des objets qui agissent sur la goutte ; $\vec{F}_{\text{Terre/goutte}} + \vec{F}_{\text{Air/goutte}} = \vec{0}$. En remplaçant les forces par leur expression en fonction de caractéristiques de la situation matérielle nous trouvons l'expression de $v_l = \frac{m g}{6 \pi \eta r} = \frac{d^2 \rho g}{2 \eta}$.

Pourquoi ? Parce que la valeur du nombre de Reynolds dépasse **1** et que les limites de validité de l'utilisation de la loi de Stokes pour décrire la force de frottement que l'air exerce sur la goutte ne sont pas respectées.

Comment calculer la valeur du nombre de Reynolds lorsque la vitesse obtenue par l'expression théorique ne convient pas ? Il faut utiliser une valeur expérimentale de la vitesse de la chute de la goutte de pluie. C'est dans « l'Encyclopédie internationale des sciences et des techniques⁷⁶ » à l'article « précipitations » que nous trouvons les valeurs des vitesses correspondant aux diamètres des gouttes suivantes :

D	v
0,5 mm	$2,0 \cdot ms^{-1}$
1,5 mm	$5 \cdot ms^{-1}$
3 mm	$7 \cdot ms^{-1}$

La vitesse d'une goutte de 1 mm de diamètre s'obtient par interpolation. Elle est de l'ordre de 3 m.s^{-1} ce qui est dix fois plus petit que les 30 mètres par seconde précédemment calculés.

Le calcul des valeurs du nombre de Reynolds pour les différentes formes que l'eau prend pour nous tomber sur la tête sont les suivantes :

	D	v_1	R
Brouillard	2μ	$1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$	$10^{-5} \ll 1$
Bruine	100 μ	$0,3 \cdot ms^{-1}$	$2 \approx 1$
Pluie	1 mm	3 m.s^{-1}	$2000 \gg 1$

Nous vérifions bien que la valeur du nombre de Reynolds est excessive dans le cas de la pluie. Autrement dit, bien qu'il s'agisse, dans ces trois cas, du fluide « eau » se déplaçant dans le fluide « air », les conditions d'utilisation de la loi de Stokes ne sont pas du tout réunies pour toutes les formes de pluie.

Si j'ai longuement développé cet exemple, c'est parce qu'il illustre à quelle sorte de risque nous nous exposons lorsque nous traitons les situations de façon trop formelle et par conséquent trop superficiellement et que nous négligeons de prendre en compte le domaine de validité des lois. Il donne incidemment les moyens de bâtir un texte formateur.

Annexe 8 Comment faire la différence entre un exercice de physique et un exercice de science fiction ?

Le texte suivant, reproduction d'un texte d'exercice donné en première année d'université, montre comment le phénomène de disparition des objets se manifeste de façon quasi caricaturale. Il permet de constater la nature des dérapages qu'entraîne ce phénomène : de nombreuses situations évoquées ne correspondent plus à aucune situation matérielle. Il ne

⁷⁶ L'Encyclopédie internationale des sciences et des techniques. Presses de la Cité Vol. 9 p. 120. Il faudrait qu'au cours de la formation des professeurs on leur signale l'existence de cet ouvrage.

faudrait pas croire que cet exercice est uniquement choisi pour les besoins de notre démonstration, il en existe de nombreux autres du même type. C'est pourquoi ils sont classés dans la catégorie des exercices de science fiction.

Texte original :

Propriété de l'énergie

Un système isolé est constitué de deux particules A et B en interaction l'une avec l'autre. Ces deux particules peuvent être considérées comme ponctuelles. Au cours de tout le problème, nous supposons que la particule A est immobile et que seule la particule B est susceptible de se déplacer sur un axe Ox. Nous noterons par x l'abscisse de la particule B à un instant quelconque.

L'énergie potentielle du système des deux particules est représentée sur la figure 1.

1. Déterminer le signe de dE_p/dx lorsque x varie de 0 à l'infini.
2. En déduire les sens successifs de la force \vec{F}_{AB} lorsque x varie de 0 à l'infini.
3. Quelles sont les positions d'équilibre ?
4. Déterminer dans chaque cas la nature de l'équilibre en expliquant pourquoi.

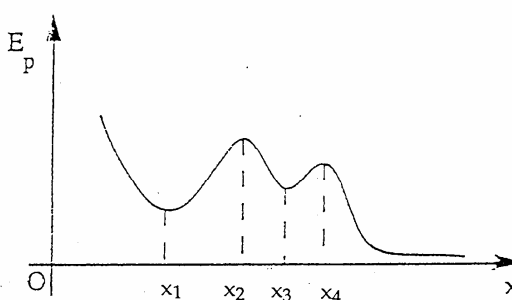


Figure 1

Commentaires

Si la courbe d'énergie potentielle, représentée sur la figure 1, caractérisait effectivement un système de deux particules matérielles pourquoi ne pas dire de quelles particules il s'agit? Pourquoi ne pas indiquer les valeurs numériques des positions des maxima et minima de la courbe? Si, comme je le soupçonne, cette courbe d'énergie potentielle a été totalement inventée et ne caractérise aucun système matériel, à quoi servent les calculs demandés⁷⁷ ?

Des énoncés de ce type sont suffisamment nombreux pour trouver les invariants qui permettent de définir les critères qui les caractérisent.

Nous constatons en effet que le texte n'informe pas sur la nature des objets matériels, ici les deux particules désignées par A et B, ni sur la façon de fixer la particule A, ni par quel moyen la particule B se déplace **sur un axe arbitraire Ox**.

⁷⁷ Le professeur qui en est l'auteur et à qui j'ai demandé des explications, a tenté de justifier son texte en me citant toutes sortes de molécules qui auraient pu avoir une telle courbe d'énergie potentielle sans me préciser lesquelles.

La première question ne porte que sur des interprétations du graphique.

La deuxième question suppose l'existence d'une force en soi.

La troisième question fait référence à des positions d'équilibre en soi.

La quatrième question concerne la nature d'un l'équilibre en soi qu'il faut cependant expliquer !

En fait cette courbe d'énergie potentielle a été inventée dans le but de faire calculer les étudiants. Le malheur est que ce type de textes les met dans une situation où ils ne peuvent pas savoir ce qu'ils doivent calculer.

Un exercice de science fiction n'informe pas :

- **sur la nature des objets ;**
- **sur les états qu'ils occupent ;**
- **sur les contraintes qu'ils subissent ;**
- **Sur les conditions des évolutions des situations;**
- **sur les valeurs numériques et les ordres de grandeurs.**

Ces caractéristiques permettent de le reconnaître afin d'éviter de se casser la tête pour rien. A *contrario* les exercices qui comportent les informations précédentes peuvent avantageusement être résolus⁷⁸.

Annexe 9 Comment faire évoluer les textes des exercices ? Le manège

Il s'agit de montrer ici comment utiliser le modèle de la démarche expérimentale proposé pour faire évoluer la rédaction des textes d'exercices.

L'exercice suivant fait partie de ceux qui accompagnent un film se rapportant à une expérience faite sur un manège présenté au Palais de la découverte à Paris. Nous en avons parlé au chapitre 2. Le texte proposé sous sa forme initiale, comporte un grand nombre de caractéristiques des textes habituels ; il est reproduit en totalité tel qu'il se présente en caractères gras. Puis les phrases sont reprises pour être analysées et commentées dans l'ordre où elles sont écrites. Suivent des propositions alternatives imprimées en italique. Enfin des règles de rédaction de textes sont suggérées, et une nouvelle rédaction proposée en italique. Les principes énoncés sont rappelés à chaque occasion.

Manège

Texte original :

Un manège horizontal S, situé dans le champ de pesanteur à la surface de la Terre, tourne autour d'un axe vertical passant par son centre avec une vitesse angulaire constante ω_0 . Les mouvements de la Terre sont négligés. Un pendule, constitué d'une masse m suspendue à l'extrémité d'un fil de longueur l, est accroché sur le manège à la distance d de l'axe de rotation. Sous l'effet de la rotation, le pendule s'écarte de la verticale d'un angle θ .

⁷⁸ On en trouve un grand nombre dans : *La physique*. Physical Science Study Committee. Dunod. 1970.

- 1) A quelles forces est soumise la masse dans le référentiel de la Terre ? Caractériser son accélération. Quel est son mouvement ?
- 2) Dans le référentiel du manège, le pendule est immobile.
 - a- A quelles forces la masse est-elle soumise dans ce référentiel ? Quel est le poids apparent de la masse ?
 - b- Écrire les conditions d'équilibre. En particulier, donner l'équation déterminant l'angle θ en fonction de ω .
 - c- Donner une solution graphique de cette équation.
 - d- Montrer que $\theta \rightarrow 0$ quand $\omega \rightarrow 0$. En supposant ω très petit, donner l'approximation de l'équation b) au premier ordre en θ . Montrer que la solution est acceptable sous la condition $\omega^2(d+1) \ll g$.
 - Application numérique : $\omega = 1$ tour/mn, $d = 2,5$ m, $g = 10$ m/s², $l = 1$ m.

Analyse du texte

L'exercice précédent a au moins l'avantage de faire référence à une situation matérielle identifiable, mais il décrit la situation en mélangeant les objets du monde expérimental et les concepts qui appartiennent au monde théorique ainsi :

Un manège horizontal S, situé dans le champ de pesanteur à la surface de la Terre...

Le manège désigne un objet complexe ; le champ de pesanteur désigne une grandeur physique, c'est-à-dire une idée, cette phrase mélange donc deux registres de description. De plus, la précision « à la surface de la Terre » est non seulement inutile, mais redondante avec « le champ de pesanteur ».

Règle à adopter : une situation matérielle devrait être décrite en termes d'objets participant à des événements.

Autre exemple de mélange de registre :

Un pendule, constitué d'une masse m suspendue à l'extrémité d'un fil...

La grandeur masse a un statut de grandeur physique qui peut difficilement être suspendue à un fil ; c'est pourquoi je proposerais de décrire l'objet caractérisé par sa masse **m** qui est accroché au fil⁷⁹ :

*Un pendule, constitué d'une boule, de masse **m**, attachée à l'extrémité d'un fil dont l'autre extrémité est accrochée à un support solidaire du manège...*

Un rédacteur, qui cherche toujours à faire le texte le plus court possible⁸⁰, serait tenté d'écrire ici un fil de longueur **l** ; seulement, dans l'expression mathématique, **l** ne représente pas la longueur du fil mais la distance entre le « point » de fixation du fil sur le support et le centre de gravité de la boule, ce qui fait partie de la modélisation de la situation.

⁷⁹ Les textes en italique indiquent des propositions tenant compte des remarques épistémiques.

⁸⁰ Les étudiants sont réputés être incapables de lire de longs textes sans que cette assertion n'ait jamais été correctement vérifiée.

Le texte sur le manège qui, contrairement à d'autres, cite des objets, va servir de prétexte à une remarque générale :

Il est rare que les situations présentées dans les exercices soient décrites de façon suffisamment précise pour que les étudiants puissent se les représenter.

Un pendule, constitué d'une masse m suspendue à l'extrémité d'un fil de longueur l , est accroché sur le manège à la distance d de l'axe de rotation.

Qu'est-ce qui est accroché à la distance d ? Il semblerait que ce soit le pendule, mais il comporte deux éléments ; il serait donc plus clair de préciser que c'est une des extrémités du fil qui est accrochée au plafond du manège.

Un pendule simple est constitué par une boule de masse m attachée à une extrémité d'un fil de longueur l dont l'autre extrémité est accrochée au plafond du manège. Le point de fixation du fil se trouve à la distance d de l'axe de rotation du manège.

Dans la proposition alternative, l'expression "point de fixation" est prise au sens matériel. Comme nous le voyons, il est difficile d'éliminer totalement les mots du vocabulaire des mathématiques.

Il semble utile de donner suffisamment d'informations pour que l'étudiant puisse concevoir la façon dont la situation est réalisée.

Le manège tourne autour d'un axe vertical

Une fois encore, nous assistons à un mélange des registres de description. Un axe est selon le Robert : « une ligne idéale », il ne représente pas directement le système matériel complexe autour duquel tourne le manège. Là n'est pas l'essentiel, la phrase est à peu près compréhensible et, surtout, je ne sais pas comment l'améliorer. Il me semble plus important de signaler qu'il est impératif de faire la distinction entre l'axe matériel de rotation et l'axe mathématique de rotation. Le mot «axe» a au moins deux sens ; il désigne la droite géométrique et aussi l'essieu, ou encore mieux l'axe de l'essieu !

[Le manège] tourne autour d'un axe vertical passant par son centre avec une vitesse angulaire constante ω .

Il n'est pas nécessaire que l'axe passe par le centre du manège pour que le manège tourne !

Le fait que la vitesse angulaire du manège soit constante est une supposition concernant une propriété caractéristique de la situation qui, en réalité, n'est pas strictement réalisable. En effet, si aucun moteur ne lui impose un tel mouvement, cela suppose que le manège n'est pas freiné par les autres objets avec lesquels il est en contact. Ce qui n'est absolument pas plausible : tout enfant qui s'est amusé dans des squares à lancer à la main des manèges sait bien qu'il s'arrête lorsqu'il cesse de le pousser ! En fait une vitesse angulaire constante ω est une hypothèse de travail qui correspond à une modélisation de la situation qu'il serait utile de signaler.

Par ailleurs il n'est pas raisonnable de préciser que l'on néglige le mouvement de la Terre et de passer sous silence le fait de négliger les frottements de l'essieu sur le manège dont les

effets sont autrement plus importants. Ce constat montre, encore une fois, à quel point il est nécessaire de prendre constamment en compte les valeurs des ordres de grandeur afin d'évaluer les différentes approximations.

Notons-le comme une règle qu'il n'est pas inutile de répéter jusqu'à ce qu'elle entre dans les mœurs :

Il n'y a pas de physique sans ordres de grandeur.

Propositions de texte faites en supposant que l'objet conceptuel «pendule» a été construit auparavant : *Un moteur entraîne le manège de façon à ce que sa vitesse angulaire de rotation ω_0 devienne constante... Un observateur situé sur le manège constate que le fil du pendule s'écarte de la verticale et s'immobilise pour un angle θ_0 .*

Une autre difficulté provient du fait que les grandeurs physiques sont souvent représentées par un symbole unique qui a plusieurs significations. Ainsi, par exemple, l'angle θ désigne aussi bien la grandeur qui décrit la position variable du fil au cours de son mouvement, que la valeur de cette grandeur pour un état donné du système, ici sa position d'équilibre ou, dans d'autres cas, sa position initiale. Cette polysémie des symboles va de pair avec le fait que les états des systèmes matériels sont rarement définis avec précision. Ceci se produit inmanquablement lorsque les objets participant aux situations ne sont pas nommés.

Règle. Afin de distinguer une grandeur θ , qui désigne la position angulaire variable du fil pendant le mouvement du pendule, de la valeur de cette même grandeur pour un état donné, nous pouvons prendre la convention qui consiste à désigner les valeurs en les signant par l'indice assigné à l'état correspondant ; ainsi « θ_0 » désigne l'angle de l'état initial 0 etc.

Description des questions

À quelles forces est soumise la masse dans le référentiel de la Terre ?

La question fait implicitement référence aux pseudo forces⁸¹ ou forces «fictives» que les étudiants sont incités à utiliser. Notons un caractère commun à de nombreux textes ; ils comportent des informations sournoises afin de guider les étudiants pour que le nombre de ceux qui parviennent à trouver la solution ne soit pas égal à zéro.

Le fait de demander « A quelles forces est soumise » laisse entendre que les forces existent⁸². C'est le statut des concepts qui est en cause dans cette formulation. Nous essayons à tort de convaincre les étudiants de l'existence quasi matérielle des concepts. Il me semble plus convaincant de changer de méthode et de tenter de leur montrer la nature de leur fonction et leur utilité pour prévoir l'évolution d'une situation. Cela passe par une modification de la formulation des questions :

⁸¹ Voir annexe 6.

⁸² Comme je l'ai signalé au chapitre 2.

Quels sont les objets qui exercent une force sur la boule ? Décrire le mouvement de la boule dans le référentiel «Terre » puis dans le référentiel «manège ». Insistons : la formulation référentiel «Terre », et non le référentiel de la Terre, correspond au fait que ce sont les objets Terre et manège qui constituent successivement les référentiels.

Quel est le poids apparent de la masse⁸³ ?

N'insistons pas plus longuement sur le conflit entre les concepts de poids et de masse, que cette formulation met clairement en évidence. N'aurait-il pas fallu demander : *Quel est le poids apparent de la boule ?*

L'utilisation du mot poids présente un certain nombre de difficultés supplémentaires ;

- **Une difficulté d'ordre sémantique : le fait de parler du poids d'un objet laisse entendre que le poids caractérise l'objet, alors qu'il désigne la force que la Terre exerce sur l'objet, c'est-à-dire quelque chose qui se passe entre la Terre et l'objet.**
- **Autre difficulté : dans cet exercice, que désigne le poids ?**
 - **Est-ce la force que la Terre exerce sur l'objet, cas le plus habituel ?**
 - **Est-ce l'indication d'un pèse-personne ? Au quel cas l'indication n'est pas «apparente ».**

Écrire les conditions d'équilibre.

Équilibre de quoi ? L'expression «les conditions d'équilibre » n'est pas, une fois de plus, suivie de la désignation des objets concernés. L'équilibre semble exister en soi. L'étudiant doit choisir s'il s'agit des conditions d'équilibre du fil ou de la boule ?

En particulier, donner l'équation déterminant l'angle θ en fonction de ω .

D'une façon générale, les guidages sont fournis afin que les étudiants puissent faire les calculs. Les guidages sont d'autant plus nécessaires que l'objectif de l'exercice n'est pas formulé et que l'étudiant ne sait pas à quoi servent les calculs demandés⁸⁴. Au lieu de cela, il vaudrait mieux expliciter l'objectif des calculs :

L'angle θ est d'autant plus grand que le manège tourne plus vite. Établissez une relation entre θ et ω

⁸³ Je veux exprimer mon profond respect à la collègue qui a participé à la rédaction du texte et qui a accepté mes remarques en riant de l'énormité de ce qui avait été écrit. Elle a réagi de façon particulièrement positive contrairement à d'autres qui ont refusé de les admettre tellement ils s'étaient sentis mortifiés.

⁸⁴ Je n'ai jamais assisté à une réunion pédagogique où un enseignant ne se plaigne du fait que : « les étudiants ne savent pas calculer ». Je n'ai cessé de proclamer que, surtout, ils ne savaient pas ce qu'ils devaient calculer.

Ainsi les étudiants peuvent-ils comprendre qu'il s'agit de prévoir comment varie la position d'équilibre du fil caractérisée par son angle θ avec la verticale lorsque l'expérimentateur modifie la vitesse de rotation du manège caractérisée par son angle ω .

Donner une solution graphique de cette équation.

Cette verbalisation atteste l'analyse déjà faite. Nous constatons, une fois de plus, la fréquence de l'utilisation du verbe « donner » dans les questions ; il est à la fois polysémique et impropre. En fait, nous demandons d'effectuer une action qui peut s'exprimer par un verbe ; rappeler une loi, établir une relation, calculer une valeur etc.

Trouvez la solution de l'équation obtenue par une méthode graphique.

Une formulation de question utilisant un verbe d'action aide l'étudiant en l'engageant dans une activité qu'il peut identifier.

Montrer que la solution est acceptable sous la condition $\omega^2(d+1) \ll g$.

Comment un étudiant peut-il répondre ? Il faut impérativement préciser le degré de précision exigée pour répondre.

Proposition de texte modifié

Un moteur entraîne un manège. Nous supposons que sa vitesse angulaire de rotation ω est constante et égale à ω_0 .

Un pendule simple est constitué par une boule de masse m attachée à une extrémité d'un fil de longueur l dont l'autre extrémité est accrochée au plafond du manège. Le point de fixation du fil se trouve à la distance d de l'axe de rotation du manège.

Un observateur situé sur le manège constate que le fil du pendule s'écarte de la verticale d'un angle θ et s'immobilise pour un angle θ_0 .

1) *Quels sont les objets qui exercent une force sur la boule ? Décrire le mouvement de la boule dans le référentiel « Terre » puis dans le référentiel « manège ».*

2) *L'expérience montre que le pendule s'écarte d'autant plus que le manège tourne plus vite. Établissez une relation entre θ et ω*

3) *Trouvez par une méthode graphique la solution de l'équation obtenue.*

Il est très difficile de se défaire des habitudes acquises. Chaque relecture apportant des modifications non négligeables, le texte proposé n'a absolument pas la prétention d'être un modèle de perfection. Il s'agit simplement de montrer comment procéder pour traquer les expressions impropres et comment progresser dans la rédaction des textes d'exercices en évitant la langue de bois des physiciens, tout en ayant une conscience aigüe du fait que la perfection est impossible à atteindre. Il s'agit de chercher les moyens de permettre aux étudiants d'avoir une chance de répondre aux questions de façon satisfaisante.

Il me semble que revenir aux objets et aux forces qu'ils exercent entre eux et aux lois exprimées dans un référentiel absolu suffit pour prévoir l'évolution des situations. S'en tenir là simplifie considérablement le travail des étudiants tout en leur assurant des bases de connaissances solides et des méthodes de travail efficaces.

Annexe 10 Questionnaires et questions

J'ai fait des conférences sur la méthodologie des questionnaires au DEA de didactique. Une partie était technique : j'analysais différents types de questionnaires. Ce travail se retrouve résumé en une phrase très elliptique dans le chapitre 5 où je dis que les questionnaires n'ont jamais créé d'informations nouvelles. Raison ontologique : il est impossible de concevoir des questions sur ce qu'on ignore. Les questionnaires permettent seulement de fournir des statistiques au sujet des réponses aux idées préconçues de ceux qui les formulent. Comme il n'est pas facile de percevoir la nature de ses propres préjugés, j'avais choisi un exemple savoureux concernant les américains.

Un article de Margaret Mead and Rhoda Métraux⁸⁵ ayant pour titre : « *Image of the scientist among high-school students* » relate une étude faite sur 120 écoles pour déterminer l'image que les étudiants se font du scientifique. Étant donné que très peu de filles faisaient des études scientifiques à cette époque là, les questions s'adressant aux garçons et aux filles étaient formulées de façon différente :

If you are a *boy*, complete the following statement in your own words.

If I were going to be a scientist, I should like to be the kind of scientist who...

If you are a *girl*, complete the following statement in your own words.

If I were going to marry a scientist, I should like to marry the kind of scientist who...

Traduction :

Si vous étiez un *garçon*, complétez la phrase suivante en vos propres termes.

Si je devais devenir un scientifique, j'aimerais être une sorte de scientifique qui...

Si vous étiez une *fille*, complétez la phrase suivante en vos propres termes.

Si je devais épouser un scientifique, j'aimerais épouser une sorte de scientifique qui...

J'ai en effet constaté, lorsque j'étais allée à un congrès sur les accélérateurs de particules à Boston en 1963, qu'il n'y avait que trois femmes sur cinq cents participants, et elles étaient européennes ! Cet exemple montre comment l'idéologie s'introduit insidieusement dans la rédaction d'un questionnaire, en France nous ne distinguerions pas les questions s'adressant aux filles ou aux garçons.

Le caractère tendancieux d'un questionnaire se manifeste aussi particulièrement bien dans l'exemple suivant. Année 1974 Section de Psychosociologie 106 A

A l'égard de l'immigration étrangère République française 1065

Ministère du travail, de l'emploi et de la population

Institut national d'études démographiques

27, rue du Commandeur. 75675 Paris Cedex tél. 336 44 45

- **Question 6c** Est-ce que la présence de ces enfants étrangers provoque des difficultés ?

⁸⁵ Science. VOL. 126. Août 1957. page 384.

- **Question 6d** (Si oui à 6c) Quelles difficultés par exemple ?

Il n'est évidemment nulle part question de savoir si la présence des étrangers enrichit ou non la culture des français !

Les mentalités évoluent. Il semble que les nouveaux économistes posent des questions pertinentes. Suzanne Berger et son équipe de chercheurs ont enquêté sur le terrain pour fournir une description des processus de mondialisation différente de celle qui est paresseusement diffusée sur les medias :

« Dans les pages qui suivent, on se posera une autre question: toutes les entreprises réagissent-elles de la même façon à ces changements fondamentaux ? Et, si oui, est-ce par nécessité ?

Notre équipe a voulu savoir si les entreprises opérant dans le même secteur et sur le même marché prenaient les mêmes décisions quant aux fonctions qu'elles doivent conserver et celles qu'elles doivent externaliser. Nous avons donc étudié les réponses reçues lors des interviews réalisées dans 500 firmes d'Extrême-Orient, d'Amérique et d'Europe⁸⁶.

Annexe 11 Lexique

Voici un lexique qui regroupe quelques définitions et quelques mots pièges et expressions codées. Il ne s'agit pas d'instaurer un langage correct et d'éliminer toutes les expressions qui sont ancrées dans les habitudes, il s'agit seulement d'attirer l'attention sur les idées trompeuses qui sont générées sans que les enseignants en aient conscience. Pour les éviter il est nécessaire de comprendre et de s'appropriier l'ensemble du modèle de la démarche expérimentale. Cela d'ailleurs ne suffit pas, j'ai pu constater que je n'y parviens pas toujours ; à la relecture j'ai encore trouvé des exemples de ce que je fustige par ailleurs.

Dans ce lexique ont été rassemblés :

- des mots et expressions utiles à la compréhension des solutions de problèmes;
- des mots pièges qui traduisent des idées reçues plus ou moins contestables.

Assimilable à un point

Dire qu'un objet est assimilable à un point participe à la modélisation d'une situation matérielle. Cela signifie par exemple qu'il est possible de représenter l'objet par un point, et ceci même s'il est aussi grand qu'une planète.

Caractéristiques d'un objet

Un objet peut être décrit par un ensemble de caractéristiques telles que : sa taille, son volume, sa masse, sa charge, sa vitesse, son accélération etc.

Calcul d'erreur

⁸⁶ S. Berger, *Made in monde*, Seuil. 2006. p. 177.

Expression désuète qui a une connotation culpabilisante. L'expérimentateur se sent mis en cause et coupable d'avoir mal manipulé. Les "erreurs" sont d'origines diverses, il faut apprendre à en reconnaître les causes pour pouvoir, autant que possible, les éliminer. Cependant il existe des « erreurs » résiduelles liées aux fluctuations intrinsèques des grandeurs mesurées ce qui provoque une dispersion inévitable⁸⁷. Les calculs d'erreur sont, en fait, l'évaluation la plus pessimiste de la dispersion. C'est une méthode très utile quand on ne veut pas trop se casser la tête. Cette façon de procéder a été très fructueuse pendant des siècles.

L'expression : "[estimation de la dispersion](#)" qui repose sur des théories du traitement statistique remplacera avantageusement l'expression: "calcul d'erreur".

Conservation

Nous disons « la conservation de l'énergie » ou « de la masse » etc. pour dire que, dans les circonstances précisées, l'énergie (ou la masse) d'un système isolé ou fermé, est constante.

Déterminer la valeur d'une grandeur

En mathématiques cela signifie trouver un nombre par exemple «déterminer les racines d'une équation ». Ce mot évoque une notion d'exactitude parfaite. En physique, on trouve souvent cette expression. Elle est soit le résultat d'un calcul résultant d'une modélisation, soit le résultat d'une mesure. D'une manière ou d'une autre, nous n'obtenons jamais une valeur avec une précision infinie, nous ne pouvons fournir qu'une [estimation de grandeur à la dispersion près](#), même si la dispersion est très petite par rapport à la valeur mesurée.

La valeur recherchée étant ontologiquement inaccessible, elle ne peut qu'être estimée. Le degré de précision de l'estimation de la valeur dépend de l'étendue de la dispersion.

La dispersion des valeurs mesurées caractérise le dispositif expérimental. D'une façon générale, c'est l'objectif qui détermine le prix et les efforts consentis pour diminuer la dispersion. Le choix résulte d'une négociation.

Être

[Il faut éviter de confondre verbalement les objets et leur représentation](#) ainsi que les grandeurs physiques et leur expression mathématique etc.⁸⁸ Aussi faut-il se méfier de l'utilisation du verbe « être » là où il serait plus correct de dire «[désigne](#) » ou «[représente](#) ». Exemple « la force est » au lieu de « l'expression de la force est ». Évidemment la rigueur verbale entraîne un alourdissement regrettable de l'expression mais une question se pose : [devons-nous simplifier le langage au point de le rendre incompréhensible ou devons-nous faire l'effort de nous exprimer de façon plus précise ?](#)

Expérimentateur

⁸⁷ Voir le chapitre 5.

⁸⁸ Ce que Magritte avait parfaitement compris : « ceci n'est pas une pipe » écrit-il dans un tableau représentant de façon très réaliste une pipe.

Contrairement à l'opérateur qui effectue des actes qui ne sont réalisables que par la pensée, l'expérimentateur désigne un être humain qui agit sur le monde environnant ; celui qui conçoit et monte des expériences, les déclenche etc.

Grand, petit

Dans un exercice élaboré par Yvan Simon, il est précisé que le volume d'un aérostat augmente de 130 m³, ce qui peut paraître grand. Or par rapport au volume du ballon, qui est de 5000 m³, c'est petit. Il ne faut pas se laisser piéger :

Une valeur n'est jamais grande ou petite en soi, mais par rapport à une autre.

Grandeurs physiques

La masse, la longueur, le temps et le courant sont des grandeurs physiques fondamentales. L'énergie, la quantité de mouvement, la force, la charge, la tension, l'entropie, la température sont toutes des grandeurs physiques qui en découlent. Elles sont pratiquement impossible à définir en tant que telles ; bien malin celui qui peut dire ce « qu'est » la tension par exemple. En fait, comme nous l'avons vu⁸⁹, les définir n'a pas beaucoup de sens. Par contre il est tout à fait possible de les traiter pour ce qu'elles sont : des entités théoriques, construites comme des outils de la pensée, permettant de décrire et de caractériser les situations expérimentales afin de pouvoir en décrire l'évolution.

Rappelons que :

Les grandeurs physiques⁹⁰ sont définies par leur mesure, caractérisées par leurs propriétés et justifiées par leur fonctionnalité.

Langage mathématique

Il faudrait s'interroger sur la fréquence de l'utilisation du vocabulaire mathématique dans les problèmes de physique. Ne serait-il pas la conséquence de la part excessive donnée au formalisme de l'enseignement de la physique ? En mathématique les mots correspondent à des concepts dont le rôle est bien précis ; qu'en reste-il lorsqu'ils sont transposés en physique ?

Je crois avoir démontré au cours de l'ouvrage que les emprunts des physiciens au langage mathématique font obstacle à l'élaboration des entités spécifiques à la physique. Cependant l'usage des concepts mathématiques est tellement ancré dans les pratiques qu'il est utopique de tenter de l'abolir, au moins pouvons nous attirer l'attention sur leur nocivité. Par exemple :

1. **Équation.** En physique les équations pourraient être plus précisément dénommées : relation entre grandeurs physiques.
2. **Le plan.** De nombreux exercices parlent de plan incliné « sans frottement », comme si un plan, objet mathématique, ontologiquement parfait, pouvait être rugueux ! Le plan ne doit-il pas être considéré comme une modélisation d'un support,

⁸⁹ Voir chapitre 2.

⁹⁰ Voir Chapitre 1.

(table, planche) qui serait par essence dépourvu de frottement ? Combien de textes font-ils référence au « plan sans frottement » sans que l'auteur perçoive la tautologie ?

3. Le Théorème : je n'ai pas trouvé ce que pouvait être son statut en physique, cependant « on » parle couramment du « théorème des énergies cinétiques ».

4. Variable. Nous lisons souvent « variable » au lieu de « grandeur physique », bien que plus longue à dire et à écrire, je préfère cette dernière expression. En effet une grandeur physique peut varier mais, en plus, elle peut avoir une valeur caractérisant un état, ce que ne fait pas une « variable » !

Loi empirique

Ce sont des relations entre grandeurs physiques qui n'ont pas de fondement théorique simple elles sont donc établies expérimentalement. Exemple : la relation entre la valeur de l'allongement d'un ressort à boudin et l'intensité de la force qui lui est appliquée par un expérimentateur pour le maintenir dans une position d'équilibre.

Mobile

« Un point mobile », exemple type de la langue spécifique du physicien pour désigner un objet, assimilable à un point, qui se déplace. Elle a le mérite de la concision !

Modèle

Un modèle est une représentation simplifiée d'un objet, d'un dispositif ou d'une situation. Il est donc toujours approximatif. Par exemple, nous négligeons la viscosité de l'eau qui coule dans les canalisations pour décrire le fonctionnement d'un siphon. Les caractéristiques des modèles utilisés ont des valeurs que l'auteur des problèmes donne pour pouvoir décrire le fonctionnement d'un dispositif ou prévoir son évolution. Ces valeurs sont souvent arbitraires mais doivent être vraisemblables ; seul leur ordre de grandeur a un sens et la précision des calculs doit être ajustée à l'objectif poursuivi.

Une situation matérielle est « modélisable » s'il est possible de la conceptualiser en trouvant des grandeurs pertinentes permettant de répondre aux questions que l'on se pose à son sujet.

Mettre en évidence

Expression qui donne à penser que la physique, c'est très simple et qu'il suffit d'observer pour voir et de calculer pour savoir. En fait la mise en évidence expérimentale d'une loi de la nature nécessite de grands efforts, elle est souvent loin d'être évidente! Quant à la mise en évidence des forces et autres grandeurs physiques, elle relève de l'utopie. Personne n'a jamais vu une idée se promener dans la campagne !

« On »

L'utilisation du pronom indéfini « on » est ancrée dans les usages. Pourtant il ne désigne jamais le même groupe de personnes. Dans « on considère » « on tracera » « on trouve » etc., ce sont tantôt les professeurs, la communauté scientifique ou l'étudiant qui sont évoqués. Je préconise plutôt de spécifier ceux qui sont en cause : « Nous » désigne les auteurs, les

«physiciens » désignent la communauté des scientifiques, quant aux étudiants je pense qu'il vaut mieux expliciter les actions que nous leur demandons en les exprimant à l'aide de verbes à la deuxième personne du pluriel. Traditionnellement les questions respectent une pseudo neutralité à l'aide de verbes utilisés à l'infinitif même lorsqu'il s'agit d'une activité que l'étudiant doit accomplir.

« On considère »

C'est une expression que l'étudiant trouve très souvent en début d'exercice. Le verbe « considérer » cache une activité de modélisation essentielle du physicien. Passer d'une situation matérielle à sa réduction à des éléments pertinents pour répondre aux questions que nous nous posons consiste à la modéliser. Cela entraîne des approximations dont il faut justifier la légitimité.

Opérateur

Il désigne une entité, abstraction d'homme, capable d'effectuer des opérations par la pensée. Ainsi parvient-il à déplacer les objets de façon *quasistatique*, c'est-à-dire sans leur communiquer de vitesse. Est-ce bien raisonnable ? Il est permis d'en douter, mais le fait est que les raisonnements qui le mettent en jeu sont utiles ! Le mot opérateur sert donc à désigner une conceptualisation de l'expérimentateur.

Opération par la pensée

C'est une vue de l'esprit, qui correspond à une action idéale limite qui n'est réalisable que par un opérateur, comme déplacer un objet dans un espace vide par exemple.

Ordres de grandeur

Le calcul des ordres de grandeur est, avec la modélisation, une des activités les plus fréquentes du physicien dont nous trouvons rarement l'écho dans l'enseignement. Il faut pourtant les connaître pour hiérarchiser les phénomènes et représenter les situations. Comment pourrions-nous construire des systèmes isolés sans en tenir compte ? Pourquoi ne tenons-nous pas compte de la force de gravitation qui existe entre le proton du noyau d'un atome d'hydrogène et son électron périphérique ? Les exemples sont multiples.

Rappelons-le encore une fois :

Il n'y a pas de physique sans ordres de grandeur.

Points de mesure

Les “ points ” de mesure sont, en fait des « taches » de mesure⁹¹. Le point représente la valeur mesurée, la tache qui l'entoure représente la dispersion. La tache indique la zone où l'expérimentateur a la plus grande probabilité de trouver la valeur qu'il cherche.

Quasistatique

⁹¹ Voir chapitre 2 la figure 3 et le document de recherche « Que mesure-t-on ? sur le site :

<http://www.courville.org/mediawiki/index.php/Brenasin>

Se dit d'une transformation théorique au cours de laquelle les systèmes évoluent en passant par une succession d'états d'équilibre ; les objets sont déplacés sans acquérir de vitesse. C'est, évidemment, une vue de l'esprit, une opération par la pensée. Cette transformation est réalisée par un opérateur qui est une autre vue de l'esprit, mais cette façon de raisonner permet de répondre aux questions que nous nous posons sur le monde matériel.

Raccourcis

Ce sont des façons rapides de s'exprimer qui ne respectent pas le statut des entités utilisées mais qui font partie du langage habituel ; il faut savoir les décoder et traduire pour élaborer une pensée argumentée.

1. La masse m est une des caractéristiques des objets, mais on dit souvent que l'on «déplace une masse m », ce qui est, il faut le reconnaître, plus rapide et moins lourd que dire «on déplace un objet de masse m ».

2. Le poids

Les enseignants puis les étudiants utilisent souvent l'expression « le poids d'un objet » ce qui laisse entendre que le poids appartiendrait à l'objet dont il serait une des caractéristiques. Or le poids désigne la force que la Terre exerce sur l'objet ; il caractérise donc une interaction ; ce qui se passe entre la Terre et l'objet.

3. **Une masse m se déplace dans le champ de pesanteur.** Une masse est une caractéristique d'objet, le champ de pesanteur une idée, un concept, une grandeur physique. Traduction : un objet de masse m tombe près de la Terre.

Ressort sans masse

Les ressorts dits « sans masse » sont caractérisés uniquement par leur raideur k et sont supposés avoir une masse nulle. Évidemment ils ne correspondent pas à un objet matériel précis ; ce sont des objets conceptuels comme il en existe tant (le condensateur parfait ou le générateur parfait, la diode parfaite etc.) qui ont des caractéristiques particulières. Ce sont des constructions intellectuelles qui permettent de sérier les difficultés à résoudre.

Système

Il est constitué par un ou plusieurs objets ayant un rôle particulier.

Système isolé

Il est constitué par un ensemble d'objets considérés comme seuls au monde. Comme, manifestement, il n'existe aucun système véritablement isolé, c'est avant tout, une fructueuse construction de l'esprit. Elle est plus facilement recevable lorsque que les systèmes dits « isolés » sont construits en montrant que l'influence des objets extérieurs au système est négligeable pour résoudre le problème que l'on se pose.

Temps

Le même mot désigne plusieurs concepts différents, la [date](#) et la [durée](#) et le [temps](#) celui qui passe inexorablement. Notons que la date et la durée sont mesurées par le même

nombre lorsqu'on prend la précaution de prendre l'origine des temps au moment où l'expérimentateur déclenche le chronomètre qui mesure des durées.

Travail moteur, travail résistant

Concepts ambigus donc inutile.

Vérifier une loi⁹²

Tout ce qu'une expérience et/ou un raisonnement peuvent montrer de façon certaine, c'est qu'une loi hypothétique est fausse. **Il est impossible, sauf par abus de langage, de prétendre vérifier une loi.** Nous pouvons seulement **montrer expérimentalement qu'une loi est plausible.** Comme, par ailleurs, les lois ont démontré leur efficacité (ne serait ce que par les nombreuses applications techniques), c'est tout un ensemble de démarches qui, en fait, les valide.

Il est difficile de corriger les habitudes qui permettent de s'exprimer rapidement, c'est probablement pourquoi l'utilisation de l'expression " vérification des lois " est si fréquente.

Vecteur vitesse

Un objet qui se déplace est caractérisé, entre autres, par sa vitesse, laquelle est définie par 3 grandeurs : son intensité, sa direction et son sens. Il se trouve que le vecteur est l'objet mathématique qui est caractérisé exactement par ces 3 grandeurs. C'est pourquoi le vecteur est le concept mathématique le mieux adapté pour représenter la grandeur physique vitesse. Parler constamment, comme c'est l'habitude de le faire, de vecteur vitesse confère une place exagérée à la représentation mathématique de la vitesse au détriment de ses propriétés intrinsèques. Pour être cohérent, adopter cette façon de s'exprimer devrait nous contraindre à la généraliser et à parler de « scalaire masse », de « scalaire énergie » etc. Essayons de simplifier et de parler de la vitesse tout court.

⁹² Voir chapitre 1.

SOMMAIRE

ANNEXES	1
Présentation	1
Description	1
ANNEXE 1 LES LOIS DE NEWTON	2
Énoncé de la loi des actions réciproques ou encore : Principe de l'action et de la réaction	3
Énoncé traditionnel de la loi fondamentale de la dynamique	3
Nouvel énoncé de la loi fondamentale de la dynamique	4
Comment reconnaît-on un référentiel galiléen ?	4
Procédure d'utilisation de la loi fondamentale de la dynamique :	4
Le test du pouce	5
ANNEXE 2 LE TRAVAIL	8
La fonction du travail :	8
Définition traditionnelle : travail « d'une force »	8
Critique de la définition traditionnelle	9
Nouvelle définition du travail élémentaire	10
ANNEXE 3 PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE L'ENERGIE	11
Énoncé traditionnel :	11
Nouvel énoncé du principe de conservation de l'énergie	11
Procédure d'utilisation :	11
L'énergie cinétique	13
Nouvelle définition de l'énergie potentielle	13

L'énergie totale d'un système	14
ANNEXE 4 COMMENT REDIGER ET RESOUDRE UN PROBLEME	14
Exercice 1 ; Travail fourni au cours d'une compression	14
Caractéristiques du texte :	15
Résolution d'exercice : exemple d'argumentation	15
Exercice 2 : Poussée d'Archimède	20
Solution	21
Comment argumenter la solution d'un problème ?	23
ANNEXE 5 TABLE DES CONSTANTES	24
Valeurs des constantes utiles à la résolution des problèmes	24
ANNEXE 6 LES ORDRES DE GRANDEURS	25
Avec quelle approximation pouvons-nous "considérer" que la Terre peut constituer un repère galiléen?	25
1) La Terre tournant sur elle-même peut-elle être « considérée » comme un repère galiléen ?	26
2) La Terre tourne autour du soleil	29
3) Rotation de la Terre	29
Pseudo force	30
Approximations au voisinage de la Terre	30
Comparaison des ordres de grandeur des forces	32
Comparaison entre les forces de gravitation et les forces électriques	34
Nombre d'Avogadro	34
Force d'interaction gravitationnelle : distribution linéique de la masse	34
Exercice préliminaire de principe	36
Exercice fondé sur l'expérience de Millikan	37
Exercices de contrôle	38
Commentaires	38
Comparaison du texte précédent avec un exercice classique	40
Texte original anonyme :	40

ANNEXE 8 COMMENT FAIRE LA DIFFERENCE ENTRE UN EXERCICE DE PHYSIQUE ET UN EXERCICE DE SCIENCE FICTION ?	43
Texte original :	44
Commentaires	44
ANNEXE 9 COMMENT FAIRE EVOLUER LES TEXTES DES EXERCICES ?	
LE MANEGE	45
Manège	45
Texte original :	45
Analyse du texte	46
Description des questions	48
Proposition de texte modifié	50
ANNEXE 10 QUESTIONNAIRES ET QUESTIONS	51
ANNEXE 11 LEXIQUE	52