

Le poids de l'Histoire sur la Physique

Quelques propositions
pour un enseignement plus efficace



FRIEDRICH HERRMANN ET GEORG JOB

Note à l'attention du lecteur

Nous avons choisi une pagination comportant une page par thème. L'avantage est de faciliter la mise à jour du texte en conservant la place des figures, tableaux et équations.

Sur le fond, il est possible que certains sujets particuliers, ici mis en avant, soient parfois liés à une tradition d'enseignement propre à un pays. Pour ces quelques thèmes, leur enseignement peut donc différer d'une tradition à une autre...

Friedrich Herrmann et Georg Job

Le poids de l'Histoire sur la Physique

Illustrations : *Friedrich Herrmann*
Tradition de l'allemand vers l'anglais : *Friedrich Herrmann*
Tradition de l'anglais vers le français : *Antoine Archer,*
Jean-François Combes,
Alain Xémard



[Ce travail est réalisé sous la license Creative Commons Attribution – Pas d'utilisation commerciale – Partage dans les mêmes conditions 3.0 non transposé](#)

Introduction

Le programme scolaire actuel en sciences est le résultat d'un processus d'évolution. Il reflète le processus de développement avec de grands détails. Ceux qui apprennent les sciences ont à suivre un cheminement qui est très similaire au déroulement du développement historique. Ils doivent prendre des détours, surmonter des obstacles inutiles et reproduire des erreurs historiques. Ils doivent apprendre des concepts inappropriés et employer des méthodes dépassées. En développant le *Cours de Physique de Karlsruhe* nous avons essayé d'éliminer de tels concepts et méthodes obsolètes.

Dans l'histoire des sciences il est arrivé à maintes reprises que des travaux et des résultats importants ne soient pas acceptés par la communauté scientifique. Quand ils le furent, il était trop tard. Un changement, – même s'il aurait pu être extrêmement utile – serait devenu trop fastidieux. En voici trois exemples :

1. La grandeur physique entropie eut trois chances de devenir une grandeur facile à saisir, même pour un débutant : la première chance se présenta après les travaux de Joseph Black et de Sadi Carnot, la seconde après le travail de H. L. Callendar et la troisième à travers le livre *A new concept of thermodynamics* de Georg Job. Toutes ces chances furent délaissées. Les idées correspondantes ont été interprétées de manière incorrecte ou simplement ignorées.

2. La grandeur physique force, avec sa propre terminologie – une construction sophistiquée de Newton – s'est révélée être l'intensité du courant de quantité de mouvement. La publication de Max Planck en 1908 traitant de ce sujet passa pratiquement inaperçue.

3. Dans les 50 premières années suivant l'introduction de l'énergie en physique, il n'était pas clair que l'énergie obéissait à un principe de conservation locale. Cela était attendu mais non prouvé. Pour cette raison une terminologie vint en usage qui tenait compte de ces doutes. La publication en 1898 de Gustav Mie, dans laquelle il est montré que l'énergie obéit à une équation de continuité n'amena pas un langage plus approprié et simple. Nous parlons encore d'énergie comme si nous devions être préparés à ce qu'un jour les actions à distance puissent être découvertes.

En un certain sens, la croissance du savoir scientifique est similaire à l'évolution des systèmes biologiques. Chaque personne qui enseigne la science a acquis son savoir scientifique avant. Ainsi, les faits sont d'abord reçus et ensuite transmis. Cette transmission, cependant, ne procède pas sans changement, parce que la recherche apporte de nouveaux résultats et l'enseignant essaiera de prendre en compte ces résultats. De tels changements peuvent être comparés aux mutations en génétique.

Généralement, les changements et les améliorations qu'un enseignant réalise concernent seulement sa spécialité, tandis que la structure générale de la science sera transmise sans altération. Ainsi, le savoir de base n'est pas soumis à la même pression sélective que des développements plus récents. Par conséquent, le nouveau savoir est essentiellement rattaché à l'ancien sans remettre en doute le vieux noyau. Dans la théorie de l'évolution ce phénomène est connu sous le terme *prolongation*. Une restructuration plus grande sera de plus en plus difficile, alors que l'élément moteur pour de tels changements deviendra de plus en plus faible. En d'autres termes : plus un système est complexe, plus il sera conservateur. Pour cette raison, le savoir scientifique reflète tout à fait précisément son développement historique. Cet énoncé nous rappelle une règle que tout étudiant de biologie a à apprendre : la loi biogénétique de E. Haeckel selon laquelle "l'ontogenèse résume la phylogenèse".

En conséquence, des détours dans le développement du savoir scientifique peuvent être préservés. Des constructions qui, dans un contexte plus large, se révèlent être superflues ou inappropriées peuvent être maintenues. Un vieil état transitoire peut survivre comme un *fossile vivant* comme les généticiens aiment à appeler un tel phénomène. Même des erreurs peuvent survivre. En considérant le programme actuel de physique, on peut apprendre beaucoup sur l'histoire de la physique. En effet, on peut même effectuer de cette manière une sorte d'archéologie. Comme conséquence, chaque étudiant doit reproduire les développements historiques. Le processus individuel d'apprentissage de l'étudiant procède, souvent jusque dans les détails, selon le même schéma que le développement de la science dans son ensemble.

En faisant l'analogie entre l'évolution de la science et celui des systèmes biologiques, nous voulons montrer que le développement de la science vers de plus en plus d'inflexibilité est un processus inévitable et normal et que ce n'est pas une accusation audacieuse de dire que la science est inutilement compliquée et tortueuse. Lorsque nous prétendons que la science, dans l'ensemble, est mal en point, nous ne voulons pas dire que les scientifiques ont été incompetents. Ceux qui ont travaillé pour l'avancement de la science firent généralement ce qu'il fallait faire à leur époque. Tout comme une espèce fossile à une époque éloignée a pu jouer un rôle important, beaucoup de constituants de la science, qui de nos jours peuvent être considérés comme superflus ou inopportuns, ont joué un rôle indispensable dans le passé.

Pendant de nombreuses années, nous avons cherché systématiquement des sujets dans le programme de physique qui pourraient être considérés comme des fardeaux historiques, c'est-à-dire des sujets superflus ou présentés de manière inappropriée. Depuis 1994 ils apparaissent régulièrement sous la forme d'une rubrique de la revue consacrée à l'enseignement scientifique *Praxis der Naturwissenschaften*.

Pour découvrir de tels concepts obsolètes une certaine attitude est requise, qui pourrait être considérée comme un manque de respect. En effet, c'est une forme d'irrespect face aux convictions qui ne se sont développées que par simple habitude et indolence. Ce n'est cependant pas un manque de respect aux réalisations des hommes de science qui ont les premiers développé une idée nouvelle.

Chacun des articles est structuré de la même manière. D'abord, nous introduisons le *sujet*. Puis nous décrivons ce que nous croyons être le caractère inopportun ou obsolète du sujet : le *défaut*. Ensuite, nous expliquons brièvement comment le sujet est apparu, c'est-à-dire quel fut le rôle positif qu'il a joué dans le passé : l'*origine*. Et enfin quelques propositions sont formulées pour faire face au problème : le *remède*.

F. Herrmann et G. Job: [The historical burden on scientific knowledge](#), Eur. J. Phys. **17** (1996), page 159

Friedrich Herrmann, Institut de Technologie de Karlsruhe

Georg Job, Université de Hambourg

SOMMAIRE

Introduction

1 Sujets généraux

- 1.1 Terminologie technique
- 1.2 Interaction
- 1.3 Montre à quartz et compteur Geiger
- 1.4 Précision de mesure
- 1.5 Relations linéaires
- 1.6 Intégrales de mouvement
- 1.7 Lois de conservation
- 1.8 Des particules partout
- 1.9 Ether et vide
- 1.10 Deux effets d'une force et trois effets d'un courant électrique

2 Énergie

- 2.1 Formes d'énergie
- 2.2 Énergie pure
- 2.3 Puissance
- 2.4 La loi de conservation de l'énergie
- 2.5 Où est l'énergie?
- 2.6 L'énergie potentielle
- 2.7 Mouvement perpétuel et loi de conservation de l'énergie
- 2.8 Systèmes isolés

3 Électricité et magnétisme

- 3.1 Excès et défaut d'électrons électricité
- 3.2 Deux types de charges électriques
- 3.3 La notation conventionnelle du courant
- 3.4 Le courant et son article
- 3.5 Charge test
- 3.6 Où est le champ?
- 3.7 La courbe d'hystérésis
- 3.8 Le champ vu comme une région de l'espace munie de propriétés
- 3.9 L'antenne dipôle
- 3.10 La loi de Lenz
- 3.11 L'électroaimant
- 3.12 Pôles magnétiques
- 3.13 Le champ des aimants permanents
- 3.14 Surfaces équipotentielles
- 3.15 Inductance
- 3.16 Pôles magnétiques d'un solénoïde
- 3.17 Champ de fuite du transformateur
- 3.18 Champs de force
- 3.19 Deux phénomènes d'induction électromagnétique
- 3.20 Champs de vecteur conservatifs
- 3.21 Force électromotrice induite
- 3.22 Courants de Foucault
- 3.23 Perméabilité
- 3.24 Étincelle et rayonnement électromagnétique
- 3.25 Contrainte mécanique à l'intérieur d'un champ électrique et d'un champ magnétique
- 3.26 Fermeture des lignes du champ B

4 Thermodynamique

- 4.1 Mécanique et thermodynamique
- 4.2 Variables d'état
- 4.3 Les noms de la loi d'état des gaz parfaits
- 4.4 Échelles de température préliminaires
- 4.5 Dilatation thermique des liquides et des solides
- 4.6 Quantité de chaleur et capacité calorifique
- 4.7 Transfert de chaleur
- 4.8 L'équivalence de la chaleur et du travail
- 4.9 Énergie thermique
- 4.10 Énergie interne et chaleur
- 4.11 Énergie disponible
- 4.12 La tendance vers le minimum d'énergie
- 4.13 Entropie
- 4.14 Mesurer l'entropie
- 4.15 Qu'est-ce que l'énergie en réalité? Qu'est-ce que l'entropie en réalité?
- 4.16 L'entropie en tant que mesure de l'irréversibilité
- 4.17 Entropie négative
- 4.18 L'entropie et la vie
- 4.19 Le cycle de Carnot
- 4.20 Le rendement de Carnot
- 4.21 Rendement et facteur de Carnot
- 4.22 Le principe Zéro de la thermodynamique
- 4.23 Le troisième principe
- 4.24 Microscopique – macroscopique
- 4.25 Température et énergie cinétique des particules
- 4.26 Entropie de mélange
- 4.27 La distribution de vitesse de Maxwell
- 4.28 Évaporation et ébullition
- 4.29 Climat océanique et capacité thermique de l'eau
- 4.30 Le transport de chaleur à travers l'atmosphère
- 4.31 Étoiles filantes et capsules spatiales
- 4.32 Rayonnement thermique
- 4.33 Soleil et lampes à décharge

5 Mécanique

- 5.1 Vitesse instantanée et vitesse moyenne
- 5.2 Accélération
- 5.3 Actions à distance
- 5.4 Les lois de Newton
- 5.5 Équilibre statique et troisième loi de Newton
- 5.6 Espace absolu
- 5.7 La quantité de mouvement comme le produit de m et v
- 5.8 La quantité de mouvement sous-estimée
- 5.9 Impulsion
- 5.10 État de mouvement
- 5.11 Force musculaire
- 5.12 Force de rappel
- 5.13 Ligne d'action
- 5.14 Pression et force
- 5.15 Pression dynamique
- 5.16 Force et énergie
- 5.17 Poulies
- 5.18 Comment vole un avion
- 5.19 Conservation du moment cinétique

6 Relativité

- 6.1 L'équivalence masse-énergie
- 6.2 La façon d'écrire l'équation $E = mc^2$
- 6.3 Vitesse de la lumière et limite de vitesse
- 6.4 L'expérience de Michelson-Morley

7 Oscillations et ondes

- 7.1 Fréquence de résonance et fréquence naturelle
- 7.2 Oscillations forcées et différence de phase
- 7.3 Principe de Huygens
- 7.4 Diffraction par fente double et interférences lumineuses
- 7.5 Cohérence des ondes
- 7.6 Ondes électromagnétiques transverses
- 7.7 Lumière non polarisée

8 Physique atomique et quantique

- 8.1 Le concept de trajectoire en mécanique quantique
- 8.2 Illustrations de l'atome
- 8.3 L'atome vide
- 8.4 Couches électroniques
- 8.5 La fonction d'onde
- 8.6 Particules indiscernables
- 8.7 Photons et phonons

9 Physique du solide

- 9.1 La diode à semi-conducteurs en tant que redresseur
- 9.2 La diode à semi-conducteurs en tant que cellule solaire
- 9.3 Courant de champ et courant de diffusion
- 9.4 L'effet photoélectrique
- 9.5 Mesurer la constante de Planck grâce aux DELs

10 Physique nucléaire

- 10.1 Réactions nucléaires et radioactivité
- 10.2 Défaut de masse

11 Chimie

- 11.1 Processus physiques et chimiques
 - 11.2 Équilibre chimique
 - 11.3 Cellule électrochimique
-

1

Sujets généraux

1.1 Terminologie technique

Sujet :

“Terme technique...: une désignation bien définie, particulière à un concept bien défini dans un domaine technique particulier.” [1]

“La terminologie technique diffère du langage de tous les jours notamment (en autres choses) en cela que ses concepts sont dénommés de manière non ambiguë...” [2]

Défaut :

La terminologie technique est considérée comme un langage exact. Lorsque nous savons à quel domaine technique une formulation appartient, l'énoncé est non ambigu – c'est du moins une opinion couramment admise. C'est probablement, le point de vue des non spécialistes. Les spécialistes savent ou devraient savoir que cette appréciation n'est pas vraie.

Comme exemple, considérons le mot *force* et les nombreux concepts qui furent désignés par ce mot ou son équivalent en latin *vis*. Il est bien connu qu'au 17ème et 18ème siècle le mot recouvrait différents concepts. Certains auteurs l'utilisaient pour ce que nous appelons aujourd'hui quantité de mouvement, d'autres l'employaient pour ce que nous appelons maintenant énergie cinétique (*vis viva*), mais aussi pour ce que nous appelons encore une force, nommément la quantité F . On pourrait croire que cette ambiguïté était due à l'effort de clarification que l'on faisait alors. Cependant l'usage du mot au sein de la physique n'est pas devenu plus consistant à l'époque où la clarification de la physique sous-jacente a été atteinte. La citation suivante provient d'un manuel de 1912 : “Nous appelons le produit de la moitié de la masse avec le carré de la vitesse du poids en mouvement sa force vive“ [3]. Et même aujourd'hui en physique le mot est souvent utilisé pour la grandeur énergie [4]. Mais de plus, un nouveau compétiteur est apparu dans l'arène. La thermodynamique des processus irréversibles a repris le mot pour ses besoins, c'est à dire pour décrire le “moteur” ou la “cause” de tout processus de transport dissipatif : “Nous avons vu dans la section précédente, que pour l'apparition d'un phénomène irréversible il existe une série de causes : par exemple un gradient de température, un gradient de concentration, un gradient de potentiel ou une affinité chimique. Dans la thermodynamique des processus irréversibles ces quantités sont appelées ‘forces’...” [5]. En outre, le terme “force électromotrice” a survécu sans conteste jusqu'à ce jour.

On pourrait croire que seuls nos aïeux étaient capables d'un traitement aussi irresponsable du langage scientifique. Mais ce n'est pas le cas. En ce moment nous pouvons observer que l'innocent mot “force” est en train d'être absorbé par un nouveau groupe de spécialistes : les physiciens des particules. Il n'est pas facile de comprendre ce qu'un physicien des particules entend précisément lorsqu'il parle de force. Apparemment ils utilisent les termes “force” et “interaction” de manière synonyme [6] : “Deux des trois particules d'interaction de la force faible sont électriquement chargées. Elles sont donc sujettes à la force électromagnétique. Ainsi, elles peuvent émettre des photons et s'attirer l'une l'autre.” Apparemment, dans ce contexte le mot “force” n'est pas employé comme un nom d'une grandeur physique.

Avec quelque attention beaucoup d'autres exemples de tels changements de signification d'un terme scientifique peuvent être mis en évidence.

Le *bit* fut introduit comme une unité de mesure de la quantité de données de Shannon. Mais plus tard il fut utilisé comme un synonyme de “système quantique à deux états”. L'évolution de ce terme atteignit un nouveau niveau lorsque le terme qubit apparut.

Le terme “orbitale” fut inventé pour nommer un concept qui devait remplacer le concept de “trajectoire” qui était banni par la mécanique quantique. Plus tard sa signification fut transférée à deux concepts physiques supplémentaires. Pour certains il désigne une fonction d'onde d'une particule unique [7], pour d'autres le carré de la fonction d'onde [8].

En dépit du DIN et de l'ISO, du SI et de l'IUPAP*, les termes techniques ne sont pas utilisés avec une unique signification. Le langage scientifique n'est pas fondamentalement différent du langage courant. Les deux langages subissent un développement continu. Ce processus est essentiel pour le langage courant. En linguistique ce phénomène est appelé un *changement sémantique*. Pour le discours scientifique de tels changements sont la cause d'incompréhensions et de difficultés d'apprentissage. Des problèmes peuvent survenir lorsque l'utilisateur du langage, et en particulier l'enseignant n'est pas conscient de l'ambiguïté d'un terme scientifique.

Origine :

Le langage scientifique est sujet aux mêmes lois linguistiques que le langage courant. Il est dans un processus continu de changement et de développement. Dans les deux domaines de nouvelles significations apparaissent souvent du fait d'un traitement insouciant de la langue. A chaque fois qu'un nouveau sujet scientifique particulier émerge, les scientifiques commencent à parler un argot, qui au début n'a pas vocation à être défini, mais qui finalement aboutit en ce qui est plus tard considéré comme le langage technique du nouveau domaine.

Remède :

En tant qu'enseignant, ne prenez pas part à chaque manière des représentants d'une spécialité scientifique ou technique. N'utilisez pas, sans une bonne raison, un terme scientifique dans différentes significations. Par exemple : faites la distinction entre les deux significations du mot champ [9] : 1. comme un nom pour une grandeur physique et 2. comme un nom pour un système physique. Si un mot est fermement établi avec deux sens, et que ses deux significations sont indispensables, informez les étudiants du problème.

[1] Duden, Deutsches Universalwörterbuch (dictionnaire universel allemand), Dudenverlag Mannheim 1989, mot-clé : Fachausdruck (terme technique).

[2] Wikipedia, December 2006, mot-clé : Fachsprache (langage technique).

[3] E. Riecke : Lehrbuch der Physik (manuel de physique), Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 1912, p. 63.

[4] F. Herrmann : Force et énergie, article 5.15

[5] S. R. de Groot. Thermodynamik irreversibler Prozesse (thermodynamique des processus irréversibles), Bibliographisches Institut Mannheim 1960, p.4.

[6] DESYs KworkQuark 2006 <<http://www.kworkquark.net/>>

[7] K. Bethge and G. Gruber. Physik der Atome und Moleküle (physique des atomes et molécules), VCH Weinheim 1990, p. 199: “Dans la littérature chimique les fonctions d'onde des particules uniques sont appelées orbitales...”

[8] dtv-Atlas zur Chemie, dtv München 1983, p. 23: “Au lieu de cela le terme orbitale désigne la probabilité de trouver un électron (distribution de la densité électronique) dans un atome.”

[9] F. Herrmann : Le champ comme une région de l'espace avec des propriétés, article 3.8

1.2 Interaction

Sujet :

Le terme “interaction” est utilisé en physique dans différents contextes. De ce fait sa signification ne correspond pas toujours à celle du langage courant.

Défaut :

En physique le terme “interaction” vaut pour plusieurs phénomènes et processus différents.

1. Le mot est utilisé lorsque deux corps exercent des forces l’un sur l’autre au sens de la troisième loi de Newton. A première vue il semble qu’ici le terme interaction est approprié. Lorsqu’un corps A exerce une force sur un autre corps B, d’après la troisième loi B exerce aussi une force sur A. Puisque nous disons qu’une force “agit”, nous avons affaire ici avec deux actions : A sur B et B sur A. Nous avons ainsi une “interaction”, même dans l’usage courant du mot. Toutefois, cette observation nous conduit à un premier problème. Le terme interaction convient seulement tant que l’on décrit le processus avec le modèle newtonien d’une action à distance. La description s’applique à deux systèmes seulement qui sont bien séparés : le corps A et le corps B. Cependant, nous n’avons plus besoin de cette description provisoire depuis plus d’une centaine d’années, puisque nous sommes maintenant convaincus que toute action est basée sur le transport d’une quantité physique. En particulier, une force newtonienne n’est rien d’autre qu’un transport de quantité de mouvement. Si le ressort (nous l’imaginons de masse nulle) tire des corps A et B l’un vers l’autre, Fig. 1, la quantité de mouvement de A augmente et celle de B diminue. Mais ce n’est pas qu’en B la quantité de mouvement disparaît et réapparaît en A. Plutôt, elle est transférée via un moyen intermédiaire ou système C – dans notre cas le ressort. Ainsi est-il possible de préciser comment la quantité de mouvement passe de B à A. Pour ces raisons il n’est pas juste de dire qu’il y a une interaction. Quand un partenaire B se débarrasse de quelque chose et quand A le reçoit, il serait plus pertinent de dire qu’il y a un transfert, un transport ou une transmission. Quand quelqu’un verse de l’eau d’un seau dans un autre, ce ne serait pas caractériser le processus convenablement de dire qu’il y a une interaction entre les seaux.



Fig. 1. Le ressort est soumis à une contrainte de tension. La quantité de mouvement de A augmente, celle de B diminue (la “quantité de mouvement négative” de B augmente).

2. En physique des particules on distingue entre les particules de matière (hadrons et leptons) et les particules d’interaction bosoniques (parfois appelées porteurs d’interaction ou médiateurs de force). Dans ce domaine le terme interaction signifie qu’une certaine particule est créée ou annihilée. Puisqu’il y a quatre types de champs de bosons, il y a aussi quatre interactions différentes : électromagnétique, gravitationnelle, faible et forte. Ces processus incluent l’interaction au sens classique, c’est à dire le cas pour lequel de la quantité de mouvement est transférée entre deux particules (de matière), tandis que la nature des particules n’est pas changée (un exemple est la diffusion électron-électron). Ils incluent de plus les processus dans lesquelles deux particules-interaction „interagissent“ (exemple: photon-photon ou gluon-gluon). Mais il y a aussi des processus dans lesquels des particules de matière changent leur nature (un exemple est la décroissance radioactive beta pour laquelle un proton se transforme en un neutron, un électron et un antineutrino). On peut voir qu’ici le terme “interaction” ne coïncide plus avec l’interaction au sens courant. Le terme décrit plutôt quelque chose qui pourrait mieux être appelée une réaction (au sens de la chimie).

3. Dans d’autres domaines de la physique le mot est utilisé dans un sens encore plus large, à savoir pour la description de nombreux processus dans lesquels deux sous-systèmes ou plus sont impliqués. Actuellement, on peut à peine concevoir un processus pour lequel ce n’est pas le cas, de telle sorte qu’en définitive tout devient une interaction. Cela sonne très bien et scientifique, lorsque quelque chose est appelée une interaction, même si rien de concret n’est dit.

Origine :

Newton n’utilisait pas le terme, il n’y avait pas d’“interactio”. Pour lui il y avait seulement “actio” et “reactio”. Par la suite sa troisième loi n’était pas encore appelée loi d’interaction, mais loi des actions réciproques. A la fin du 19^{ème} siècle, le terme “interaction” apparaît dans la littérature scientifique, voir par exemple dans la *Science de la Mécanique* d’Ernst Mach. Mais le mot a acquis son immense popularité bien plus tard, probablement dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, lorsque tout phénomène physique impliquant deux sous-systèmes devint une interaction.

Remède :

1. Formuler la troisième loi de Newton sans action à distance : la quantité de mouvement que le corps B perd est transférée au corps A.
2. Concernant les quatre champs bosoniques, le terme a acquis une signification spécifique. Bien que le mot ne fût pas le meilleur choix, nous devons l’accepter comme un nouveau terme technique avec sa signification propre.
3. Un usage parcimonieux du mot rend tout texte plus clair.

Sujet :

Dans les manuels de physique les étudiants apprennent le principe de fonctionnement du compteur Geiger mais non celui de l'horloge. Ils apprennent les détails du thermomètre à colonne de liquide mais rien à propos du thermocouple. Ils approchent les processus électroniques en jeu dans un laser mais non ceux dans une lampe à incandescence ou dans la flamme d'une bougie. A un niveau avancé ils étudient le spectromètre de masse et le filtre de Wien, mais pas le spectromètre de Fourier. Les transformations isothermes sont discutées quantitativement, mais pas du tout les transformations isentropiques. A l'université les étudiants apprennent pourquoi le ciel est bleu, mais non pourquoi le reste du monde est rouge, vert, gris, noir ou blanc.

Défaut :

Lorsque nous concevons un programme d'études ou établissons des exigences d'enseignement, mais aussi lorsque nous préparons nos propres leçons ou cours magistraux, nous devons faire des choix motivés. Quelle grandeur physique introduire et laquelle laisser de côté ? Combien d'heures de cours prévoir pour la mécanique, combien pour la thermodynamique et combien pour l'électricité ? Pour quels phénomènes et processus devons nous donner une interprétation microscopique et lesquels devons-nous traiter à l'échelle macroscopique ? Quels compteurs ou capteurs devons-nous introduire dans la classe ?

En examinant nos programmes ou nos manuels, nous pouvons remarquer que souvent le choix n'était pas le bon. Cela est illustré par les exemples déjà cités.

Origine :

Souvent un sujet entre dans le répertoire enseignant de façon fortuite. Puis il devient une habitude et sa position n'est plus remise en question. De plus, une tradition de "problèmes d'examen" s'est développée qui assure la survie de certains sujets. Un autre élément qui stabilise certains sujets d'enseignement particuliers est l'équipement produit par les fournisseurs de matériels d'enseignement. L'inertie de l'ensemble du système composé des enseignants, des professeurs, des institutions de formation des enseignants, des manuels de l'enseignement secondaire et de l'université, leurs auteurs, des habitudes d'examen, et de l'équipement pour les démonstrations et les expériences de laboratoire est très grande.

Remède :

Pour sélectionner les sujets pour des programmes, des manuels ou pour nos propres classes, nous recommandons la méthode suivante : d'abord choisir tout sujet, qui peut être considéré comme un candidat pour le programme. Ensuite essayer de trouver des "compétiteurs", c'est à dire des sujets qui peuvent être considérés comme équivalents en tout point : leur niveau de difficulté, leur utilité pour des applications, leur valeur en tant que sujet d'éducation générale, etc. Les compétiteurs peuvent être des sujets qui normalement ne se trouvent pas dans le programme. Le candidat survit seulement si nous trouvons de bonnes raisons pour lesquelles il est plus important que les compétiteurs, qui ne sont pas actuellement dans le programme.

Nous utilisons cette méthode, parce qu'il n'est pas suffisant de donner des raisons pour lesquelles un sujet est important. De telles raisons peuvent être trouvées pour toutes questions, et en général il est facile de les présenter de manière convaincante. De la sorte, l'important est qu'un sujet doive l'emporter face à ses compétiteurs.

Considérons un exemple : la proposition initiale est d'introduire l'intensité du champ électrique. Quels sont les compétiteurs ? Il y en a de plusieurs sortes. D'abord, il y a l'autre grandeur vectorielle qui permet de décrire un champ électrique, le champ déplacement électrique. Ensuite, il y a une grandeur scalaire qui permet de décrire le champ électrique : le potentiel électrique. D'autres compétiteurs sont des grandeurs analogues pour le champ magnétique et le champ gravitationnel. Maintenant se posent les questions suivantes : si nous introduisons l'intensité du champ électrique, pourquoi ne pas introduire l'intensité du champ magnétique et l'intensité du champ gravitationnel ? Ou, si nous n'introduisons pas l'intensité du champ gravitationnel, pourquoi devons-nous alors introduire l'intensité du champ électrique ?

Nous ne trouverons pas difficile de répondre à ces questions dans ce cas. La situation suivante est plus difficile. Le sujet de départ qui est proposé est la dilatation thermique des liquides et des solides. A nouveau, nous cherchons des compétiteurs, et ce seront principalement d'autres propriétés physiques des matériaux : thermiques, mécaniques, électriques, magnétiques et optiques. Nous comparerons leurs ordres de grandeur. (La dilatation thermique des liquides et des solides est de l'ordre de 10^{-3} .) Nous les comparerons aussi en regard de leur importance pour une compréhension physique générale et en regard des applications techniques. Dans ce cas le nombre et l'importance des compétiteurs sont tellement grands que la dilatation thermique des liquides et des solides survit à peine.

Une conclusion similaire est inévitable à propos du compteur Geiger. Les compétiteurs sont de nombreux instruments dont certains sont aussi exotiques que le compteur Geiger, mais d'autres sont aussi omniprésents que la montre à quartz ou la matrice CCD d'un appareil photo numérique.

Parmi nos exemples dans le paragraphe "sujet" il y a des thèmes qui sont actuellement traités à l'école et qui ne survivraient pas à une telle méthode, et il y a d'autres thèmes qui, de manière injustifiée, ne font pas partie du programme.

Sujet :

“Une mesure est la détermination empirique de la valeur réelle d’une grandeur physique.”

Défaut :

Mesurer la valeur d’une grandeur physique est une tâche habituelle en physique. Les mesures sont réalisées pour découvrir ou pour vérifier la relation entre grandeurs physiques. En expliquant pourquoi une mesure est nécessaire, on suggère souvent l’idée suivante : avant de faire la mesure la valeur est inconnue, après la mesure elle est connue. Ainsi il y a deux états ou situations : “non mesuré” et “mesuré”. Notre citation est un exemple extrême d’un tel point de vue. Elle exprime de plus qu’il existe une valeur réelle. Parfois il est souligné que nous devons faire une mesure parce que nos sens sont imprécis et trompeurs.

Cette conception est regrettable à deux égards.

Premièrement : Il n’est pas vrai qu’avant d’exécuter une mesure rien n’est connu sur la valeur de la grandeur physique en question. Et deuxièmement : il n’est pas vrai non plus qu’après la mesure nous connaissons la valeur réelle ou exacte. Avant de faire la mesure nous savons que la valeur est située dans un certain intervalle, qui peut être très grand ; après la mesure nous savons aussi que la valeur est dans un certain intervalle, mais cet intervalle est plus petit qu’avant la mesure. Si l’intervalle a été fortement réduit en réalisant la mesure, alors c’est une bonne mesure. S’il est seulement légèrement réduit, la mesure n’est pas si bonne.

Sur la base de cette observation nous pouvons définir un nombre qui caractérise la qualité d’une mesure de la grandeur X : le rapport entre l’intervalle avant et celui après la mesure

$$\frac{X_{b2} - X_{b1}}{X_{a2} - X_{a1}}$$

L’indice b se rapporte à “avant” et l’indice a à “après”. Une définition plus appropriée serait le logarithme binaire (de base 2 : lb) de ce rapport

$$M = \text{lb} \left(\frac{X_{b2} - X_{b1}}{X_{a2} - X_{a1}} \right) \text{bit} \quad (1)$$

puisque’il représente le gain d’information réalisé par la mesure. Il nous dit de combien de bits le contenu d’information de la valeur de la grandeur physique a augmenté par la mesure. En supposant qu’avant de réaliser la mesure nous savons que la valeur de la grandeur en question est comprise entre 10 and 12, et qu’après la mesure nous savons qu’elle est entre 10,6234 et 10,6236, nous calculons

$$M = \text{lb} \left(\frac{12 - 10}{10,6236 - 10,6234} \right) \text{bit} = 13,3 \text{ bit}$$

L’instrument de mesure a fourni 13,3 bit*.

Origine :

En physique à l’école il est courant de classer une mesure comme bonne si la précision est meilleure qu’environ 5%. Elle est considérée mauvaise si la précision est moins bonne que 20 % plus ou moins. Cette évaluation est plutôt arbitraire. Cela est du probablement au fait que les vieux instruments à aiguille avait une précision de mesure d’environ quelques pourcents. Cela peut aussi être lié au fait que nous pouvons déterminer les valeurs de plusieurs grandeurs, comme les distances, les vitesses et les masses, en utilisant nos sens avec une précision d’environ 10 % à 50 %. L’idée pourrait avoir été qu’une opération est appelée une mesure seulement si elle procure des valeurs qui sont plus précises que celles que nous obtenons en utilisant nos sens.

Remède :

Nous recommandons de prendre au sérieux un résultat de mesure même si la précision est dans une gamme qui est habituellement considérée comme imprécise. Une “mesure” qui est réalisée avec nos sens n’est pas nécessairement une mauvaise mesure, c’est à dire l’augmentation de l’information M peut être importante.

*La définition est raisonnable seulement tant que l’incertitude est petite comparée à la valeur mesurée. Cependant, elle peut être généralisée de telle façon que ce cas est aussi couvert :

$$M = \text{lb} \left(\frac{\text{lg} \frac{X_{v2}}{X_{v1}}}{\text{lg} \frac{X_{n2}}{X_{n1}}} \right) \text{bit}$$

Supposons qu’il soit connu que le nombre de protons dans l’univers est compris entre 10^{70} et 10^{90} . Maintenant quelqu’un est capable de montrer au moyen de quelque mesure astrophysique, que la valeur est située entre 10^{75} et 10^{85} . Notre formule nous dit que le gain en information est

$$M = \text{lb} \left(\frac{\text{lg} 10^{20}}{\text{lg} 10^{10}} \right) \text{bit} = \text{lb} 2 \text{ bit} = 1 \text{ bit}$$

Sujet :

Au cours des leçons de mécanique et d'électricité les étudiants se familiarisent avec les relations linéaires suivantes :

Equation	Nom
(1) $F = -D \cdot s$	loi de Hooke
(2) $p = m \cdot v$	aucune dénomination
(3) $F = k \cdot v$	parfois loi de frottement de Stokes
(4) $n\Phi = L \cdot I$	aucune dénomination
(5) $Q = C \cdot U$	aucune dénomination
(6) $U = R \cdot I$	loi d'Ohm

Défauts :

Les équations sont des éléments d'une structure commune de la mécanique et de l'électricité. Elles décrivent pour chacune des deux disciplines trois composants passifs linéaires.

Chacune de ces six équations n'est valable que dans une gamme suffisamment petite de la variable indépendante pertinente. Un ressort n'obéit plus à la loi de Hooke s'il est trop étiré. La quantité de mouvement n'est plus proportionnelle à la vitesse si la vitesse n'est plus petite comparée à c . La force de frottement n'est plus proportionnelle à la vitesse si la turbulence intervient. Le flux magnétique et l'intensité du courant électrique ne sont plus proportionnels l'un à l'autre si le solénoïde se déforme sous l'action du champ magnétique. La charge électrique et la tension n'obéissent pas à une relation linéaire si la distance des plaques du condensateur change sous l'influence de la contrainte de tension générée par le champ électrique. Une résistance ne se conforme plus à la loi d'Ohm si le courant électrique devient trop fort.

On constate que la linéarité est à chaque fois un cas particulier. Ce cas particulier, cependant, est particulièrement important, puisqu'il est toujours valable à condition que la valeur de la variable indépendante ne soit pas trop élevée.

Les exemples bien connus de l'oscillateur harmonique mécanique ou électrique montrent comment les équations se correspondent. Dans chacune des équations différentielles pour les oscillations harmoniques amorties, trois des composants qui correspondent aux équations (1) à (6) sont représentés par un opérande d'une somme. A chaque composant de l'oscillateur mécanique correspond un composant dans le circuit électrique oscillant. Du fait de la similitude de la structure mathématique des équations différentielles, les solutions de ces équations ont aussi la même structure.

Vu de cette façon, une relation entre les équations (1) à (6) devient apparente et il serait logique d'enseigner cette structure à nos étudiants. En réalité, nous avons l'habitude de procéder tout à fait différemment.

D'abord, il y a les noms : nous avons des noms bien établis seulement pour les équations (1) et (6) : loi de Hooke et loi d'Ohm. Cette observation n'est pas du tout anecdotique. Une équation avec un nom est perçue comme plus importante qu'une formule sans nom.

Plus importante encore est la façon dont les équations sont "vendues" aux étudiants : seules les équations (1), (5) et (6) sont introduites comme décrit plus haut, c'est à dire comme l'expression d'une linéarité observable et comme la définition du facteur de proportionnalité.

La relation (2) est présentée comme l'équation qui définit la quantité de mouvement. Elle ne reflète donc aucune propriété observable. En tant que pure définition, ce n'est pas une loi de la nature. De ce point de vue il semble naturel que cette équation n'ait pas de nom.

L'équation (3) est cette loi du frottement mécanique qui correspond à la loi d'Ohm en électricité. Les étudiants l'apprennent, éventuellement, seulement de manière superficielle. En mécanique elle n'est habituellement pas mentionnée. Apparemment, le frottement entre des corps solides est considéré comme plus important. Mais elle est traitée comme le mécanisme type du frottement dans le contexte des oscillations. (Et la raison en est évidente.) De plus, la loi est utilisée lorsqu'on enseigne l'expérience de Millikan. On doit espérer que les étudiants ne croiront pas que le frottement de Stokes est une particularité de l'expérience de Millikan. L'amortisseur fluide d'une voiture, qui n'est pas moins important que les ressorts ou que les freins, n'est habituellement pas traité à l'école.

Origine :

Les six équations ont été découvertes sur une période de temps d'environ 200 ans par différentes personnes dans différents contextes. Bien qu'il ne soit pas difficile de reconnaître la structure, et bien que cette structure donne lieu à un semestre entier de cours dans les écoles d'ingénieurs, le programme de physique n'y a jamais porté attention, peut-être à cause de l'importance du sens des traditions des physiciens.

Remède :

Il serait complètement vain de tenter de retirer un nom à une équation à laquelle il est attaché depuis plus d'une centaine d'années ou de donner un nom à une équation qui n'en avait pas dans le passé. (Bien qu'il ne serait pas irraisonnable d'appeler l'équation (2) loi de Huygens ou loi de Descartes, en l'honneur de l'un de ces découvreurs.) Tout ce que nous pouvons faire est de montrer et d'insister sur leur analogie et d'aborder la question de leur traitement asymétrique dans les livres scolaires.

Nous pouvons aussi montrer que la proportionnalité entre p et v (équation (2)) est en effet observable. La masse inertielle est alors définie comme le facteur de proportionnalité. En utilisant la seconde loi de Newton $dp/dt = F$ nous obtenons la relation bien-aimée (trop aimée ?) : $F = m \cdot a$.

Sujet :

En mécanique théorique, les intégrales de mouvement jouent un rôle important : ce sont des grandeurs dont les valeurs restent constantes dans le temps. Un système avec n degrés de liberté possède $2n - 1$ intégrales de ce type. On appelle souvent ces grandeurs des grandeurs conservées* :

(1) “Une fonction $f(q, \dot{q}, t)$ est appelée une grandeur conservée ou intégrale de mouvement, si

$$\frac{df(q, \dot{q}, t)}{dt} = 0$$

ou $f(q, \dot{q}, t) = \text{constante}$, vaut pour toute trajectoire $q_i(t)$, qui satisfait aux équations de *Lagrange* [1].”

(2) “Apparemment, la quantité de mouvement est une grandeur conservée, si sa dérivée temporelle disparaît, c'est-à-dire si les forces \mathbf{K}_1 et \mathbf{K}_2 sont égales et opposées durant la totalité du mouvement, si donc

$$\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 = 0 .” [2]$$

Défaut :

En mécanique théorique ou analytique, l'expression “grandeur conservée” a une signification différente de celle dans d'autres domaines de la physique.

En général, c'est-à-dire mis à part la mécanique analytique, on emploie les désignations “conservée” ou “non conservée” pour caractériser une grandeur physique de type-substance. (Une grandeur est de type-substance si une densité et un courant peuvent lui être attribués.) Quelques grandeurs de type-substance sont conservées, comme l'énergie, la quantité de mouvement et la charge électrique, et d'autres ne le sont pas, c'est le cas de l'entropie. La conservation ou la non-conservation, respectivement, est une propriété universelle d'une grandeur (voire également [3]). Elle n'est pas la caractéristique d'une certaine fonction, d'un certain système ou d'un certain processus. Cela n'a aucun sens également de parler de la conservation ou de la non-conservation d'une grandeur qui n'est pas de type-substance. La température, par exemple, n'est ni conservée ni non-conservée.

En mécanique théorique, au contraire, l'expression “grandeur conservée” vaut pour “intégrale de mouvement” (voir notre première citation). Une intégrale de mouvement n'est pas nécessairement de type-substance et est souvent non intuitive. Un exemple est le vecteur de *Runge-Lenz*. Le vecteur de *Runge-Lenz* est indépendant du temps pour le problème de *Kepler*. Selon l'usage de la mécanique théorique c'est une grandeur conservée du problème de *Kepler*. Toutefois, le vecteur de *Runge-Lenz* n'est pas une grandeur de type-substance, parce qu'aucune densité et aucune densité de courant ne peut être définies pour lui. De plus, il n'est pas toujours indépendant du temps, mais seulement pour le problème de *Kepler*.

Selon la pratique de la mécanique théorique les grandeurs énergie, quantité de mouvement et moment cinétique sont parfois conservées et parfois non (voir notre seconde citation).

Origine :

La mécanique théorique est l'une des théories physiques les plus élégantes. Elle joue également un rôle important en tant que base pour d'autres théories : elle ne requiert que peu de modifications pour devenir la théorie quantique. Cette perfection peut être due au fait qu'elle fut achevée tout à fait indépendamment des autres domaines de la physique. Par là même elle a développé son propre vocabulaire. Entre autres choses la désignation “conservation” est utilisée dans un sens différent qu'ailleurs. Cela ne peut pas toujours être remarqué car dans certains cas cette signification recouvre celle utilisée dans les autres domaines de la physique. Cet usage peut aussi être la cause d'une formulation quelque peu malheureuse de la conservation vraie et universelle d'une grandeur. Au lieu de caractériser une grandeur conservée en disant qu'elle ne peut être produite ou détruite, il est dit que la valeur de la grandeur est constante dans un système fermé.

Remède :

On fait la distinction entre les concepts “intégrale de mouvement” et “grandeur conservée”, comme cela est fait, par exemple, dans Landau-Lifshitz [4] : “Parmi elles [les intégrales de mouvement] il y en a dont la constance a une cause plus profonde, qui est liée aux propriétés essentielles du temps et de l'espace – son homogénéité et son isotropie. Toutes ces grandeurs communément appelées grandeurs conservées ont en commun l'importante propriété d'être additives.”

[1] *F. Kuypers*: *Klassische Mechanik* (mécanique classique). Physik-Verlag, Weinheim, 1983, page 38.

[2] *W. Macke*: *Mechanik der Teilchen* (mécanique des particules). Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1962, page 240.

[3] *F. Herrmann* : Lois de conservation, article 1.7

[4] *L. D. Landau and E. M. Lifschitz*: *Theoretische Physik kurzgefaßt* (résumé de physique théorique) I. Akademie-Verlag, Berlin, 1973, page 17.

* : Dans l'enseignement français de la physique, on trouve le plus souvent le qualificatif « conservative » plutôt que « conservée ». Cependant, le terme issu du langage courant « conservé » est préféré parce qu'il est compris sans exiger de définition spécifique. (NdT)

1.7 Lois de conservation

Sujet :

Il est possible d'affirmer qu'une quelconque grandeur extensive est conservée ou non. Certaines grandeurs extensives obéissent (pour autant que nous le sachions) à une loi universelle de conservation : énergie, quantité de mouvement, moment cinétique, charge électrique, nombre leptonique, nombre baryonique, charge de couleur, etc. Il y a une grandeur qui obéit à une "demi loi de conservation" : l'entropie peut être produite, mais non détruite. Chaque grandeur qui n'est pas généralement conservée peut être conservée dans certaines circonstances. Par exemple, l'entropie lors des transformations réversibles se comporte comme une grandeur conservée. La quantité de matière n'est pas généralement conservée, cependant il y a de nombreux processus pour lesquels elle se comporte comme une grandeur conservée.

Défaut :

Si les grandeurs extensives sont mises au premier plan, alors on obtient une représentation de la physique pour laquelle ses différents domaines révèlent la même structure. La mécanique, la thermodynamique, l'électricité et la chimie apparaissent comme des cas particuliers d'une structure uniforme de concepts. Pour être capable de tirer profit de cette similarité structurelle, il est nécessaire que les différentes grandeurs physiques correspondantes soient traitées de manière analogue. Par conséquent il est recommandable que la conservation ou la non-conservation des différentes grandeurs extensives soient traitées de façon analogue, sur un pied d'égalité. Toutefois cela n'est habituellement pas fait.

Par exemple, la conservation de l'énergie est présentée comme l'un des principes les plus importants de toute la physique. La conservation de la quantité de mouvement est contenue dans les lois de Newton sous un accoutrement si étrange que cette simple formulation ne peut plus y être reconnue. Complètement différente encore est la charge électrique : sur sa conservation pas un seul mot n'est gaspillé, puisqu'elle est habituellement présumée comme évidente. Le simple fait que l'entropie peut être produite mais non détruite est parfois trouvé dans les livres scolaires en petits caractères et habituellement à une place que l'enseignement n'atteint jamais. La non-conservation de la quantité de matière n'est jamais formulée comme un théorème, ni le fait que pour certaines classes de processus la quantité de matière est conservée. Au lieu de formuler et d'appliquer les lois de conservation simples et utiles qui sont connues pour la physique nucléaire et la physique des particules, un temps précieux d'enseignement est gâché avec la discussion de détails de compteurs de radiation particuliers.

Origine :

Les formulations concernant la conservation ou la non-conservation des grandeurs extensives reflètent le développement historique de la physique. Si la découverte et l'expression d'une telle formulation furent difficiles et prirent du temps, ou bien si sa validité fut mise en doute pendant longtemps, alors beaucoup de temps sera accordé à l'enseignement du concept, et la formulation sera présentée comme particulièrement importante. L'exemple le plus clair en est la conservation de l'énergie. On pourrait argumenter que le principe de conservation de l'énergie est aussi fascinant pour nous, parce qu'il interdit une chose avec laquelle on pourrait gagner beaucoup d'argent. Cela est vrai. Cependant, il montre aussi le manque d'imagination des aspirants inventeurs du mouvement perpétuel, puisqu'ils pourraient aussi faire beaucoup d'argent en violant toute autre loi de conservation.

D'autre part, si la découverte d'un théorème de conservation ou de non-conservation fut rapide et facile, et si sa formulation n'a pas été historiquement mise en doute, alors le théorème est aussi traité rapidement en classe, voire pas du tout.

Remède :

L'enseignement gagnerait en :

- 1) formulant clairement la conservation ou la non-conservation pour chaque grandeur extensive, 2) attirant l'attention sur l'importance de la conservation ou de la non-conservation (en particulier dans le cas de la charge électrique, de la quantité de matière, du nombre leptonique et du nombre baryonique), 3) n'exagérant pas l'importance de la conservation (comme pour l'énergie).

1.8 Des particules partout

Sujet :

“Chaque fois que les molécules de vapeur d’eau impactent la pale du rotor de la turbine, elles lui transfèrent une part de leur énergie cinétique et rebondissent en arrière avec une vitesse réduite.”

“Du fait de la grande longueur d’onde et du faible frottement entre les molécules d’eau, un tsunami est seulement à peine amorti.”

“Comme la demande d’électricité est souvent la plus faible lorsque le vent souffle le plus fort, le Danemark doit vendre son surplus d’électrons pour quelques centimes aux pays voisins.”

Défaut :

Première citation : seules très peu de molécules d’eau viennent en contact avec les pales de la turbine. Ainsi est-il exagéré de dire “/les molécules”. Dire « très peu » de molécules serait plus correct.

Deuxième citation : les molécules ne sont pas rugueuses et il n’y a pas de frottement entre les molécules individuelles.

Troisième citation : une personne avec une éducation scientifique comprendra ce qui est sous-entendu : quelque chose de différent de ce qui est dit. (Pour un courant alternatif avec une densité de courant typique les électrons oscillent d’avant en arrière de quelques microns seulement. Il est donc grandement exagéré de dire que les électrons quittent le Danemark. De plus, la ligne électrique est constituée d’une ligne aller et d’une ligne retour.) Celui qui n’est pas tant familier avec la physique croira que les électrons se déplacent réellement du Danemark vers l’Allemagne ou la Suède.

On pourrait penser que ces petites bévues ne valent pas la peine d’être mentionnées si elles n’étaient pas symptomatiques d’une prédisposition prononcée de la plupart des physiciens pour tout expliquer en se référant aux particules. Un phénomène physique n’est pas véritablement compris tant qu’il n’est pas réduit au comportement de particules – ceci est une opinion très répandue.

On parle de molécules d’eau quand on pense à l’eau, de photons quand on pense à la lumière et d’électrons quand on pense à la charge électrique, ou, comme pour notre dernière citation, quand on pense à l’énergie.

Bien sûr, on peut décrire pour tout processus physique ce qui se déroule à l’échelle microscopique, et il y a toujours des particules qui font quelque chose. Cependant, ce qu’elles font n’éclairent pas forcément le problème véritable. On ne comprend pas mieux la turbine à vapeur avec les molécules d’eau qu’avec la vapeur, on ne comprend pas mieux le tsunami avec les molécules d’eau qu’avec l’eau, on ne comprend pas mieux les phénomènes électriques avec les électrons qu’avec la charge électrique.

La physique fonctionne avec des grandeurs physiques et nous (ainsi que nos étudiants) n’avons pas de problèmes à les utiliser. Il est vrai que les particules sont intuitives mais nous pouvons aussi acquérir une idée intuitive des grandeurs physiques. Nous pouvons imaginer la charge électrique et l’énergie comme des fluides qui peuvent s’écouler et pour lesquelles nous pouvons établir un bilan. En se reposant uniquement sur les particules, il devient plus difficile dans de nombreuses situations d’accéder à une compréhension ou à une description mathématique formelle. De plus, la description particulière ne représente pas une vérité plus profonde.

De l’interaction complexe de nombreuses particules émerge à un niveau plus élevé de nouveaux phénomènes qui peuvent être décrits par une théorie plus simple. En philosophie des sciences ce phénomène est appelé *émergence*. En réduisant le comportement d’un système au comportement de ses composants particuliers, on explique souvent le simple par le compliqué.

Origine :

Le “réductionnisme” est une tendance générale. Au 19ème siècle il connut de grands succès et devint généralement accepté. Un phénomène n’était considéré comme compris seulement lorsqu’il était ramené à la mécanique de ses particules constituantes.

Remède :

Dans une turbine à vapeur la vapeur se détend. Elle actionne les pales de la turbine. De ce fait sa pression et sa température décroissent, de la même façon que la pression et la température de l’air qui monte dans l’atmosphère.

Au lieu d’invoquer le frottement faible des molécules d’eau qui cause un tsunami, il est suffisant de dire que l’eau est un fluide peu visqueux.

Et pour terminer : le Danemark n’exporte pas des électrons mais de l’énergie.

Sujet :

“L'éther comme support des champs électromagnétiques n'existe pas, le concept est une hypothèse non nécessaire.” “L'idée d'un éther [...] comme support des ondes électromagnétiques dans le vide, n'a été dépassé qu'avec l'avènement de la théorie de la relativité.”

Défaut :

Un problème ne peut pas être résolu en prétendant que le sujet à considérer n'existe pas. Le problème était le comportement étrange de l'éther lors d'un changement de référentiel. Ce comportement devint évident dans l'expérience de Michelson-Morley. L'existence de l'éther était en effet mise en doute pendant une certaine période par certains chercheurs, et quelques uns d'entre eux auraient aimé bannir le concept hors de la physique à la même occasion. Pourtant, après sa mise au ban partielle, l'éther fut admis à nouveau, bien que sous un nouveau nom. Il fut appelé vide. On pourrait penser, que maintenant les choses sont à nouveau en ordre, mais selon de nombreux livres et autres textes, l'espace reste vide, comme le montrent nos citations. Cela peut aussi être noté pour de nombreux manuels lorsque le concept de champ est introduit : un champ, tel que cela est dit, est de l'espace vide avec certaines propriétés.

Une autre faiblesse, qui est plus que seulement un défaut, est le choix de ce nouveau nom. Etymologiquement, le mot vide exprime l'absence de quelque chose ou l'absence de toute chose. Mais il est maintenant utilisé pour désigner la présence de quelque chose. Mais celui qui emploierait le bon vieux nom éther est considéré comme quelqu'un qui serait passé à côté de la théorie de la relativité [1]. En aucun cas Einstein ne devrait être cité en faveur de l'espace vide. Dans ses dernières publications, il s'est clairement prononcé en faveur de l'éther [2].

Origine :

Puisque l'expérience de Michelson-Morley a eu un résultat inattendu, il était clair qu'une nouvelle théorie était nécessaire pour remplacer la mécanique consacrée par l'usage. Désavouer l'existence de l'éther n'était qu'un acte de désespoir. Cela ne pouvait pas résoudre le problème de l'issue de l'expérience. Avec l'avènement de la théorie de la relativité générale et plus tard de l'électrodynamique quantique, la chimère de l'espace vide disparut et l'éther revint sous un nouveau nom.

Remède :

Il y a des situations où il est justifié de parler d'un espace vide, de la même façon que rien ne s'oppose à parler d'une bouteille vide. Nous comprenons qu'il n'y a plus de whisky dans une bouteille de whisky vide. Mais nous savons aussi que cela ne signifie pas qu'il n'y a pas quelque chose d'autre dans la bouteille : de l'air et de la lumière par exemple. Des affirmations à propos d'un espace vide peuvent provoquer des problèmes de compréhension cependant, quand il est suggéré que l'espace vide ne contient rien, ou qu'il y a du “néant”. Nous recommandons par conséquent d'utiliser le terme “espace vide” avec parcimonie. On devrait l'éviter complètement en introduisant le concept de champ.

[1] *R. B. Laughlin: A Different Universe – Reinventing Physics from the Bottom Down (Un univers différent – réinventer la physique à partir de la base)*, Basic Books, New York, 2005:

“Le mot 'éther' a des connotations extrêmement négatives en physique théorique à cause de son association passée avec l'opposition à la relativité. Cela est malheureux, car sans ces connotations, il capture plutôt correctement la façon dont la plupart des physiciens envisagent en réalité le vide.”

[2] *A. Einstein* : Conférence donnée le 5 mai 1920 à l'université de Leyde :

“En résumant, nous pouvons dire : d'après la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens, par conséquent un éther existe. Selon la théorie de la relativité générale, un espace sans éther est inconcevable, car non seulement la propagation de la lumière y serait impossible, mais il n'y aurait même aucune possibilité d'existence pour les règles et les horloges et par conséquent aussi pour les distances spatio-temporelles dans le sens de la physique. Cet éther ne doit cependant pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables, c'est à dire comme constitué de parties pouvant être suivies dans le temps : la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée.” (traduction M. Solovine, éditions Gauthier-Villars et Cie, 1921)

1.10 Deux effets d'une force et trois effets d'un courant électrique

Sujet :

Une force peut avoir deux effets : l'accélération et la déformation d'un corps.

Les courants électriques peuvent avoir trois effets : thermique, magnétique et chimique.

Défaut :

Pour avoir une idée claire de ces classifications, qui sont trouvées dans les manuels scolaires, comparons les deux affirmations. Cela n'est pas illégitime puisqu'une force n'est rien d'autre qu'un courant de quantité de mouvement. Ainsi, les deux classifications concernent les effets de courants : un courant de quantité de mouvement dans le premier cas et un courant électrique dans le second. Une telle comparaison met en lumière quelques incongruités.

1. Commençons par le premier effet d'une force : l'accélération. Cela peut aussi s'exprimer de la façon suivante : une force qui est en train d'agir sur un corps peut changer la quantité de mouvement du corps. La formulation électrique correspondante serait : un courant électrique qui s'écoule dans un corps (ou hors de lui) entraîne un changement de la charge électrique du corps. Cette formulation est certainement correcte. Mais pourquoi n'est-elle pas mentionnée comme l'un des effets d'un courant électrique ? Parce que cela est évident et trivial. Maintenant, l'effet d'accélération d'une force est simplement tout aussi trivial. Quand la quantité de mouvement entre dans un corps et ne le quitte pas simultanément, elle s'accumule inévitablement dans le corps.

2. Nous considérons ensuite l'effet thermique ou l'effet chauffant d'un courant électrique. La chaleur n'est pas seulement générée par un courant électrique. Les courants de quantité de mouvement (les forces) aussi peuvent produire de la chaleur, à savoir lors des phénomènes de frottement. Pourquoi cela n'est-il pas mentionné comme un effet d'une force (un courant de quantité de mouvement) ?

3. L'énumération des effets des courants est loin d'être complète. Ainsi il y a encore un effet électrique d'une force (l'effet piézoélectrique), un effet optique d'une force (biréfringence), des effets optiques et lumineux du courant électrique (dans une LED), un effet de refroidissement d'un courant électrique (dans un élément Peltier) etc.

En résumé on peut dire que les effets cités ne sont pas caractéristiques de chacun de ces types de courant. Tous les effets des deux courants ne sont pas mentionnés, et ceux qui sont mentionnés ne sont pas nécessairement les plus importants. En bref, les deux classifications contiennent vraiment beaucoup d'arbitraire.

Origine :

Comme la mécanique s'est développée indépendamment de l'électricité, différents modèles et habitudes d'enseignement se sont fixés dans les deux disciplines. Trop d'importance est donnée à la conservation de la quantité de mouvement (sous la forme des lois de Newton) en comparaison avec la conservation de la charge électrique. Au contraire, le frottement mécanique, en comparaison du "frottement électrique" (résistance électrique), est stigmatisé seulement comme un phénomène qui va à l'encontre des activités mécaniques.

Remède :

1. Abandonner l'effet d'accélération d'une force (courant de quantité de mouvement) ou inclure l' "effet de charge" d'un courant électrique. Notre choix serait de ne pas inclure ces deux phénomènes dans la liste des effets, puisque contrairement aux autres effets ces deux effets-là ne sont présents que si le courant a une divergence non nulle.

2. Si on s'engage dans une classification, alors l'effet thermique devrait être mentionné pour les deux courants, le courant électrique et le courant de quantité de mouvement.

3. Il devrait être clair que les effets représentent seulement une sélection.

2

Énergie

2.1 Formes d'énergie

Sujet :

Il est bien connu que l'énergie existe sous différentes formes. Energie cinétique, potentielle, électrique, chimique et chaleur sont des exemples connus de tout le monde ; "convertir l'énergie d'une forme à une autre" est une façon commune de parler.

Défaut :

Bien que nous parlions souvent de formes d'énergie, nous rencontrons des difficultés dès que nous essayons de les définir. Nous ne sommes pas cohérents dans la distinction nécessaire entre les formes d'énergie stockées et transmises. Au contraire, dans nos formulations désinvoltes, nous avons tendance à ne pas différencier les deux concepts. Alors que certaines règles ont été établies pour la chaleur et pour différents types de travail, la classification des formes de stockage d'énergie semble vague et arbitraire, à l'exception de quelques exemples trouvés dans des manuels de mécanique. Quelle part de l'énergie d'un ressort d'acier ou d'une molécule d'air est mécanique, thermique, chimique, électrique ou magnétique ? Quelle part est relative à un mouvement de translation, de rotation, d'oscillation ou électronique ? Quelle part est cinétique ou potentielle ? Quelle part est ordonnée ou désordonnée ? Le fait que nous obtenons des résultats raisonnables sans connaître les réponses à ces questions amène à la conclusion que la classification n'est d'aucune importance pour nos discussions physiques.

Origine :

Pour rendre compte du rôle de l'énergie parmi l'ensemble des phénomènes physiques, l'énumération des formes d'énergie est un moyen d'expression qu'il est difficile d'éviter. Cela peut être constaté dans une citation de *F. Mohr* (1837) datant du temps d'avant la découverte de la conservation de l'énergie : "En plus des 54 éléments chimiques connus il existe dans la nature encore un autre agent, dont le nom est Force : dans des circonstances appropriées, il apparaît comme du mouvement, de l'affinité chimique, de la cohésion, de l'électricité, de la lumière, de la chaleur et du magnétisme, et de chacune de ces formes d'apparence, toutes les autres peuvent advenir."

Remède :

Nous nous épargnerons des paroles inutiles en nous abstenant de toute différenciation. Il est souvent confortable de parler de bouteille de lait et de brique de lait. Il est complètement inutile, cependant, d'appeler le processus de le transférer ou de le boire "conversion du lait", ou de définir le contenu d'un verre ou de l'estomac comme différentes "formes de lait". La situation est la même quand on parle d'énergie. La solution la plus claire, mais peut-être pas la plus confortable, est de s'abstenir complètement de parler de formes d'énergie. Bien sûr, juste comme pour un patient qui abandonne pour la première fois ses béquilles après une longue période de convalescence, il faut du temps pour se familiariser avec sa liberté nouvellement acquise et aussi pour être capable de parcourir un terrain difficile.

Sujet :

Dans les manuels et les revues scientifiques on trouve souvent l'affirmation que les rayonnements électromagnétiques sont de l'énergie pure. Voici un exemple d'une telle formulation [1] : "Lorsqu'un positron rencontre un électron, les deux particules s'annihilent l'une l'autre et produisent de l'énergie pure sous la forme de rayonnement gamma." Ou un autre exemple [2] : "une particule massive et son anti-particule peuvent s'annihiler pour former de l'énergie, et une telle paire peut être créée à partir d'énergie." Un point de vue similaire est exprimé dans l'énoncé suivant [3] : "... la lumière peut aussi être décrite en termes de photons, quanta d'énergie émis de façon discrète."

Défaut :

Il est évident qu'une onde électromagnétique n'est pas de l'énergie pure. Le champ électromagnétique est un système physique, c'est-à-dire quelque chose pour laquelle chaque grandeur physique standard a une certaine valeur, et pas seulement l'énergie.

Ainsi, en général pour un champ électromagnétique, outre la seule énergie, les grandeurs extensives quantité de mouvement, moment cinétique et entropie ont aussi des valeurs non-nulles. Mais les grandeurs intensives ont aussi certaines valeurs, comme cela est également le cas pour d'autres systèmes. Ainsi le champ électromagnétique a une pression en tout point. (La pression dépend de la direction et est donc un tenseur.) Dans certains états, c'est-à-dire pour les états qui sont communément appelés rayonnement thermique, le champ a une certaine température et un certain potentiel chimique.

Associer le rayonnement à une grandeur unique est simplement incorrect. Le rayonnement est un système physique, quelque chose qui nous est donné par la nature. Des grandeurs physiques au contraire sont des produits de l'esprit humain. Elles sont des outils pour la description des systèmes.

De ce point de vue, un photon, la partie élémentaire du système "champ électromagnétique", est plus que seulement un quantum d'énergie. En plus de l'énergie, le photon porte aussi d'autres grandeurs extensives, telles que la quantité de mouvement et le moment cinétique.

La confusion entre les concepts "grandeur" et "système" se manifeste également dans un type de formulation souvent rencontrée dans laquelle l'énergie et la matière sont présentées comme deux concepts de même importance [4] : "ainsi si des galaxies s'éloignent toutes les unes des autres [...] il semble logique qu'elles furent un moment regroupées dans une sorte de mer dense de matière et d'énergie."

Origine :

Il y a probablement deux raisons à l'identification erronée de la grandeur "énergie" au système "champ électromagnétique." Apparemment, d'un côté l'énergie était vue comme plus qu'une simple variable dans une théorie, et de l'autre côté, le champ n'était pas pris au sérieux en tant que système.

Suite à l'introduction de l'énergie au milieu du 19ème siècle, sa très grande portée en science fut rapidement comprise. L'enthousiasme à propos de l'importance de la nouvelle grandeur conduisit cependant à une surévaluation et à une interprétation erronée. L'énergie était conçue, en particulier dans le cercle des "énergéticiens", comme une sorte de substance. Ainsi, on peut lire dans le livre *L'Énergie* [5] d'Ostwald en 1908 : "par conséquent, l'énergie est contenue dans toutes choses réelles et concrètes comme une composante essentielle, qui n'est jamais absente, et donc nous pouvons dire que l'énergie incarne la véritable réalité."

D'autre part, le concept de rayonnement électromagnétique n'était pas accepté comme nous le comprenons aujourd'hui. Nous savons maintenant qu'il est un système comme d'autres systèmes, par exemple un gaz parfait, ou le système de phonons d'un solide. Comme d'autres systèmes, le champ électromagnétique est composé de parties élémentaires. Ce que sont les molécules d'hydrogène au gaz hydrogène et ce que sont les phonons au réseau d'un solide, les photons le sont au champ électromagnétique.

Ce malentendu à propos de la grandeur physique "énergie", aussi bien qu'à propos du système physique "champ électromagnétique", a laissé des traces. Bien que nous ayons progressé depuis longtemps, nous employons encore facilement des phrases comme celles citées plus haut.

Remède :

Au lieu de dire que de l'énergie pure est créée dans une réaction entre un électron et un positron, dites qu'un photon en résulte. Et au lieu de dire que le rayonnement électromagnétique est de l'énergie pure, dites que le rayonnement porte de l'énergie, mais qu'en plus de l'énergie il porte aussi d'autres grandeurs extensives telles que de la quantité de mouvement, du moment cinétique et de l'entropie.

[1] *Scientific American*, December 1993, page 44

[2] *R. Penrose: The emperor's new mind*, 1989 (traduit en français sous le titre *L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique*, Paris, Dunod, 1998), Oxford University Press, page 308

[3] *Scientific American*, April 1993, page 26

[4] *Scientific American*, October 1994 page 32

[5] *W. Ostwald: Die Energie (L'énergie)*. – Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, page 5.

2.3 Puissance

Sujet :

Le nom “puissance” pour la grandeur physique P apparaissant dans l'équation $P = dW/dt$.

Défaut :

L'équation $P = dW/dt$ fait référence à une surface donnée. dW est l'énergie transmise à travers cette surface. Habituellement elle est appelée “le travail réalisé” par le système d'un côté de la surface sur ce qui est de l'autre côté. En conséquence, P est l'énergie transportée à travers la surface pendant l'intervalle de temps, ou en d'autres termes, le débit d'énergie, ou pour faire court, le courant d'énergie. Si l'énergie s'écoule le long d'un chemin bien défini, et si le courant d'énergie est le même en toute section transverse de ce chemin, alors P peut aussi être attribuée à la totalité du chemin ou du conducteur.

Ainsi, P a une signification simple. Cependant, la dénomination “puissance” n'exprime pas clairement cette signification. Elle suggère l'attribution du mot “puissance” au dispositif en son entier – un moteur électrique par exemple – plutôt qu'au câble menant au dispositif. Pour souligner qu'un processus de transport est en jeu, on parle parfois de “puissance transmise”. Cette façon de parler est particulièrement maladroite, puisque ce qui est transmis c'est l'énergie et non l'énergie par unité de temps.

Origine :

Le mot “puissance” pour la grandeur mentionnée ci-dessus apparut à une époque où la physique n'était pas encore capable de localiser ni l'énergie elle-même, ni les courants d'énergie. On était conscient que la diminution de l'énergie dans un système était liée à son augmentation dans un autre système. Toutefois, pour l'un des processus de transport d'énergie les plus importants, à savoir pour le transport de l'énergie électrique, une distribution du courant ne pouvait pas être définie. C'est pourquoi la grandeur P fut utilisée pour décrire le changement de la quantité d'énergie dans un système, c'est-à-dire dans un lieu donné. Ainsi, P fut attribuée à un corps ou à un dispositif, et non à une section transverse.

Remède :

Ne pas appeler la grandeur P “puissance” mais “débit d'énergie” ou “courant d'énergie.”

2.4 La loi de conservation de l'énergie

Sujet :

La formulation de la loi de conservation de l'énergie ne semble pas être triviale. Les citations (1) et (2) sont tirées de manuels scolaires et la citation (3) d'un cours de l'université.

(1) "L'énergie totale d'un corps peut être répartie en différentes formes d'énergie. – Sans le transfert d'énergie vers ou en provenance d'autres corps, l'énergie totale du corps reste constante"... "Si plusieurs corps sont impliqués dans l'échange et la transformation en l'absence de frottement, la somme des énergies cinétique, élastique et gravitationnelle demeure constante." ... "Si le frottement est pris en compte, les énergies internes des corps et de l'environnement font partie de la somme des énergies."

(2) "Théorème de la conservation de l'énergie mécanique : dans un système énergétiquement isolé la somme des énergies mécaniques demeure constante, aussi longtemps que les phénomènes mécaniques ont lieu sans frottement. L'énergie n'est jamais perdue, et aucune nouvelle énergie ne vient à apparaître; elle se transforme d'une forme mécanique à une autre... En vertu de ce théorème il existe une variable d'état pour un système énergétiquement isolé, appelée énergie mécanique, qui peut apparaître sous différentes formes, dont la valeur est toujours conservée. Par conséquent, l'énergie d'un tel système est une grandeur physique conservée."

(3) "Maintenant la loi de l'énergie peut être formulée comme ceci : la quantité de chaleur ΔQ fournie à un système depuis l'extérieur sert à augmenter son énergie interne ΔU , c'est-à-dire sa température ... ou bien son énergie électrique ou chimique, et sert à réaliser le travail ΔW , que nous considérerons comme négatif lorsqu'il est fourni par le système, de telle sorte que

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W."$$

Défaut :

Un fait simple est décrit de telle façon qu'il est à peine possible d'en reconnaître sa simplicité. On pourrait soutenir qu'avant de formuler le théorème de l'énergie, beaucoup de choses doivent être prises en compte. Toutefois, on devrait finalement l'énoncer en toute clarté : l'énergie ne peut être produite ou détruite. Et il ne devrait y avoir aucune hésitation avec cette phrase. Sinon le doute se fait jour inmanquablement, que la conservation elle-même est un concept difficile.

Origine :

Voir l'article "systèmes isolés".

Remède :

Formuler la conservation de l'énergie de la même façon que la conservation de la charge électrique, c'est-à-dire sans aucun "si" ou "mais", par exemple comme ceci : l'énergie ne peut être ni créée ni détruite.

Sujet :

La description verbale des processus de transport d'énergie et de bilan d'énergie par des énoncés comme les suivants :

“La puissance mécanique nous dit avec quelle rapidité le travail est réalisé.”

“Dans un système fermé la somme de toutes les énergies est constante.”

“Le travail mécanique qui est réalisé sur un corps est égal à la variation de son énergie.”

Défaut :

L'énergie est une grandeur extensive pour laquelle une loi de conservation est valide : quand la valeur de l'énergie dans un système A diminue, elle augmente dans un autre système B de la même quantité. Depuis la fin du 19^{ème} siècle, nous savons que cette loi n'est pas seulement valide sous cette forme globale. Il devint possible de définir une densité d'énergie ρ_E et aussi le chemin de l'énergie allant de A vers B, sous la forme de la densité de courant d'énergie \mathbf{j}_E . Ainsi, il devint possible de dire où est l'énergie et quel chemin elle prend pour aller d'un endroit à un autre. La conservation de l'énergie pourrait maintenant être exprimée au moyen d'une équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j}_E = 0$$

Les énoncés cités dans la partie “sujet” sont formulés de telle manière qu'ils ne font appel qu'à la forme la plus ancienne de la loi de conservation de l'énergie. En d'autres termes, ils autorisent l'idée d'une action à distance : l'énergie de B peut augmenter et celle de A diminuer sans l'intervention ou la participation d'un troisième système qui connecte A et B.

L'idée de l'énergie qui est ainsi favorisée est malencontreuse pour deux raisons : premièrement, elle ne reflète pas le point de vue moderne que les actions à distance n'existent pas, et deuxièmement, la description verbale d'un bilan d'énergie est inutilement compliquée.

Origine :

Immédiatement après l'introduction en physique de la grandeur physique énergie vers le milieu du 19^{ème} siècle, il n'y avait pas d'autre choix. La conservation de l'énergie pouvait être observée seulement en comparant le contenu en énergie de deux systèmes A et B. Il n'était encore pas clair si une distribution locale de cette grandeur pouvait être définie pour chaque cas, et on était encore incapable de spécifier un chemin pour l'énergie allant de A vers B. Uniquement pour le cas de la chaleur, ce qui avait lieu entre A et B était clair, mais cela ne l'était pas autant pour les transports d'énergie électrique ou mécanique.

La distribution locale de l'énergie à l'intérieur des champs électrique et magnétique fut alors donnée par Maxwell, mais l'énergie du champ devint une véritable grandeur locale seulement grâce aux travaux de Heaviside et de Poynting en 1884 [1].

Cependant, la question n'était pas encore résolue de manière générale. En 1892 Heinrich Hertz dans ses *Investigations à propos de la propagation de la force électrique* [2] était sceptique : “Un plus grand doute me semble concerner la question suivante : étant donné nos connaissances actuelles sur l'énergie, l'idée de sa localisation et de son écoulement d'un point à autre a-t-elle un sens ? De telles considérations n'ont pas encore été menées pour les échanges d'énergie les plus simples de la mécanique usuelle ; ainsi, la question demeure de savoir si et dans quelle mesure le concept d'énergie autorise un tel traitement.” Dans le même ouvrage un peu plus loin, il précise son point de vue avec l'exemple suivant : “Si une machine à vapeur entraîne une dynamo au moyen d'une courroie de transmission qui va et vient, et si la dynamo alimente une lampe à arc au moyen d'un câble qui va et vient, il est tout à fait usuel et incontestable de dire que l'énergie est transmise au moyen de la courroie du moteur à vapeur vers la dynamo et au moyen du câble de la dynamo vers la lampe. Mais y a-t-il un sens physique clair de prétendre que l'énergie se meut d'un point à un autre à travers la courroie tendue à l'inverse de la direction du mouvement de la courroie ? Et si non, cela a-t-il plus de sens de dire que l'énergie se déplace à l'intérieur des câbles, ou – d'après Poynting – dans l'espace entre les deux câbles d'un point à l'autre ? L'obscurité conceptuelle qui se révèle ici nécessite vraiment un éclaircissement.”

Toutefois, lorsque l'ouvrage de Hertz parut, l'obscurité était déjà levée. En 1891 Heaviside [3] décrivait aussi localement les transferts d'énergie mécanique. La situation devint même plus claire, en particulier pour le lecteur allemand, lorsqu'en 1898 Gustav Mie publia son travail complet “Aperçu d'une théorie générale du transfert d'énergie” [4]. Voici son opinion avec ses propres mots : “Si entre deux systèmes matériels A et B séparés dans l'espace, il y a seulement des transitions d'énergie qui sont liées à des variables d'état des points d'un corps C qui relie A et B, de telle façon qu'il est possible de calculer la transition d'énergie dE/dt seulement en utilisant l'état de tous les points de C, alors on dit que l'énergie dE a été transmise de A vers B à travers C. [...]. Les transitions d'énergie, c'est-à-dire tout changement de la répartition d'énergie dans l'espace, ne peuvent être réalisées que par transmission d'énergie.”

Les phrases citées au paragraphe “sujet”, qui sont typiques de notre façon actuelle de parler de l'énergie, montrent que le langage qui s'est développé immédiatement après l'introduction de l'énergie fut conservé comme si le travail de Poynting, Heaviside et Mie n'avait jamais été publié – au détriment de toutes ces jeunes personnes qui essaient d'avoir une idée claire à propos de la grandeur énergie.

Remède :

Introduire l'énergie de telle façon qu'il devienne clair dès le début que l'énergie est répartie dans l'espace, et qu'elle peut s'écouler. Formuler la conservation de l'énergie comme ceci : “l'énergie ne peut être ni créée ni détruite”.

Les concepts de *travail*, *puissance* et *forme d'énergie* sont superflus [5,6].

[1] *J. H. Poynting* : On the transfer of energy in the electromagnetic field (Sur le transfert d'énergie dans le champ électromagnétique), Phil. Trans. A 1884, p. 343-361

[2] *H. Hertz* : Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft (*Investigations à propos de la propagation de la force électrique*), Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1892, p. 234 et 293

[3] *O. Heaviside* : Electrician 27, 3. July 1891

[4] *G. Mie* : Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung (Proposition d'une théorie générale du transport d'énergie), Sitzungsbericht der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a, 1898, p. 1113-1181

[5] *G. Job* : Formes d'énergie, article 2.1 du présent ouvrage

[6] *F. Herrmann* : Puissance, article 2.3 du présent ouvrage

2.6 L'énergie potentielle

Sujet :

Tiré d'une encyclopédie :

“L'énergie potentielle est une des formes d'énergie de la physique. Elle est cette énergie qu'un corps possède du fait de sa position dans un champ de force (par exemple un champ gravitationnel ou électrique).”

D'un livre scolaire :

“Exemple : l'énergie potentielle d'un satellite...”

Défaut :

Dans ces citations, l'énergie potentielle est attribuée à un corps.

Si l'on est convaincu que l'énergie peut être localisée (et c'est la conviction générale de la physique depuis la fin du 19ème siècle), alors on comprendra les citations comme ceci : les corps contiennent de l'énergie potentielle. Et en conséquence : l'énergie potentielle doit être répartie à l'intérieur des corps d'une manière bien définie. Ces conclusions, cependant, ne seraient pas correctes. L'énergie potentielle n'est pas contenue dans les corps mais dans les champs qui sont principalement situés entre les corps.

En particulier notre seconde citation montre que quelque chose ne peut pas être correct. Si l'énergie potentielle est attribuée au satellite et ainsi localisée dans le satellite, alors l'énergie potentielle du système terre-lune serait localisée à l'intérieur de la lune, et quand finalement on considérerait un système binaire d'étoiles composé de deux étoiles de masse égale, l'énergie potentielle serait localisée dans une seule des étoiles – ce qui ne peut être vrai pour raison de symétrie. Parfois le terme énergie potentielle est aussi utilisé lorsque le transfert de quantité de mouvement entre deux corps ne se fait pas via un champ mais au moyen d'un ressort élastique. Dans ce cas, habituellement l'énergie est correctement attribuée au ressort. Toutefois, le terme “potentielle” pour l'énergie n'est pas approprié. Selon le dictionnaire Littré, l'adjectif “potentiel” signifie : “*qui est en puissance, virtuel, par opposition à effectif*”. Cette définition ne s'accorde pas avec l'énergie qui est emmagasinée dans un ressort. Tout comme l'énergie cinétique est contenue dans un corps en mouvement, l'énergie qui est fournie à un ressort quand on le met en extension est stockée à l'intérieur du ressort. Pour ces deux énergies, une distribution de densité peut être donnée (c'est-à-dire l'énergie peut être localisée) et elles peuvent toutes deux (en principe) être mesurées par l'augmentation de la masse relativiste.

Origine :

Cette dénomination malencontreuse semble avoir plusieurs causes ou origines.

1. Le concept d'énergie potentielle provient d'une époque où l'énergie ne pouvait pas encore être localisée (avant 1890).

2. Dans l'enseignement, le concept est habituellement introduit en considérant un petit corps dans le champ gravitationnel de la terre. Dans ce cas l'énergie potentielle peut être calculée au moyen de l'équation $E = m \cdot g \cdot h$. Ici h est la hauteur du petit corps par rapport à une origine qui est fermement liée à la terre. h n'apparaît pas comme la distance entre deux corps, en l'occurrence le petit corps et la terre, et h n'apparaît pas comme la hauteur de la terre au-dessus du petit corps, mais comme celle du petit corps au-dessus de la terre ou de la surface de la terre.

3. Souvent, le contexte dans lequel le terme est employé est le mouvement de deux corps qui interagissent gravitationnellement, et où la masse de l'un des corps est bien plus grande que celle de l'autre. Considérons la célèbre pomme qui tombe et commençons par le bilan de quantité de mouvement (par rapport au centre de masse du système) : seules la terre et la pomme participent au processus ; la quantité de mouvement que la pomme gagne est perdue par la terre. La quantité de mouvement du champ est presque nulle et ne contribue presque pas au bilan de quantité de mouvement. Les choses sont différentes quand nous considérons l'énergie. L'énergie cinétique de la terre ne change pratiquement pas (puisque la masse de la terre est bien plus grande que la masse de la pomme). L'énergie que la pomme reçoit ne vient pas de la terre mais du champ gravitationnel.

La même chose est vraie lorsque deux corps sont couplés par un ressort au lieu d'un champ. Ici aussi, l'échange de quantité de mouvement est entre les deux corps, alors que l'échange d'énergie est entre le corps léger et le ressort.

Remède :

Petite solution : éviter des formulations qui attribuent l'énergie potentielle à un corps. Voici un exemple d'un autre manuel scolaire :

“L'énergie potentielle du système “terre - corps de masse m ” par rapport à un niveau de référence, qui peut être choisi arbitrairement, est...”

Les termes employés sont meilleurs que ceux de nos citations initiales. Cependant, il suggère encore l'idée d'actions à distance, puisque le système est appelé “terre – corps de masse m ”. Le champ en tant que partie du système complet n'est pas mentionné.

Grande solution : introduire le champ dès le tout début comme le troisième partenaire et dire clairement où l'énergie est localisée, à savoir dans le champ.

L'adjectif potentiel devrait être évité dans tous les cas.

2.7 Mouvement perpétuel et loi de conservation de l'énergie

Sujet :

Brockhaus* 1839 [1] : “Machine à mouvement perpétuel : une machine qui, grâce à la force motrice qu'elle génère, demeurerait en mouvement permanent, mais dont la réalisation est de nos jours considérée comme impossible, puisque des lois bien connues de la nature l'en empêche. Dans les temps anciens, de même que la pierre philosophale, l'élixir de vie etc., elle appartenait aux choses dont se pavanaient les charlatans et dont la découverte était l'ambition de mécaniciens et de mathématiciens.”

Brockhaus 1910 [2] : “Perpetuum mobile (latin), un corps qui se meut de manière incessante, en particulier un dispositif mécanique souvent désiré, mais qui est prouvé être impossible du fait de la loi de conservation de l'énergie, qui serait capable de renouveler sa force grâce à son propre mouvement.”

Brockhaus 1953 [3] : “Perpetuum mobile de la première espèce, une machine qui fournit de l'énergie en permanence sans nécessité d'un quelconque travail ; est en contradiction avec la loi empirique de conservation de l'énergie.”

Une publication du bureau fédéral des brevets de 1985 [4] : “Le tribunal fédéral des brevets indique que la ‘loi de conservation de l'énergie qui est reconnue et irréfutée dans l'ensemble des sciences de la nature’ selon laquelle ‘l'énergie ne peut être créée ou détruite dans un quelconque processus physique’, mais peut seulement ‘être convertie d'une forme dans une autre’.”

Défaut :

L'assertion qu'une machine à mouvement perpétuel (PM) de la première espèce ne peut pas fonctionner parce qu'elle violerait la loi de conservation de l'énergie, est un peu courte.

Imaginez que vous ne connaissiez pas la loi de conservation de l'énergie et que vous vouliez prouver qu'une machine à mouvement perpétuel qui a été proposée par quelqu'un ne peut pas marcher, sans l'essayer expérimentalement. Il sera facile d'en apporter la preuve, puisque, outre la loi de conservation de l'énergie, il y a toujours d'autres lois qui sont aussi violées : d'autres lois de conservation, les équations de Maxwell, la loi de la gravitation etc. Des machines à mouvement perpétuel mécaniques violent habituellement les lois de Newton, c'est-à-dire la loi de conservation de la quantité de mouvement, ou bien elles violent la loi de conservation du moment cinétique.

La discussion bien connue parmi les physiciens, pour savoir pourquoi une certaine proposition habile d'un perpetuum mobile ne peut marcher, montre également que la conservation de l'énergie n'est pas le seul obstacle. Bien que les participants sachent parfaitement que la conservation de l'énergie n'est pas respectée, ils considèrent la réfutation satisfaisante seulement quand une raison supplémentaire est trouvée, c'est-à-dire s'il y a violation d'une autre loi physique.

Effectivement la loi de conservation de l'énergie est un outil pratique pour montrer que certains processus ne peuvent pas se produire. Mais elle ne joue pas un rôle prééminent pour notre affaire.

Origine :

Puisque l'objectif affiché des inventeurs de PM est de violer la loi de conservation de l'énergie, il est pertinent d'utiliser cet argument pour réfuter la réalisabilité d'une telle machine. Apparemment, les inventeurs de PM, qui peuvent être trouvés encore de nos jours, n'ont pas trop d'imagination. Ils se concentrent seulement sur des dispositifs qui violent la conservation de l'énergie. La raison pourrait être qu'ils considèrent l'énergie comme une précieuse marchandise. Ils semblent ne pas comprendre qu'ils peuvent faire autant d'argent en violant toute autre loi de la physique.

Remède :

Les machines à mouvement perpétuel (qui ne fonctionnent pas) sont de beaux et utiles sujets pour des discussions de physique. On ne devrait pas écarter ce thème en disant que la loi de conservation de l'énergie est violée. Sinon il en résultera l'impression que la structure de la physique est telle qu'on peut imaginer un monde dans lequel les lois de la physique sont les mêmes que dans notre monde sauf pour une loi quelconque qui serait remplacée par une autre.

**Brockhaus* est une encyclopédie allemande réputée.

[1] Bilder-Conversations-Lexikon, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1839

[2] Brockhaus' Kleines Konversations-Lexikon, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1910

[3] Brockhaus ABC der Naturwissenschaft und Technik, VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1953

Sujet :

Pour formuler la conservation de l'énergie ou d'autres grandeurs physiques, nous nous référons souvent à un système isolé. Nous imaginons une région de l'espace dont les frontières sont imperméables à un courant de la grandeur considérée. Les citations (1) et (2), qui traitent de la conservation de l'énergie, sont tirées de livres pour le lycée et sont soulignées dans ces ouvrages.

(1) "Dans un système thermiquement et mécaniquement isolé l'énergie totale est constante."

(2) "Dans un système isolé la somme de toutes les énergies est toujours constante. L'énergie totale est conservée."

$$E_{\text{total}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \text{constant}$$

E_1, E_2, \dots, E_n différentes formes d'énergie"

Défaut :

Le concept de conservation d'une grandeur extensive ou de type-substance n'est pas un concept difficile. Cela est lié au fait que nous pouvons facilement nous représenter ces grandeurs de manière imagée : nous les imaginons comme une sorte de fluide ou de matière. La conservation d'une grandeur X peut alors être énoncée de la façon suivante : "X ne peut pas être produite et ne peut pas être détruite."

Ici les termes exacts ont peu d'importance. La conservation est quelque chose que nous pouvons facilement exprimer avec des mots du langage courant.

Une conséquence de cet énoncé est que la valeur de X dans une région de l'espace ne peut changer que si un courant de X s'écoule dans ou hors de la région. Mathématiquement cet énoncé peut être exprimé de la façon suivante :

$$\frac{dX}{dt} + I_x = 0.$$

Ici dX/dt est le taux de variation de X dans la région considérée et I_x est le flux de X à travers la surface frontière.

Une formulation du principe de conservation de l'énergie pour un système isolé est un cas particulier de cet énoncé. "Le système est isolé" signifie qu'il n'y a pas d'écoulement à travers la surface frontière. Cependant, l'isolement est une restriction inutile parce que les grandeurs considérées sont conservées indépendamment du fait que le système soit fermé ou non.

Pour me convaincre que le nombre de mes étudiants "est conservé", il n'est pas besoin de fermer la porte de la salle de classe. Il n'y a pas de problème si, de temps en temps, quelqu'un rentre ou sort, du moment que j'établis que le nombre d'étudiants dans la classe augmente de un quand quelqu'un entre, et diminue de un quand quelqu'un sort.

Origine :

Le fait que nous formulons la conservation avec une référence à un système isolé est un vestige du développement difficile du concept d'énergie en tant que grandeur de type-substance. Jusqu'à peu avant le début du 20ème siècle, le caractère localisable de l'énergie n'était pas reconnu. Il n'était pas encore possible de lui associer une densité, un courant et une densité de courant. En 1887 Max Planck [1] écrivit dans une étude historique sur l'énergie :

"... selon cette définition la quantité de l'énergie est mesurée seulement par ces effets externes, et si l'on veut attribuer un quelconque substrat matériel imaginaire à l'énergie, alors on doit le chercher dans l'environnement du système ; uniquement là l'énergie trouve son explication et donc aussi son existence conceptuelle. Tant qu'on fait complètement abstraction de l'effet externe d'un système matériel, on ne peut parler de son énergie, puisque elle n'est alors pas définie... D'un autre côté, nous voyons à partir de la forme de ce principe tel que construite autrefois que l'énergie d'un système demeure constante, si un processus effectué avec le système ne cause aucun effet extérieur, quelque soient les effets intérieurs. Cette observation nous conduit à concevoir l'énergie contenue dans un système comme une grandeur existant indépendamment des effets externes." Et plus loin : "En attendant, il est indubitable... qu'avec cette interprétation de type-substance de l'énergie nous obtenons non seulement un accroissement dans la clarté conceptuelle mais aussi un progrès direct dans la compréhension... Toutefois, dès qu'on aborde cette question, l'incertitude, qui était déjà présente dans le concept même, prend la forme d'un problème physique qui peut être en principe résolu..."

Cette solution vint quelques années plus tard grâce à Gustav Mie [2]. Il montra que le principe de conservation de l'énergie peut être formulé localement, à savoir sous la forme d'une équation de continuité. Dès lors, l'étrange séparation entre le système et les effets qui peuvent être observés seulement dans l'environnement n'était plus nécessaire.

Ainsi, il fallut environ 50 ans pour prouver la nature de type-substance de l'énergie. Cependant, l'attente que cette grandeur possède cette propriété était présente dès le début : Ostwald [3] dans son fascicule de 1908, *L'énergie*, faisait l'éloge des travaux de Robert Mayer avec les mots suivants : "Pour notre enquête générale, le résultat essentiel des travaux de Mayer est la conception de type-substance de ce qu'il appelle force, c'est-à-dire l'énergie. Pour lui c'était une entité bien définie ; l'indestructibilité et l'improductibilité sont caractéristiques pour sa réalité."

Remède :

Nous énonçons la loi de conservation de la grandeur X de type-substance de la manière suivante : "Énergie, quantité de mouvement, moment cinétique, charge électrique ... ne peuvent être produits et ne peuvent être détruits."

Tout aussi importants sont les énoncés concernant la non-conservation d'une grandeur de type-substance, par exemple : "L'entropie peut être produite mais ne peut être détruite."

[1] *M. Planck*: Das Prinzip der Erhaltung der Energie (Le principe de conservation de l'énergie), B. G. Teubner, Leipzig, 1908, p. 115.

[2] *G. Mie*: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung (Proposition d'une théorie générale du transport d'énergie), Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVII. Band, VIII. Heft, 1898, p. 1113.

[3] *W. Ostwald*: Die Energie (L'énergie). Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, p. 59.

3

Électricité et magnétisme

Sujet :

Les bornes des alimentations électriques et des batteries sont marquées avec un signe plus et un signe moins. Quand on parle de circuits électriques simples, on dit souvent qu'il y a un excès d'électrons au niveau de la borne moins et un déficit d'électrons au niveau de la borne plus.

Défaut :

Nous avons ici affaire à deux incohérences, qui sont liées l'une à l'autre. Nous montrerons que

- il est maladroit de marquer les bornes avec des signes plus et moins ;
- il est souvent maladroit, et quelquefois incorrect, de dire qu'il y a un excès d'électrons à la borne de plus bas potentiel et un déficit à la borne de potentiel le plus élevé.

Les signes plus et moins suggèrent qu'une certaine grandeur physique a une valeur positive ou négative au niveau de la borne correspondante. Une telle grandeur existe-t-elle ?

On pourrait penser à la charge électrique. Demandons-nous d'abord quelle quantité de charge se trouve sur les bornes d'une batterie, y compris les électrodes correspondantes. Sa valeur dépend de la capacité C_B de la batterie. Nous traitons ainsi la batterie comme un condensateur. La charge électrique portée par les bornes, ainsi que les électrodes et les conducteurs internes, est

$$Q = C_B \cdot U_B, \quad (1)$$

où U_B est la tension de la batterie. Q serait la charge portée par la borne (et l'électrode) si le point milieu entre les électrodes était au potentiel de la terre. Le potentiel électrique de l'électrode plus serait ainsi de $U_B/2$ au-dessus et l'électrode moins de $U_B/2$ en-dessous du potentiel de la terre. Cependant, ceci est un cas particulier qui n'est presque jamais réalisé. En général, le potentiel moyen de la batterie sera différent du potentiel de la terre et ainsi la batterie possèdera une charge nette, dont la contrepartie réside dans la terre. La charge nette est alors :

$$Q = C_{\text{plus}} \cdot U_{\text{plus}} + C_{\text{moins}} \cdot U_{\text{moins}},$$

où C_{plus} et C_{moins} sont les capacités des bornes plus et moins par rapport à la terre, et U_{plus} et U_{moins} les tensions entre les bornes et la terre. Les capacités C_{plus} et C_{moins} sont typiquement du même ordre que C_B , tandis que U_{plus} et U_{moins} dépendent du circuit entier ; celui-ci peut être mis à la terre en un point, mais il peut aussi être porté à un potentiel important, positif ou négatif. Ainsi en général, on ne peut pas dire que la borne plus porte une charge positive et la borne moins une charge négative.

Ces considérations montrent que les signes plus et moins sur les bornes d'une batterie ne correspondent pas au potentiel électrique. La borne plus ne doit pas être à un potentiel positif et la borne moins ne doit pas être à un potentiel négatif. Et il n'y a pas d'autre grandeur qui pourrait être caractérisée correctement par les signes plus et moins.

Il n'y a aucun doute sur le fait que cette désignation est la cause de conclusions incorrectes.

Il s'ensuit également que l'affirmation selon laquelle il y a un excès d'électrons au niveau d'une borne et un déficit sur l'autre ne peut pas être correcte en règle générale. Un étudiant croira qu'une telle affirmation signifie que la borne plus n'est pas électriquement neutre mais qu'elle porte une charge positive. Nous venons de voir que cela peut ne pas être vrai.

Mais même si nous parvenons à régler les potentiels électriques de façon que le potentiel à la borne plus soit positif et celui à la borne moins négatif (quand le potentiel de la terre est défini comme nul), afin que la borne plus soit chargée positivement et la borne moins négativement, même alors il serait déplacé de caractériser les bornes en parlant d'un excès ou d'un défaut d'électrons.

La capacité C_B dans l'équation (1) est de l'ordre de 10^{-10} F. Puisqu'une tension est typiquement de 1 V, l'excès de charge est de l'ordre de 10^{-10} C. Quand on mentionne un excès ou un défaut d'électrons, on suggère que cela a à voir avec le flux de charge ou d'électrons qui circulent dans le circuit dans des conditions classiques. Cependant, la charge qui traverse en une seconde une section de fil d'un circuit comportant une lampe à incandescence est dix ordres de grandeur plus importante.

Le caractère inapproprié de l'argument peut encore mieux être vu quand on compare la batterie dans un circuit électrique avec une pompe dans un circuit hydraulique. Une batterie sans charge correspondrait à une pompe remplie d'eau, mais avec l'aspiration et le refoulement bloqués. Personne ne caractériserait l'aspiration et le refoulement en disant qu'il y a un excès ou un déficit d'eau. Les très faibles excès et déficit qui existent en réalité sont dus à la compressibilité non nulle de l'eau. Mais nous voyons immédiatement que cet excès n'est pas une condition nécessaire du fonctionnement de la pompe. La pompe marcherait tout aussi bien avec un liquide de compressibilité nulle.

Origine :

La plupart des sujets de notre rubrique concernent des concepts ou des descriptions qui ont été justifiés à une époque précédente. Ici nous avons un exemple d'une incohérence qui a été une incohérence depuis le début.

Remède :

Caractériser les bornes d'une batterie ou d'une alimentation électrique avec "haut" (high : H) et "bas" (low : L) plutôt qu'avec plus et moins. C'est d'un usage commun chez les ingénieurs électroniciens. Ces étiquettes font référence au potentiel électrique. Une autre possibilité serait de les désigner en tant que "sortie" (out) et "entrée" (in), qui font référence à la charge électrique, et non aux électrons.

3.2 Deux types de charges électriques

Sujet :

La charge électrique existe sous deux formes, appelées positive et négative. Des charges identiques se repoussent et des charges opposées s'attirent.

Défaut :

Comme la charge électrique est une grandeur physique, le texte ci-dessus suggère qu'il y en a deux. Appelons les Q_A et Q_B . Nous pouvons en effet décrire l'état électrique d'un corps en indiquant combien de Q_A et combien de Q_B il contient. Cependant, les grandeurs Q_A et Q_B ont une propriété désagréable : aucune des deux, prises séparément, n'est une grandeur conservée. Cependant la production et la destruction des deux sont couplées : la production de Q_A s'accompagne d'une production égale de Q_B . Mathématiquement et conceptuellement il est plus simple d'utiliser une seule grandeur "charge électrique", qui peut admettre des valeurs positives ou négatives. Bien sûr, pour cette grandeur, un principe de conservation est valide.

Il y a même encore plus de désordre dans le cas des pôles magnétiques. Alors que dans le cas électrique les termes "positive" et "négative" suggèrent la relation mathématique entre les deux "types" de charge, les dénominations "nord" et "sud" ne suggèrent pas du tout que l'intensité d'un pôle magnétique peut être décrite par une seule grandeur extensive. Les noms "nord" et "sud" suggèrent que les pôles d'un aimant ont des qualités différentes, entre lesquelles il n'y a pas de transition, comme pour les propriétés "mâle" et "femelle" des personnes ou des animaux.

Origine :

Quand on a découvert les phénomènes électrostatiques, la question était de savoir s'il y avait deux fluides électriques distincts ou seulement un fluide unique. Des vestiges de la théorie des deux fluides sont restés jusqu'à ce jour.

Remède :

Eviter de parler de formes d'électricité. Il n'existe qu'une seule grandeur physique "charge électrique" qui peut admettre des valeurs positives et négatives. Appeler les pôles d'un aimant pôle positif et pôle négatif. Au lieu de parler de charges identiques et opposées (respectivement de pôles magnétiques), les appeler respectivement charges électriques ou magnétiques de même signe ou de signe opposé.

Sujet :

Le sens attribué à un courant électrique est basé sur une convention. Avant que l'on découvre le sens véritable du flux d'électrons, le sens du courant électrique a été défini de telle façon que le courant s'écoule du pôle positif au pôle négatif d'une source de courant (dans la partie externe du circuit).

Défaut :

Quand on demande le sens d'un courant électrique, on demande l'orientation d'un vecteur. Le vecteur qui caractérise la direction du courant électrique est le vecteur densité de courant, tout comme le vecteur densité de flux d'énergie caractérise la direction du flux d'énergie ou le vecteur densité de flux de masse nous dit quelle est la direction d'un flux de masse. Maintenant, la direction du vecteur densité de courant électrique ne dépend pas d'une convention. Elle provient de l'équation de continuité pour la charge électrique, qui relie la densité de charge ρ à la densité de courant \mathbf{j} :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0$$

L'équation nous dit que la densité de charge ρ diminue en un endroit donné si la divergence de \mathbf{j} est positive en ce même endroit. En d'autres termes : la charge électrique décroît dans une petite région si un courant électrique en sort. Cette affirmation est analogue à la suivante : la quantité d'eau contenue dans un réservoir diminue si un écoulement en sort.

Nous voyons que l'orientation du vecteur densité de courant est définie dès que nous nous sommes occupés du signe de la charge électrique. Nous pouvons en effet redéfinir le sens du courant électrique, mais seulement en redéfinissant le signe de la charge électrique. Si nous voulons garder le signe moins pour les électrons et le signe plus pour les protons, il ne reste alors pas d'alternative pour le sens du courant électrique.

Origine :

Quand on affirme que le sens du courant électrique est basé sur une convention, il ne s'agit pas de la direction du vecteur densité de courant \mathbf{j} , mais de la direction du mouvement des porteurs de charge mobiles, c'est-à-dire le vecteur de la vitesse de dérive \mathbf{v} des porteurs. Les deux grandeurs vectorielles sont reliées par

$$\mathbf{j} = \rho \cdot \mathbf{v}.$$

Il n'importe pas que les porteurs de charge positive se déplacent dans un sens ou ceux de charge négative dans l'autre – le sens de la densité de courant est le même.

Puisque le sens de \mathbf{v} est le même que celui de la densité de courant de masse ou de la densité de courant de particules des porteurs de charge, on peut diagnostiquer que le courant de charge est confondu avec le courant de masse ou de particules.

Remède :

Faire vraiment la distinction entre les concepts de charge et de porteur de charge. Distinguer aussi entre deux directions : la direction de l'écoulement de la charge électrique et la direction du mouvement des porteurs de charge (ou la direction du vecteur densité de courant de masse). Tandis que la charge électrique s'écoule (en dehors de la batterie ou de la source de courant) d'un potentiel élevé à un potentiel plus bas, les porteurs de charge se déplacent dans un sens ou dans l'autre selon le signe de leur charge.

Pour que la distinction soit bien claire pour les élèves, je fais en classe l'expérience suivante : des élèves assis dans une rangée passent des jetons rouge et bleu à chacun de leurs voisins. Nous imaginons que chaque jeton rouge vaut 10 euros et chaque jeton bleu moins 10 euros. Chaque élève, à l'exception du premier et du dernier, possède un jeton rouge et un bleu, c'est-à-dire un montant égal à zéro. Le premier et le dernier élève possèdent autant de jetons que nécessaire. Nous réalisons maintenant plusieurs transferts de monnaie de l'élève le plus à gauche vers celui le plus à droite. Un métronome bat le rythme et à chaque battement chaque élève passe un jeton à son voisin. Le premier transfert est comme suit : à chaque battement du métronome, chaque élève passe un jeton rouge à son voisin de droite. Ainsi chaque élève reste avec une somme nulle, à l'exception des deux en fin de rangée : le plus à gauche s'appauvrit de plus en plus, le plus à droite s'enrichit de plus en plus. Ensuite nous réalisons le transfert de monnaie de la gauche vers la droite d'une autre façon : à chaque battement du métronome chaque élève passe un jeton bleu à son voisin de gauche. Là encore tous les élèves de la chaîne restent avec zéro euro excepté ceux aux deux bouts, et encore une fois celui de gauche devient plus pauvre et celui de droite plus riche. Une troisième possibilité pour le transport de monnaie de la gauche vers la droite est que chaque élève passe un jeton rouge à son voisin de droite et en même temps un jeton bleu à celui de gauche. Dans chacun de ces trois transferts, l'argent va de la gauche vers la droite tandis que les "porteurs d'argent", c'est-à-dire les jetons, se déplacent dans l'une ou l'autre direction.

Sujet :

Les formulations suivantes, dans lesquelles le mot “courant” apparaît sans article, sont tirées de livres de cours de physique et d’internet : “Le sens conventionnel du courant suppose que du courant s’écoule hors de la borne positive d’une source de puissance.” “Quand une différence de potentiel est appliquée à un élément résistif, du courant circule selon la loi d’Ohm...” “L’écoulement d’eau à travers un système de tuyaux peut être utilisé pour comprendre l’écoulement de courant à travers un circuit électrique.”

Défaut :

Par un courant électrique nous comprenons en physique l’écoulement de charge électrique à travers un medium conducteur. Ainsi le terme *courant électrique* décrit un phénomène.

Peut-être le lecteur peut ne pas avoir noté quoi que ce soit de répréhensible dans les citations ci-dessus. Mais rappelons une règle de grammaire : aucun article n’est employé devant des noms indénombrables quand on en parle en général. Parmi les noms indénombrables figurent toutes les substances :

“l’anneau est fait d’or”, “l’eau s’écoule vers le bas”, “l’hydrogène réagit avec l’oxygène en formant de l’eau”, “l’air chaud monte”, “j’ai besoin d’argent parce que je veux acheter du vin”.

Dans toutes nos citations initiales le nom “courant” est employé sans article. Si par courant nous entendons réellement un phénomène, alors nous devons l’employer avec un article. Nous devons parler du courant électrique de la même façon que nous parlons d’un courant d’eau ou d’un flot de personnes ou d’un flux d’argent, c’est-à-dire toujours avec un article.

Si, comme dans nos citations initiales, j’ometts l’article, alors la signification de la phrase est clairement : je parle d’une sorte de substance, comme le vin, l’or ou l’argent.

L’expression “écoulement de courant”, qui est souvent trouvée même dans la littérature scientifique, est particulièrement intéressante. Comparez-la avec “écoulement d’eau” qui signifie de l’eau qui s’écoule. Ainsi écoulement de courant voudrait dire courant qui s’écoule. Le courant semble être quelque chose qui peut, mais qui n’est pas obligé de s’écouler. A nouveau nous voyons que le mot courant est employé pour une entité de type substance. Il est facile d’identifier ce qui est sous-entendu par du courant (sans un article) : la charge électrique. Les citations deviennent correctes en remplaçant le mot courant par charge électrique.

Origine :

Probablement simplement l’usage peu réfléchi du langage par les experts. Leur tâche n’est pas de préserver et de cultiver la langue.

Remède :

1. Dans l’enseignement de la physique, utilisez le mot courant uniquement pour désigner un phénomène et donc utilisez-le seulement avec un article. On pourrait se plier à l’habitude des experts en autorisant l’usage du mot *courant* ou *courant électrique* en tant que dénomination pour la grandeur I , c’est-à-dire l’intensité du courant électrique. Mais si nous faisons ainsi, nous devrions dire explicitement à nos étudiants, que nous utilisons le même mot avec deux sens différents : comme un nom d’un phénomène et comme un nom d’une grandeur physique.

2. Quand nous parlons de quoi que ce soit qui s’écoule, dites aux étudiants dès le début ce qu’est ce qui s’écoule : de l’eau, de la charge électrique, de l’énergie... Ne dites jamais que du courant s’écoule.

* *NdT : en français, l’expression du partitif, servant à exprimer une quantité indénombrable ou une partie d’un ensemble, fait appel aux articles « du », « de l’ » ou « de la ». Mais en anglais (et en allemand), l’expression du partitif se fait sans mettre aucun article devant le nom. Le titre original (“The current and its article”) se comprend alors.*

Même si l’intérêt de cette question apparaît moindre en français, nous en proposons une traduction à titre informatif, car il permet de faire la distinction entre article partitif et article défini ou indéfini. Nous avons choisi une traduction littérale, qui n’élimine donc pas les incohérences de sens, car le mot “courant” est toujours précédé d’un article en français !

Sujet :

L'intensité du champ électrique est habituellement définie par l'équation suivante :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q}$$

“Nous entendons par intensité du champ le rapport de la force agissant sur une charge sur la valeur de la charge.”

Certains auteurs pensent être plus précis quand ils définissent :

$$\mathbf{E} = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{Q}$$

Défaut :

Quand on introduit l'intensité du champ électrique à l'aide de l'équation

$$\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{E} \quad (1)$$

on le fait souvent avec deux objectifs. Tout d'abord, on souhaite présenter une procédure qui permet de déterminer la valeur du champ électrique, mais on souhaite également fournir une idée intuitive de la grandeur physique “champ”. Nous pensons que l'introduction de \mathbf{E} à l'aide de l'équation (1) répond mal à ces objectifs.

1. Je ne peux pas me souvenir dans ma longue vie de physicien d'avoir jamais déterminé l'intensité d'un champ électrique en employant l'équation (1). Cela ne signifie pas du tout que je n'ai rien eu à faire avec la notion de champ électrique. Au contraire, j'ai calculé et mesuré des intensités de champ électrique à de nombreuses occasions – mais sans utiliser l'équation (1). Les forces électriques considérées dans l'équation (1) sont, à l'échelle macroscopique, si faibles qu'on ne serait guère satisfait de telles mesures.

Mais comment l'intensité du champ électrique est-elle déterminée en pratique ? En principe n'importe quelle équation contenant la quantité \mathbf{E} peut être employée à cet effet. Dans le cas du champ électrique homogène d'un condensateur plan, il est particulièrement pratique d'employer la relation $E = U/d$. Une autre équation utilisable est la suivante :

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{2} \mathbf{E}^2$$

La contrainte mécanique ou densité du courant de quantité de mouvement σ est obtenue à partir de la force (courant de quantité de mouvement) divisée par l'aire de la surface considérée. Pour un condensateur plan, il faut mesurer la force qu'une plaque exerce sur l'autre.

Un autre problème concernant la mesure de \mathbf{E} via $\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{E}$ est que la procédure n'est pas vraiment transparente. En effet, l'intensité du champ mesuré n'est pas la même que celle du champ présent à l'endroit où est positionnée la charge servant au test. Pour cette raison certains auteurs préfèrent indiquer que cette “charge test” doit être petite ou même doit tendre vers zéro. On peut alors croire que le processus de mesure est ainsi conceptuellement plus clair. De fait, il paraît plausible que cette charge doive être petite. Nous savons tous pour d'autres types de mesures que l'instrument de mesure ne doit pas perturber le système sur lequel une mesure est réalisée (un voltmètre doit avoir une grande résistance interne, un thermomètre une faible capacité thermique). Dans notre cas cependant une valeur importante de la charge test n'induit pas d'erreur dans la mesure de \mathbf{E} (pour autant qu'aucune induction électrostatique n'ait lieu, c'est-à-dire pour autant que toutes les charges électrostatiques soient fixes dans l'espace). En fait, la charge servant au test peut avoir n'importe quelle valeur. Cette valeur peut même être beaucoup plus importante que celle des charges qui sont à l'origine du champ \mathbf{E} sans introduire d'erreur sur la mesure.

Ainsi, la charge test n'a pas à être petite. Si elle est choisie petite, se pose alors le problème que la force qui est déjà faible, devient encore plus faible.

2. Si la représentation mentale du champ électrique repose sur l'équation (1), on pourrait en conclure que la force exercée sur la charge servant au test serait la seule propriété du champ. Ce serait là un mauvais début pour l'étude de l'électrodynamique car le but ultime est d'imaginer le champ électrique comme un système physique à part entière. N'oublions pas que la plupart des aspects électromagnétiques ne sont pas liés à des charges électriques. Celles-ci concernent uniquement l'interaction entre les champs électromagnétiques et la matière.

Origine :

Le grand maître Maxwell fit cela dans une des premières pages de son œuvre de 1000 pages. Cela a pu lui sembler naturel car son intention était d'expliquer l'ensemble de l'électromagnétisme de façon mécanique.

Remède :

Ne liez pas l'idée de champ électrique en premier lieu à la force sur une charge test. Introduisez le champ comme un système discret avec différentes propriétés. Indiquez que le champ est une réserve d'énergie. Puis indiquez qu'il peut être caractérisé par une grandeur vectorielle unique. C'est seulement ensuite que vous pouvez introduire des procédures permettant de mesurer le champ électrique, mais pas seulement au moyen de la mesure de la force qui s'exerce sur une charge test.

3.6 Où est le champ ?

Sujet :

Pour représenter graphiquement un champ, on utilise presque exclusivement des figures représentant les lignes de champ.

Défaut :

Les lignes de champ peuvent induire en erreur quand on s'interroge sur la localisation du champ. Comme le champ est localisé dans l'espace et que son intensité change suivant la localisation, on pourrait penser que cette question n'a pas de sens. Mais elle en a un. Quand on demande où est l'air de l'atmosphère de la terre, on sait comment répondre : en spécifiant la distribution de la densité de l'air. Qualitativement on pourrait dire : la plus grosse quantité d'air est en bas, il y a peu d'air à haute altitude et presque plus au-delà de 40 km.

La seule grandeur d'un champ avec les caractéristiques d'une densité est la densité d'énergie. Ainsi si nous voulons avoir une idée de la localisation d'un champ, ou de la façon dont il est distribué dans l'espace, il est raisonnable de s'intéresser à la densité d'énergie. Cependant la figure des lignes de champ ne donne pas une information adéquate sur la densité d'énergie, car nous l'interprétons intuitivement comme un diagramme de lignes de flux.

Considérons une sphère de rayon R électriquement chargée. Le flux du champ électrique à grande distance, c'est-à-dire pour une grande distance r du centre, est identique à celui pour une faible valeur de r . Ainsi une figure de lignes de champ suggère que dans un élément lointain de volume d'épaisseur dr , il y a la même quantité de champ que dans un élément plus proche de même épaisseur dr .

Une telle conclusion serait correcte pour un objet rayonnant comme une étoile, si la densité d'énergie était prise comme une mesure de la quantité de champ électrique : l'énergie est la même dans chaque élément de volume d'épaisseur dr .

Pour un champ électrique statique toutefois, une telle conclusion serait erronée. L'intensité du champ électrique diminue en puissance 2 de r , la densité d'énergie en puissance 4. Par conséquent, 90% de l'énergie du champ est localisé dans une sphère de rayon $10 R$, 99% dans une sphère de rayon $100 R$. On peut dire que, dans ce sens, le champ est localisé dans une région relativement petite autour de la sphère chargée.

Considérons maintenant un autre exemple : le champ magnétique créé par un solénoïde. Le graphique des lignes du champ suggère que le champ est plus concentré dans le solénoïde, mais qu'une part considérable de la "quantité de champ" est localisée en dehors de celui-ci. Une fois encore l'impression est très différente quand on considère la distribution d'énergie. Si le solénoïde n'est pas trop court, presque toute l'énergie est concentrée dans le solénoïde, de la même façon que toute l'énergie du champ électrique d'un condensateur est localisée entre ses plaques.

Origine :

Habituellement, le champ est défini comme une région de l'espace où des forces s'appliquent. Ces forces peuvent être identifiées dans un graphique montrant les lignes de champ. Par conséquent les lignes de champ sont le seul ancrage concret sur lequel puisse s'appuyer une idée intuitive ou une représentation mentale du champ.

Remède :

Le champ doit être introduit comme un système autonome, c'est-à-dire pas seulement comme un outil mathématique employé pour calculer des forces. Comme le champ est un système étendu, on peut le représenter par une densité de distribution, avant même de montrer que des forces sont exercées sur un corps placé dans le champ. C'est seulement après que nous pouvons montrer que la "substance" du champ est anisotrope. Nous devons procéder de la même manière que si nous voulions expliquer à quelqu'un ce que nous entendons par le matériau "bois". Nous ne commencerions pas à dessiner des lignes qui montreraient la texture du matériau, mais nous commencerions par indiquer que le bois est un matériau homogène avec une certaine densité.

Sujet :

Quand le sujet “champs magnétiques dans la matière” est abordé, les notions de dia-, para- et ferromagnétisme sont introduites. L'hystérésis est une caractéristique des matériaux ferromagnétiques. Entre autres choses, le concept de rémanence magnétique est abordé.

Défaut :

Bien que les forces magnétiques soient plus prononcées et plus aisément accessibles par des expérimentations simples que les forces électrostatiques, les étudiants en physique et les enseignants sont moins familiers avec les phénomènes magnétostatiques qu'avec les phénomènes électrostatiques. Une des raisons à cela est l'approche traditionnelle qui consiste à expliquer le ferromagnétisme en introduisant l'hystérésis ce qui donne à l'étudiant l'impression que le comportement des aimants est déterminé essentiellement par la courbe compliquée d'hystérésis.

En fait, la courbe d'hystérésis peut être considérée comme une manifestation de l'imperfection du matériau magnétique. Considérons deux cas extrêmes de matériaux magnétiques : un matériau magnétique parfaitement doux et un matériau magnétique parfaitement dur. Un objet constitué d'un matériau magnétique parfaitement doux ne permet pas l'existence d'un champ magnétique interne. A l'intérieur d'un tel matériau $\mathbf{H} = \mathbf{0}$. Par conséquent, un matériau magnétique doux est analogue à un conducteur électrique vis-à-vis du champ électrique : un conducteur électrique ne tolère pas de champ électrique en lui-même, nous avons $\mathbf{E} = \mathbf{0}$. Un matériau magnétique parfaitement dur se caractérise par le fait que sa magnétisation ne peut pas être changée à cause d'un champ magnétique. Par conséquent $\mathbf{M} = \text{const}$. C'est très exactement la propriété souhaitée. Un aimant “permanent” qui change de magnétisation sous l'influence d'un champ magnétique n'est pas un aimant permanent. En fait, ces deux types de matériaux parfaits peuvent aujourd'hui être fabriqués avec une bonne approximation. La courbe d'hystérésis exprime que, par l'intermédiaire d'un champ magnétique extérieur suffisamment fort, il est possible de détruire la magnétisation permanente d'un aimant dur, ou qu'on peut atteindre la saturation d'un matériau magnétique doux. Sous des conditions normales, cependant, ces phénomènes ne seront pas très significatifs. C'est pourquoi introduire les notions de propriétés magnétiques des matériaux par la courbe d'hystérésis consiste à commencer par les matériaux imparfaits. C'est un peu comme si on commençait à expliquer le comportement des ressorts élastiques en les déformant de façon plastique. D'ailleurs un phénomène d'hystérésis est observé dans ce cas.

Origine :

Il y a quelques dizaines d'années seulement, il était approprié d'introduire le ferromagnétisme par la courbe d'hystérésis. Les matériaux qui pouvaient être conçus à l'époque étaient encore très éloignés des matériaux magnétiques durs ou doux parfaits. Il était simple de changer la magnétisation d'un aimant permanent. Quand la géométrie d'un aimant n'était pas adaptée, la magnétisation faisait chuter le propre champ de l'aimant. Dans ces circonstances il était acceptable de parler de magnétisation restante ou de magnétisation rémanente.

Remède :

Nous commençons la discussion sur le magnétisme dans la matière en introduisant les matériaux magnétiques parfaitement durs et parfaitement doux. Pour un matériau magnétique dur, nous avons $\mathbf{M} = \text{const}$, et pour un matériau magnétique doux, nous avons $\mathbf{H} = \mathbf{0}$. La magnétisation d'un aimant permanent n'est pas appelée avec mépris magnétisation rémanente. La courbe d'hystérésis, ainsi que le dia- et paramagnétisme sont introduits en cours de physique des solides à l'université.

3.8 Le champ vu comme une région de l'espace munie de propriétés

Sujet :

Les physiciens considèrent le concept de champ comme difficile. En lisant des livres de cours, on a l'impression qu'il s'agit presque d'une entité mystérieuse. Les citations suivantes sont issues de différentes sources :

“L'attraction ... est indépendante de la matière intermédiaire et existe même dans un espace vide. Cela confère à l'espace autour d'un aimant une propriété particulière ; elle est appelée un champ magnétique.”

“...champ magnétique, la région dans le voisinage d'un aimant...”, “...il y a quelque chose de plutôt étrange concernant l'espace entourant un objet chargé...”

“L'espace vide devient le support d'une propriété physique. Un tel espace est appelé un champ.”

“Champ, en physique, région à travers laquelle une force peut-être exercée...”

Défaut :

Le champ est un système physique qui ne diffère pas fondamentalement d'autres systèmes tels qu'un gaz parfait, un corps rigide ou un fluide parfait. Comme pour d'autres systèmes, les grandeurs énergie, quantité de mouvement, moment cinétique et entropie ont des valeurs bien définies. Comme d'autres systèmes “matériels”, il a une pression et peut, suivant son état, avoir une température. Comme d'autres systèmes, il est constitué de portions élémentaires, qui sont des photons dans le cas du champ électromagnétique.

Il est donc justifié de voir un champ comme une entité concrète, tout comme un système matériel, tel que l'air ou l'eau par exemple.

Dans les définitions citées ci-dessus le champ est dénommé une “région” ou un “espace”. Les élèves et les étudiants imaginent l'espace comme vide. Maintenant ils apprennent que l'espace vide a des propriétés. Il n'y a rien, mais ce “rien” a des propriétés. Il n'est pas étonnant que le champ soit perçu comme un concept difficile.

Origine :

Pour Faraday, l'inventeur du concept de champ, ce dernier était simple et peu exigeant quant à notre capacité d'abstraction. Pour ses contemporains et lui, l'espace était rempli d'un matériau nommé l'éther qu'on considérait comme quelque chose de très concret. Les champs étaient des structures pas moins concrètes : il s'agissait de parties de l'éther dans un état spécifique. Une caractéristique de l'éther était d'être dans un état de contrainte mécanique.

Maxwell qui développa les idées de Faraday et leur donna une forme mathématique définit la notion de champ de la façon suivante :

“Le Champ Electrique est une portion de l'espace située dans le voisinage de corps électriés, considérée en faisant référence aux phénomènes électriques” [1]. Notons que pour Maxwell l'espace entier était rempli d'éther et, pour cette raison, parler de l'espace et parler de l'éther correspondaient à la même chose.

L'expérience de Michelson-Morley et la théorie de la relativité restreinte ont montré que l'éther n'avait pas les propriétés mécaniques simples qui étaient attendues initialement. Certains scientifiques en tirèrent, quelque peu hâtivement, la conclusion qu'un éther n'existait pas et le terme disparut de beaucoup de livres de physique (cependant pas de tous). De ce fait, toutefois, le concept de champ avait perdu son fondement. Auparavant, le champ était vu comme un état spécial de l'éther, après il devint un état spécial de quelque chose qui n'existait pas.

Mais le défaut de logique qui en résultait ne fut pas perçu, peut-être parce que Maxwell lui-même avait défini le champ comme une région de l'espace. Il ne fut pas remarqué que pour Maxwell il n'y avait pas d'espace sans éther.

La période pendant laquelle le champ n'avait pas de base conceptuelle n'aurait pas du nécessairement durer longtemps. Au début du 20ème siècle, il devint de plus en plus clair, en particulier à travers le travail de Planck sur le rayonnement thermique, que le champ électromagnétique est un système physique comme d'autres systèmes. Mais malheureusement, le concept de champ dans la forme maladroite qu'il avait prise peu après la publication de la théorie de la relativité restreinte a survécu jusqu'à aujourd'hui.

En dehors de ce développement historique complexe concernant le concept de champ, un fait supplémentaire contribue à la confusion.

Le terme champ n'est pas seulement employé comme nom d'un système physique, il désigne aussi un concept mathématique qui décrit la distribution des valeurs d'une grandeur physique dans l'espace. Ainsi on parle d'un champ de température, de pression ou d'un champ de densité. Souvent les deux significations du terme ne sont pas distinguées. Des livres de cours font parfois référence à un “champ électrique E ”, sans préciser s'il s'agit du système physique “champ électrique” ou de la distribution spatiale $E(x,y,z)$ de la grandeur physique “intensité du champ”.

Remède :

En introduisant le concept de champ, inspirez-vous de la façon dont vous introduisez d'autres systèmes matériels. Quand on introduit le concept de gaz parfait, on peut commencer en disant : “un gaz parfait est une substance ou un système muni des propriétés suivantes...”. De façon identique, on peut introduire le champ électrique par “un champ électrique est un système muni des propriétés suivantes...”.

Introduire un champ comme “une région de l'espace avec certaines propriétés” serait comme introduire un gaz, par exemple l'air comme “une région de l'espace avec certaines propriétés”. Cela ne serait pas incorrect, mais personne ne le ferait sans une bonne raison.

[1] J.C. Maxwell : A treatise on Electricity and Magnetism (Un traité sur l'électricité et le magnétisme), Dover Publications, INC., New York, 1954, p.47

Sujet :

Quand on introduit les ondes électromagnétiques, on commence souvent avec le circuit oscillant. Les oscillations non amorties, amorties et forcées sont discutées. Pour compenser l'amortissement, une boucle de rétroaction est nécessaire. Pour atteindre les hautes fréquences un oscillateur de type Hartley est employé. La bobine et le condensateur peuvent même être réduits à des sections de conducteur pour obtenir des fréquences encore plus élevées. Le circuit oscillant obtenu de cette façon peut alors être plié d'une façon permettant d'obtenir un dipôle oscillant. Après cela, le champ électrique et le champ magnétique dans le voisinage du dipôle sont discutés, c'est-à-dire le "champ proche". Il est alors affirmé et prouvé expérimentalement qu'une onde électromagnétique est émise. Cette onde représente le champ lointain.

Défaut :

Plusieurs critiques peuvent être faites :

1) L'explication vise dès le début le champ compliqué émis par un dipôle. Non seulement on a affaire à une distribution de champ complexe, mais il faut aussi traiter la distinction délicate entre le champ proche et le champ lointain. Traiter ces deux sujets n'est pas nécessaire. Il y a des ondes qui sont plus simples. Pour introduire la propagation des ondes, nous proposons de commencer avec des cas simples comme une onde harmonique plane. Il y a une onde encore plus simple : le signal carré.

2) Dans l'introduction traditionnelle des ondes électromagnétiques, leur création au moyen de dipôles oscillants joue un rôle fondamental. L'idée semble être qu'une compréhension de l'onde est plus facile à obtenir en s'appuyant sur une procédure pour créer cette onde. En fait, il est plus difficile d'expliquer cette procédure que l'onde elle-même.

Cette façon d'argumenter est comme expliquer ce qu'est une onde acoustique en commençant par le principe de fonctionnement d'une clarinette. Une clarinette est un résonateur d'où une petite portion du courant d'énergie allant et venant s'échappe et est ainsi émise. De même que la clarinette est plus difficile à comprendre que l'onde qu'elle produit, l'oscillateur dipôle est plus difficile à comprendre que l'onde électromagnétique. L'antenne dipôle est aussi un résonateur dont une petite fraction de l'énergie qui va et vient dans le champ proche est couplée avec l'extérieur et est émise.

3) Malgré le gros investissement réalisé pour expliquer les ondes électromagnétiques, l'objectif est manqué. On essaie de procéder étape par étape depuis le simple circuit oscillant jusqu'à l'onde électromagnétique supposée être compliquée. Cependant il manque l'étape essentielle. Un manque subsiste. Les étudiants apprennent que, à cause du courant électrique circulant à travers le dipôle et à cause des charges électriques accumulées à ses extrémités, le dipôle est entouré par un champ électrique et magnétique. Comme l'explication repose sur la compréhension des circuits oscillants l'étudiant peut conclure que la différence de phase entre le champ électrique et le champ magnétique est de $\pi/2$. Or, si c'était vrai, aucune onde ne quitterait la région de champ proche.

Origine :

Après la prédiction des ondes électromagnétiques par Maxwell, celles-ci ont été générées expérimentalement par Heinrich Hertz. Pour ses expérimentations Hertz n'a pas pu employer un générateur haute fréquence sur étagère. Il a dû concevoir un système ingénieux à auto-excitation pour créer ses ondes. C'est ce système compliqué qui a survécu dans nos livres de cours. Bon théoricien Hertz a aussi été capable de calculer le champ émis par son oscillateur et ce calcul a aussi une place de choix dans de nombreux manuels. Dans le calcul de Hertz, on peut voir que le déphasage entre le champ électrique et magnétique est différent de $\pi/2$, même en champ proche.

Remède :

Limitez la discussion à des ondes avec une géométrie plus simple : ondes planes sinusoïdales, onde carrée. Evitez de discuter des générateurs haute fréquence.

La génération d'une onde électromagnétique peut être expliquée de la façon suivante : dans une feuille de métal étendue un courant électrique commence brusquement à circuler. Un champ magnétique commence alors à se former. Ce champ magnétique variable va créer un champ électrique. Le champ électrique est à tous les endroits où était déjà présent le champ magnétique. Ainsi un front va s'éloigner de la feuille conductrice en séparant la région de l'espace qui contient déjà un champ électrique et celle où il n'y a pas encore de champ. Quand le courant électrique est interrompu à nouveau, un second front d'onde va se propager derrière lequel il n'y a pas de champ. La région entre les deux fronts représente une onde plane carrée.

Sujet :

Lors de l'étude de l'électrodynamique au lycée, la loi de Lenz est introduite. Selon cette loi, le champ magnétique généré par un courant induit produit un flux qui s'oppose au flux magnétique à l'origine de ce courant. La loi de Lenz énonce ainsi une propriété concernant la direction d'un vecteur : le vecteur de la densité du courant du courant induit.

De plus, on montre que le signe moins de la loi de Faraday

$$U = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

est une conséquence de la loi de Lenz. La justification est la suivante : si on introduit un noyau de fer doux dans un solénoïde connecté à une batterie, on constate que l'intensité du courant décroît pendant un instant. Comme $d\phi/dt$ est positif (comme on l'argumente) et la force électromotrice induite (fem) est négative, il doit exister un signe moins.

La loi de Lenz est aussi souvent interprétée d'une autre façon : grâce au signe moins, les processus électromagnétiques obéissent à la loi de la conservation de l'énergie.

Défaut :

Nous avons affaire d'une part à un écheveau complexe d'affirmations qui entrent dans le cursus scolaire par tradition, et d'autre part à des erreurs dans l'argumentation.

1. Quand on explique un signe algébrique dans une équation, il devrait être possible de le vérifier en mesurant les grandeurs qui figurent dans l'équation. Le signe négatif de la loi d'induction nous indique que la fem induite a un signe opposé à la variation en fonction du temps du flux magnétique, c'est-à-dire $d\phi/dt$. Pour vérifier cette assertion, on doit savoir comment mesurer ces deux quantités y compris avec leur signe algébrique.

Imaginons que le flux change de la façon suivante : le vecteur \mathbf{B} est colinéaire à l'axe Ox dans le sens positif et sa valeur absolue (et par conséquent sa composante selon x) augmente. Quel est son signe algébrique ? Est-ce que ce signe reste identique quand le système de coordonnées est tourné de 180° , de telle sorte que le vecteur \mathbf{B} pointe maintenant dans le sens négatif de x ? Maintenant ce flux est entouré par un conducteur circulaire qui est placé dans le plan $y-z$ et fermé par un voltmètre. Comment pouvons-nous lire le signe correct à partir du voltmètre ?

Nos élèves n'apprennent pas à répondre à ces questions. C'est pourquoi l'effort consacré à trouver qu'il devrait y avoir un signe moins a été réalisé en vain.

2. Dans certains livres nous avons trouvé une erreur dans l'établissement du signe moins. Cette erreur paraît avoir une vie propre car, bien que le signe moins puisse être établi de nombreuses façons différentes, la structure argumentaire et l'erreur peuvent être trouvées sporadiquement. Quand le courant commence à circuler dans le solénoïde, il est dit que $d\phi/dt$ est positif. Cette conclusion est erronée. Le flux magnétique dépend de la densité de flux selon la relation suivante :

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Comme $d\mathbf{A}$ est un vecteur, ϕ peut être soit positif soit négatif suivant l'orientation de l'aire d'intégration.

3. Si on accorde une telle attention au signe moins dans une équation, alors il serait logique d'accorder la même importance aux signes plus dans beaucoup d'autres équations. Quel interprétation faut-il donner au fait que dans la seconde loi de Newton, dans la loi d'Ohm ou dans $P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}$ il y a un signe plus ? Et quel signe devons-nous écrire dans la loi de Hooke ? Considérons un ressort qui est tendu dans la direction verticale. Nous pouvons identifier quatre forces, toutes liées au ressort : la force exercée par le ressort sur la suspension supérieure, la force exercée par le ressort sur la suspension inférieure, la force exercée par la suspension supérieure sur le ressort, la force exercée par la suspension inférieure sur le ressort. Toutes ces forces ont la même valeur absolue, deux d'entre elles sont orientées vers le haut, deux vers le bas. Par conséquent nous pouvons choisir. Bien que la question du signe dans l'équation de Hooke ne soit pas plus simple que dans la loi d'induction, elle n'est en générale pas abordée.

4. Pourquoi insiste-t-on uniquement dans le cas de la loi d'induction sur le fait qu'un signe incorrect violerait le principe de la conservation de l'énergie ? Il en résulte l'impression que l'induction a quelque chose de particulier dans ce domaine. En fait il y a plein d'autres lois physiques qui violeraient le principe de conservation de l'énergie si un signe était inversé : $U = R \cdot I$, $P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}$, $\mathbf{F} = -\mathbf{D} \cdot \mathbf{s} \dots$ De plus, en changeant un signe arbitrairement, n'importe quelle loi de conservation n'est plus respectée.

5. Nous n'avons pas d'objection à ce qu'un scientifique soit honoré en attribuant son nom à une loi. Mais n'est-ce pas un peu exagéré d'associer l'orientation d'un vecteur densité de courant, qui de toute façon est une conséquence des équations de Maxwell, au nom d'un scientifique et de donner à tout cela le statut de loi physique ?

Origine :

Généralement, une théorie approfondie s'appuie sur celles qui l'ont précédée. Malheureusement nous avons parfois l'extravagance d'enseigner non pas seulement la dernière, et en général la version la plus claire et la plus simple de la théorie, mais aussi celles qui l'ont précédée. La loi de Lenz est seulement un exemple parmi beaucoup d'autres.

En 1834, trois années après la découverte par Faraday de l'induction électromagnétique, Lenz a exprimé sa loi de la façon suivante : "si un courant constant circule dans le circuit primaire A et si, par le mouvement de A ou du circuit secondaire B, un courant est induit dans B, la direction de ce courant sera telle que, par son action électromagnétique sur A, il tendra à s'opposer au mouvement relatif des circuits". [1]

A cette époque, la question de la direction du courant induit n'était pas triviale et la loi de Lenz était un énoncé nouveau. Seulement 13 ans après, Helmholtz fit un bilan énergétique et montra que la loi de Lenz pouvait aussi être obtenue par conservation de l'énergie. Encore 25 ans plus tard Maxwell publia sa théorie complète d'électrodynamique dont la loi de Lenz était un élément.

Le fait qu'aujourd'hui nous attachions encore une telle importance au signe moins de la loi d'induction n'est rien de plus qu'une convention. Nous ne devons pas oublier que, en enseignant, un problème ne devient souvent un problème que si l'enseignant déclare qu'il s'agit d'un problème.

Remède :

En ce qui concerne la loi de Lenz, nous évitons de l'enseigner comme une loi. A la place nous proposons deux "règles avec les mains", une pour la main droite et une pour la main gauche. La règle pour la main droite est une expression de la 4^{ème} équation de Maxwell, celle pour la main gauche se déduit de la troisième.

Règle pour la main droite : pointez le pouce de la main droite dans la direction du courant électrique. Alors les doigts pliés pointent dans la direction du vecteur champ magnétique.

Règle pour la main gauche : pointez le pouce de la main gauche dans la direction du changement dB de la densité de flux magnétique. Alors les doigts pliés pointent dans la direction du vecteur champ électrique du champ électrique induit.

Pour la loi d'induction il y a deux possibilités :

Soit on explique soigneusement comment on peut déterminer le signe des différentes grandeurs physiques, en particulier l'intensité du courant électrique et la tension. Mais ce n'est pas tout : il faut également expliquer la convention qui met en relation le signe algébrique du chemin d'intégration avec celui de l'intégrale de surface dans le théorème de Stokes. Quand le pouce de la main droite pointe dans la direction de l'élément de surface de l'intégrale, les doigts repliés pointent dans la direction de la direction d'intégration de l'intégrale curviligne. Nous ne recommandons pas de procéder de cette façon dans l'enseignement secondaire, car c'est compliqué et n'apporte pas beaucoup d'éléments de compréhension supplémentaires.

Par conséquent, nous préférons la seconde solution : ne pas hésiter à exprimer la loi d'induction avec seulement les valeurs absolues des grandeurs pertinentes.

[1] J.C. Maxwell : A Treatise an Electricity and Magnetism (Un traité d'électricité et de magnétisme), Dover Publications, New York 1954 , Vol 2, N° 542, p 190.

Sujet :

Si un noyau de fer doux est placé à l'intérieur d'une bobine, le noyau augmente le champ magnétique jusqu'à des milliers de fois l'intensité du champ qui existerait dans la bobine sans le noyau, à cause de la perméabilité magnétique μ du matériau ferromagnétique.

Défaut :

L'explication suggère que la magnétisation et par conséquent la densité de flux magnétique du fer augmente avec la perméabilité μ . L'aimant semble avoir un champ qui est plus important, quand μ augmente, ce qui n'est pas correct. Pour faire un électroaimant à partir d'une bobine, il suffit que μ soit plus grand que 1. Cela ne change pratiquement pas que μ soit égal à 1 000, 10 000 ou 100 000.

Origine :

Le principe de l'électroaimant peut facilement et directement être expliqué en utilisant l'équation de Maxwell

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = \int (\mathbf{j} + \dot{\mathbf{D}}) \cdot d\mathbf{A}$$

qui est une expression faisant intervenir l'intensité du champ magnétique \mathbf{H} .

Malheureusement, il est devenu habituel de décrire les champs magnétiques principalement par la grandeur vectorielle \mathbf{B} . Parfois cette restriction est justifiée par un argument qui n'a pas lieu d'être en physique. Il est dit que \mathbf{B} est le champ magnétique. Parfois il est dit que \mathbf{B} est la grandeur de champ fondamentale, alors que \mathbf{H} est une grandeur dérivée. C'est une erreur que normalement on ne pardonne pas à nos étudiants : une grandeur physique est confondue avec un système physique. Ni \mathbf{H} ni \mathbf{B} n'est le champ. Ils ne peuvent pas être le champ car ce sont des grandeurs physiques, c'est-à-dire des objets mathématiques, inventés par l'homme, tandis que le champ est un système physique, qui existe même en l'absence d'un être intelligent l'observant ou le décrivant.

La description du rôle du noyau de fer dans un électroaimant devient bien plus facile en utilisant \mathbf{H} à la place de \mathbf{B} .

Premièrement, il est plus facile de définir ce que nous entendons par un matériel magnétique doux : à l'intérieur d'un tel matériau $\mathbf{H} = 0$ A/m, quelque soit l'intensité du champ à l'extérieur du matériau. (Cette propriété se perd quand le matériau devient saturé. Dans ce cas le matériau n'est plus magnétique doux).

Deuxièmement, en employant \mathbf{H} nous pouvons définir une quantité qui ne change pas de valeur quand le noyau de fer est inséré dans la bobine, c'est-à-dire qui est invariante : l'intégrale curviligne le long d'une courbe qui s'enroule une fois autour des conducteurs de la bobine. Si sur une fraction de la courbe, c'est-à-dire à l'intérieur du noyau de fer, l'intensité du champ magnétique est égale à zéro, la contribution à l'intégrale de la part restante de la courbe doit augmenter en conséquence.

L'explication en employant \mathbf{B} est plus compliquée et moins convaincante : il est plus difficile de caractériser un matériau magnétique doux, et il n'y a pas d'invariant quand on introduit le noyau magnétique dans le solénoïde.

Remède :

Quand vous traitez du magnétisme dans la matière, utilisez \mathbf{H} plutôt que \mathbf{B} . En employant \mathbf{H} pour exprimer ce que nous entendons par "plus de champ" ou "moins de champ", le fait que \mathbf{H} soit nul à l'intérieur du noyau magnétique peut s'exprimer de la façon suivante : un matériau magnétique doux ne permet pas la pénétration du champ magnétique, tout comme un conducteur électrique ne permet pas au champ électrique de pénétrer en son sein. Ainsi il n'est pas difficile de comprendre le rôle du noyau de fer d'un électroaimant : en introduisant un noyau de fer et en laissant le courant électrique constant, le champ est repoussé à l'extérieur de la bobine.

Sujet :

Un pôle magnétique est l'une ou l'autre région d'un aimant, désigné nord ou sud, où le champ magnétique est le plus fort.

Défaut :

La magnétisation est un champ vectoriel qui décrit la densité de dipôles magnétiques à l'intérieur d'un matériau. Les pôles d'un aimant sont les régions où les lignes du champ vectoriel magnétisation commencent ou finissent. La grandeur qui permet de décrire les pôles magnétiques est l'intensité magnétique au pôle ou la charge magnétique Q_m . La densité de charge magnétique ρ_m est la source du champ magnétique \mathbf{H} :

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \frac{\rho_m}{\mu_0}$$

La charge magnétique est analogue à la charge électrique, ou plus exactement à la charge électrique liée, telle qu'elle apparaît à la surface d'un matériau diélectrique polarisé. Souvent, dans les manuels de physique, les charges magnétiques ne sont pas introduites. Or, sans elles, il est difficile de décrire le comportement d'un aimant permanent de façon quantitative.

La relation

$$\mathbf{F} = Q_m \cdot \mathbf{H}$$

qui est l'équivalent en magnétisme de

$$\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{E}$$

et qui peut aisément être vérifiée expérimentalement, ne peut pas être traitée. La loi de Coulomb pour les pôles magnétiques n'est même pas mentionnée, bien qu'elle soit plus facile à vérifier que la loi électrique correspondante. Il n'est même pas possible de définir la propriété la plus fondamentale d'un aimant permanent c'est-à-dire que la charge magnétique totale de chaque aimant est égale à zéro. A la place il subsiste uniquement la bien pâle allégation qu'un aimant a (au moins) deux pôles.

Pour un barreau aimanté normal, les lignes de magnétisation se terminent aux faces avant. Cela signifie que les charges magnétiques se trouvent à ces surfaces. Celles-ci ne sont cependant pas identiques aux régions "où le champ magnétique est le plus fort", car il y a des lignes de champ qui quittent le barreau magnétique sur ses faces latérales, et, comme le montrent les schémas bien connus employant de la limaille de fer, l'intensité du champ est forte aussi à l'extrémité des faces latérales du barreau aimanté. Ainsi beaucoup d'étudiants pensent que les pôles d'un barreau aimanté sont aussi à ses côtés et que l'intensité magnétique du pôle diminue en direction du milieu de l'aimant. Cette idée fautive est renforcée d'avantage par la coloration habituelle vert-rouge des faces latérales des aimants permanents.

Origine :

Autrefois, la charge magnétique, aussi appelée force de pôle de l'aimant était introduite dans tous les livres traitant d'électrodynamique. Maxwell au tout début du second volume de son *Traité* a introduit la loi de Coulomb pour les pôles magnétiques (c'est la première équation du livre) de la façon suivante :

"Dans tout aimant la quantité totale de charge magnétique est égale à zéro" [1].

Plus tard, la notion de charge magnétique a disparu à cause d'une incompréhension. Du fait qu'aucun monopôle magnétique isolé n'ait été trouvé, il a été conclu que cette grandeur qui permet de décrire une telle charge n'existe pas non plus. Cependant une grandeur physique n'est pas quelque chose qui "existe" dans la nature. C'est un outil qui permet de décrire la nature, "une pure invention de l'esprit humain" comme l'a indiqué Einstein [2]. L'introduction ou non d'une grandeur physique est seulement une question de commodité. Et il n'y a aucun doute qu'il est commode d'introduire et d'utiliser la grandeur "charge magnétique". Sans elle, on ne peut pas exprimer la loi de Coulomb pour les systèmes magnétiques, et on ne peut pas non plus énoncer de façon quantitative le fait que les aimants ont deux pôles.

Remède :

Introduisez la grandeur physique extensive charge magnétique. Et énoncez le théorème : "la charge magnétique totale d'un aimant est nulle".

[1] *J. C. Maxwell: A Treatise on Electricity and Magnetism (Un traité sur l'électricité et le magnétisme)*, Dover Publications Inc., New York, 1954, p.4.

[2] *A. Einstein: Mein Weltbild (Ma représentation du monde)*, Ullstein Taschenbücher-Verlag, 1957, p. 115.

Sujet :

Dans les manuels de physique pour le secondaire, des figures montrent les lignes de champ de barreaux magnétiques. On peut voir des exemples à la figure 1.

Défaut :

Dans tous les manuels que j'ai consulté, ces figures sont incorrectes (j'ai examiné dix livres, la plupart allemands, certains américains et un italien). Les erreurs peuvent être visualisées en comparant le contenu de la figure 1 avec la représentation correcte qui est donnée à la figure 2a (qui a été prise de Sommerfeld [1]). Les différences ne permettent pas l'excuse qu'une distribution différente des pôles aurait été présupposée car il n'y a pas de distribution de pôles correspondant aux champs présentés à la figure 1.

Dans les manuels, différentes erreurs peuvent être trouvées.

1. les lignes de champ sortent ou entrent uniquement des parois d'extrémité, comme on peut le voir aux figures 1a, 1b et 1c. En fait, elles le font également des parois latérales.

2. Les lignes de champ quittent l'aimant uniquement perpendiculairement aux surfaces comme aux figures 1a et 1b. En fait, elles ne sont perpendiculaires qu'au centre des parois d'extrémité.

3. Les lignes de champ qui entrent et sortent des parois latérales ont une orientation incorrecte, comme aux figures 1d, 1e, 1g et 1h.

Des erreurs similaires peuvent être trouvées sur des images du champ magnétique produit par des aimants en fer à cheval ou par la Terre. Souvent, un manuel scolaire montre aussi une photographie où les lignes de champ sont rendues visibles au moyen

de limaille de fer. Dans un tel livre, on peut voir ainsi sur deux figures côte à côte la différence entre le champ réel et ce que prétend l'image montrant les lignes de champ.

L'une des images que j'ai trouvée montre des erreurs encore plus grossières : des lignes de champ ne commencent pas seulement au pôle nord mais se terminent là également, et la même chose est reproduite au pôle sud.

Origine :

Une représentation graphique d'un phénomène physique ne doit pas nécessairement être précise en tous points. Elle doit montrer et peut accentuer l'essentiel. Des détails sans importance peuvent être omis pour préserver la clarté de l'exposé. Dans le cas présent, toutefois, aucune simplification n'a été faite, mais un message a été transmis qui n'est pas correct. Il n'est pas vrai que les étudiants ne sont pas sensibles aux énoncés incorrects. On peut facilement se convaincre qu'ils les gardent à l'esprit. En effet, de nombreux étudiants croient que les lignes de champ partent perpendiculairement des parois d'extrémité d'un barreau aimanté. Si on demande à un étudiant de dessiner une image des lignes de champ d'un aimant droit, une figure incorrecte est presque toujours tracée. A l'évidence, les étudiants dessinent quelque chose qu'ils ont mémorisée.

Quand on leur demande une explication ou une justification de la direction des lignes de champ, leur réaction est la perplexité. En réalité, les images incorrectes ont une certaine vraisemblance.

La direction incorrecte des lignes de champ qui sortent ou entrent des parois latérales pourrait être justifiée de la manière suivante : les étudiants savent que le champ \mathbf{B} est à divergence nulle. Les lignes de champ \mathbf{B} n'ont pas de commencement ni de fin. Ainsi, elles peuvent être complétées ou continuées à l'intérieur de l'aimant. Maintenant, ils font l'hypothèse inexacte que les lignes de champ ne se tordent pas en traversant la surface de l'aimant. Et effectivement, dans l'un des manuels, les lignes de champ ont été dessinées de cette façon, Fig. 1f. Les lignes de champ seraient même plus "lisses", si elles quittaient l'aimant seulement aux parois d'extrémité, comme sur la Fig. 1b. (Les figures 1b et 1f sont tirées du même livre, mais elles ne concordent pas l'une avec l'autre.) La forme correcte des lignes est montrée sur la figure 2b. Remarquez la déviation prononcée des lignes au niveau des surfaces latérales.

Ceux qui laissent les lignes entrer et sortir seulement aux parois d'extrémité peuvent croire qu'à l'intérieur elles sont identiques aux lignes de magnétisation, ce qui n'est pas vrai. (Les lignes de magnétisation forment un champ homogène.)

Ceux qui laissent les lignes entrer et sortir perpendiculairement aux parois peuvent croire qu'une même règle s'applique que celle que nous connaissons pour les lignes du champ électrique à la surface d'un conducteur électrique.

Nous fûmes surpris de trouver que tous les manuels d'université que nous avons consultés montraient les images correctes, alors que tous les manuels scolaires montraient des images incorrectes. Apparemment il existe quelque chose comme une "physique scolaire" qui a sa propre vie, indépendamment de la "physique de l'université". Cela montre également qu'un livre "nouveau" n'est pas réellement nouveau en général. Il contient les vieilles erreurs dans un nouvel emballage.

Remède :

Dessinez les lignes de champ correctement. Une aide peut être : ne dessinez pas les lignes de \mathbf{B} , mais celles de \mathbf{H} , Fig. 2c. Les pôles magnétiques sont les sources des lignes de champ de \mathbf{H} . On peut imaginer que les parois d'extrémité ne sont pas des pôles magnétiques mais portent de la charge électrique. Le problème de la représentation des lignes de champ de \mathbf{H} est le même que celui de la représentation des lignes du champ électrique avec des parois d'extrémités chargées.

[1] A. Sommerfeld : Vorlesungen über Theoretische Physik, Band III, Elektrodynamik (Leçons de physique théorique, tome III, électrodynamique) – Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964. – p. 78

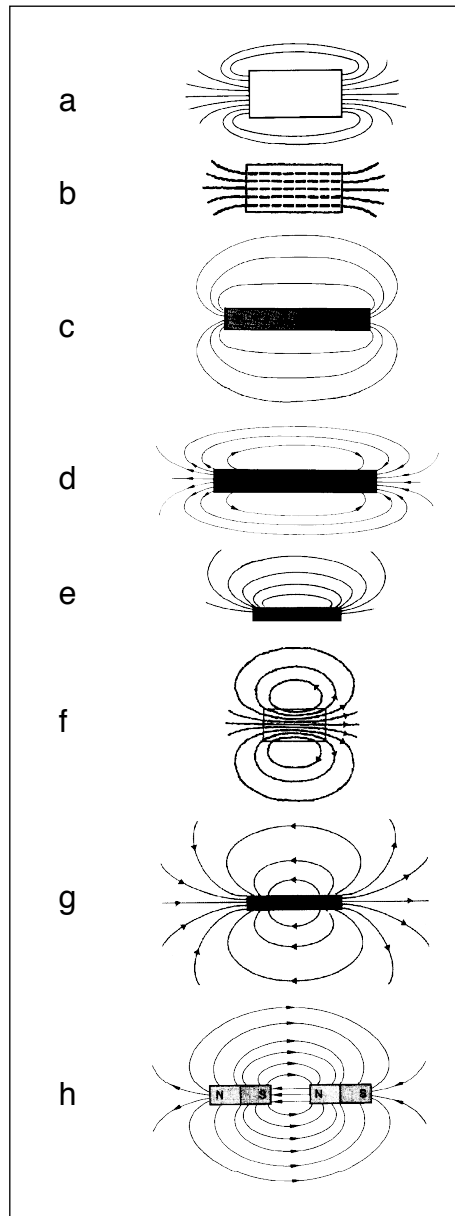


Fig. 1. Lignes de champ magnétique d'un barreau magnétique, telles que montrées dans les manuels du secondaire

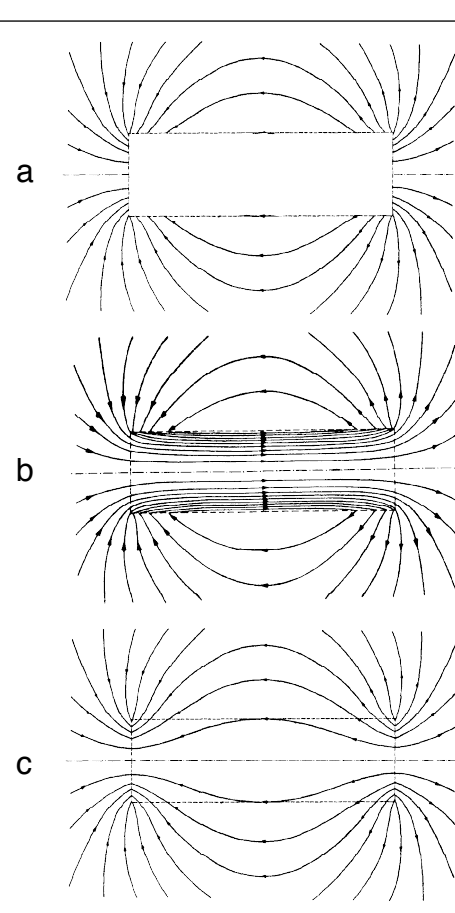


Fig. 2. Barreau magnétique. (a) Lignes de champs \mathbf{H} et \mathbf{B} à l'extérieur de l'aimant ; (b) lignes de champ \mathbf{B} ; (c) lignes de champ \mathbf{H}

Sujet :

Pour représenter graphiquement un champ électrique, magnétique ou gravitationnel des figures montrant les lignes de champ sont communément dessinées. Dans le cas du champ électrique et du champ gravitationnel des surfaces équipotentielles sont aussi parfois représentées.

Une figure représentant les lignes de champ montre deux aspects du champ :

1. Elle montre la direction du vecteur champ en chaque point du champ. Les vecteurs intensité du champ pointent dans la direction des tangentes des lignes de champ.
2. Elle nous indique où les sources du champ sont localisées. Ce sont les endroits où les lignes de champ commencent ou se terminent.

Parfois, il est dit qu'une figure des lignes de champ permet de lire l'amplitude des vecteurs de champ. En fait, c'est vrai uniquement dans des cas particuliers [1, 2].

Défaut :

Une représentation graphique d'un champ nous permet de saisir d'un seul regard ce qu'il serait difficile d'exprimer avec des mots ("une image vaut mieux qu'un long discours"). Cependant, bien qu'il y ait plusieurs possibilités pour représenter graphiquement un champ, une seule méthode est généralement employée : la figure des lignes de champ. Nous sommes si habitués à cette représentation, qu'il nous vient à peine à l'esprit qu'il puisse exister des alternatives. Parmi celles-ci on trouve les surfaces qui sont perpendiculaires aux *lignes de champ* : les *surfaces de champ*.

Les champs sont souvent introduits comme des entités assez abstraites. C'est pourquoi, pour beaucoup d'étudiants, les lignes de champ sont la branche à laquelle ils s'accrochent. Et le résultat est souvent qu'ils identifient les lignes de champ avec le champ.

Origine :

Pour Maxwell il était naturel de représenter tous les champs à la fois par les lignes de champ ("lignes de force") et par les surfaces de champ ("surfaces de niveau"), Fig. 1.

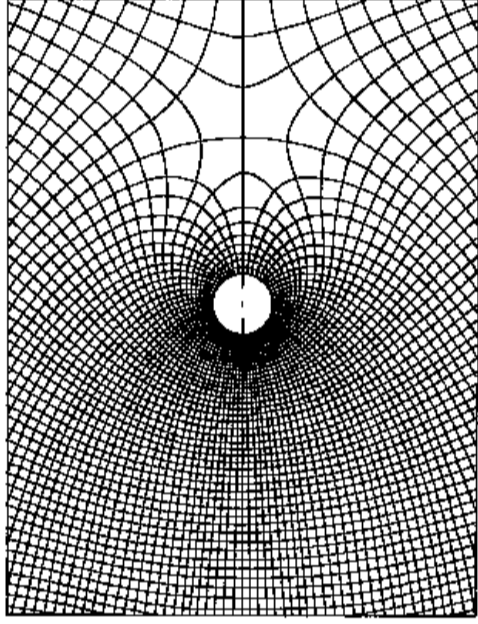


Fig. 1. Superposition du champ magnétique généré par un conducteur électrique (perpendiculaire au plan de la figure) et d'un champ magnétique homogène, tirée du Traité sur l'électricité et le magnétisme de Maxwell

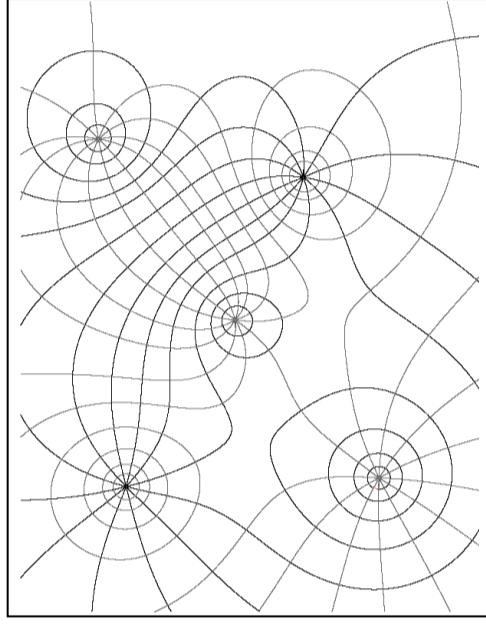


Fig. 2. Champ de deux sources de flux et de trois sources de circulation (lignes de champ en noir; surfaces de champ en gris)

C'était une méthode permettant de concevoir une image suggestive d'un objet invisible. Au tournant du siècle, il se fit jour des doutes sérieux sur l'existence d'un éther et l'éther fut banni de la physique. La conséquence de cela fut que la notion de champ dégénéra en une entité abstraite, à peine plus qu'un concept mathématique permettant de calculer des forces. A partir de là, les lignes de champ ne furent rien de plus que des lignes auxiliaires qui représentaient la direction de la force sur une particule test. Les surfaces orthogonales survécurent uniquement sous la forme de surfaces équipotentielles dans le cas particulier où les champs étaient conservatifs. Comme un potentiel ne peut être défini que si le champ est conservatif, l'opinion générale à cette époque était que dessiner les surfaces orthogonales n'avait de sens que pour un tel champ. Apparemment il ne fut pas remarqué que le seul problème était le nom. En réalité, des surfaces orthogonales peuvent aussi être définies pour des champs non conservatifs. Elles ne correspondent pas à des équipotentielles, mais sont néanmoins aussi utiles que les surfaces équipotentielles d'un champ conservatif. De fait, elles deviennent particulièrement intéressantes pour des champs non conservatifs car elles indiquent clairement où se trouve le rotationnel du champ.

Remède:

Dans la suite, nous appelons *sources de flux* les endroits à l'intérieur d'un champ où la divergence est non nulle. Nous appelons *source de circulation* les endroits où le rotationnel du champ est différent de zéro.

Tout comme les sources de flux sont les endroits où les lignes de champ commencent ou finissent, les sources de circulation sont les endroits où les surfaces de champ se terminent. Sur un graphique représentant les lignes de champ les sources de flux se voient aisément, alors que les surfaces de champ indiquent clairement les sources de circulation. C'est pourquoi le mieux est de représenter les deux sur une figure représentant le champ : les lignes de champ et les surfaces de champ (dans une représentation à deux dimensions les surfaces de champ apparaissent aussi comme des lignes).

Considérons par exemple le champ électrique. Les sources de flux sont des charges électriques et les sources de circulation sont des charges électriques dont le flux magnétique change avec le temps.

La Fig. 2 montre deux charges linéaires (des fils minces chargés, perpendiculaires au plan de la figure) et trois bobines minces "linéaires" dont le flux magnétique change avec le temps. Les bobines sont aussi perpendiculaires au plan de la figure et par conséquent apparaissent comme des points.

La figure peut aussi être interprétée comme un champ magnétique. Ainsi les sources de flux sont les charges des lignes magnétiques (pôles magnétiques linéaires), les sources de circulation sont des courants électriques.

[1] A. Wolf, S. J. van Hook, E. R. Weeks: Electric field line diagrams don't work (Les figures de lignes de champ électrique ne marchent pas), Am. J. Phys. **64** (1996), p. 714 - 724.

[2] F. Herrmann, H. Hauptmann, M. Suleder. Representations of Electric and Magnetic Fields (Représentations des champs électrique et magnétique), Am. J. Phys. **68**, p. 171.

Sujet :

Dans les manuels scolaires l'inductance L est généralement introduite à l'aide de la loi de l'induction, c'est-à-dire comme le facteur de proportionnalité entre "la force électromotrice" induite U_{ind} et le taux de variation en fonction du temps du courant électrique qui est la cause de l'induction :

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

Défaut :

Les ingénieurs en électricité connaissent trois types de composants linéaires passifs : la résistance, le condensateur et la bobine. (Les équivalents dans le domaine mécanique sont l'amortisseur de vibration qui obéit à la loi de Stokes, la masse ponctuelle et le ressort qui obéit à la loi de Hooke.) Pour chacun de ces composants une relation linéaire s'applique :

$$\text{résistance : } U = R \cdot I$$

$$\text{condensateur : } Q = C \cdot U \quad (2)$$

$$\text{bobine : } n\Phi = L \cdot I \quad (3)$$

R , C et L dépendent des dimensions géométriques et du matériau des composants. Alors que de l'énergie est dissipée dans la résistance, la capacité et la bobine peuvent stocker de l'énergie. Pour des circuits qui contiennent, outre une source d'énergie, uniquement des composants de ces trois types, une symétrie interne s'applique : si le circuit est remplacé par un autre suivant certaines règles de traduction, le nouveau circuit est décrit par des équations qui ont la même structure mathématique que celles du circuit initial. Un exemple bien connu est le circuit RC qui se transforme en un circuit RL . Les règles de traduction les plus importantes peuvent être lues dans le tableau suivant :

$$U \text{ (tension)} \quad \Leftrightarrow \quad I \text{ (intensité du courant électrique)}$$

$$Q \text{ (charge électrique)} \quad \Leftrightarrow \quad n\Phi \text{ (flux magnétique)}$$

$$C \text{ (capacité)} \quad \Leftrightarrow \quad L \text{ (inductance)}$$

$$R \text{ (résistance)} \quad \Leftrightarrow \quad 1/R = G \text{ (conductance)}$$

$$\text{jonction} \quad \Leftrightarrow \quad \text{boucle}$$

$$\text{circuit série} \quad \Leftrightarrow \quad \text{circuit parallèle}$$

$$\text{source de tension} \quad \Leftrightarrow \quad \text{source de courant}$$

$$\text{stabilisée} \quad \Leftrightarrow \quad \text{stabilisée}$$

La double flèche doit être lue de la façon suivante : U doit être remplacé par I et I doit être remplacé par U , Q par $n\Phi$ et $n\Phi$ par Q , etc. L'apparition du nombre de tours n qui perturbe quelque peu l'esthétique est due au fait que par flux à travers la bobine nous entendons le produit de la densité de flux \mathbf{B} et de la section transversale de la bobine. Il serait plus logique d'employer la grandeur $\Phi' = n\Phi$ car la surface effective traversée par les lignes de champ est n fois la section transversale de la bobine.

Quand nous définissons l'inductance par l'équation (1), cette belle symétrie est ignorée. L'analogie entre la capacité et la bobine est moins évidente.

L'inconvénient d'introduire L via l'équation (1) peut aussi être vu quand nous essayons d'introduire la capacité d'une façon similaire, c'est-à-dire au moyen de l'équation suivante qui est analogue à l'équation (1) :

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

Cette équation décrit le processus de charge et de décharge d'un condensateur. Si nous l'utilisons pour l'introduction de C , nous suggérons que la capacité est une grandeur qui est intéressante uniquement pour de tels processus. L'introduction au moyen de l'équation (2) est plus générale. C y apparaît comme une mesure de l'effort que nous devons réaliser pour stocker une charge électrique donnée : avons-nous besoin d'une tension plus forte ou plus faible ?

La même chose est vraie pour l'inductance. Quand nous l'introduisons au moyen de l'équation (1), nous suggérons que L est une quantité qui est importante uniquement dans le contexte de l'induction électromagnétique. L'équation (3) qui est employée pour l'introduction de L dans certains manuels universitaires nous dit au contraire quelque chose au sujet de L sans faire référence à l'induction. Elle apparaît comme une mesure de l'effort que nous devons faire pour établir un flux magnétique donné dans une bobine. Avons-nous besoin d'un courant électrique plus fort ou plus faible ?

Origine :

On peut introduire l'inductance, tout comme la capacité, la résistance et de nombreuses autres grandeurs physiques par toute équation dans laquelle la grandeur apparaît. En plus des équations (1) et (3) l'inductance est parfois introduite par une troisième équation :

$$E = \frac{L}{2} \cdot I^2 \quad (4)$$

Cette équation donne l'énergie stockée dans le champ d'une bobine. Ces trois possibilités pour l'introduction de L (par les équations (1), (3) ou (4)) coexistent depuis l'apparition de L en physique. Ici encore il peut être noté que sur certains aspects l'enseignement du second degré et l'enseignement universitaire en physique ont une existence relativement indépendante.

Remède :

On introduit le flux magnétique comme $B \cdot A$. Nous montrons expérimentalement que la densité de flux dans une bobine est proportionnelle à l'intensité du courant électrique dans la bobine. Il s'ensuit que le flux $n\Phi$ est aussi proportionnel à l'intensité du courant :

$$n\Phi \sim I.$$

Le facteur de proportionnalité est appelé inductance :

$$L := n\Phi/I.$$

Pour obtenir l'équation (1), il suffit de reporter cette définition dans la loi de l'induction :

$$U_{\text{ind}} = n d\Phi/dt.$$

Sujet :

Le champ magnétique d'un solénoïde est identique, à l'extérieur du solénoïde, à celui d'un barreau aimanté de mêmes dimensions géométriques. Quand on introduit le solénoïde et son champ à l'école, ce fait est habituellement mentionné. De plus il est souvent dit que le solénoïde a un pôle nord et un pôle sud à ses extrémités. La même affirmation est parfois faite pour une boucle de courant. Ici les pôles sont des deux côtés de la surface circulaire définie par la boucle de courant.

Défaut :

Pour trouver où sont les pôles magnétiques de tout arrangement, le mieux est d'examiner la magnétisation \mathbf{J} . La magnétisation est une grandeur vectorielle qui décrit l'état magnétique de la matière. Elle nous dit quel est le moment dipolaire magnétique de chaque élément de volume. La Fig. 1 montre la magnétisation d'un disque magnétique dont les pôles sont tous les deux du côté inférieur. Elle montre aussi les lignes de magnétisation. Ces lignes commencent toujours aux pôles sud et se terminent aux pôles nord. Ni le solénoïde, ni la boucle de courant n'ont une magnétisation. Par conséquent, ils n'ont pas de pôles magnétiques.

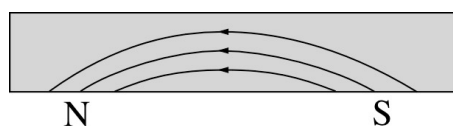


Fig. 1. Magnétisation d'un disque magnétique

Pour localiser les pôles magnétiques, on peut aussi examiner un dessin des lignes de champ \mathbf{H} . Les lignes de champ \mathbf{H} commencent aux pôles nord et se terminent aux pôles sud. Pour un solénoïde et une boucle de courant, la divergence de \mathbf{H} est nulle partout, par conséquent on peut à nouveau en conclure qu'il n'y a pas de pôles.

Il est exact que les champs magnétiques d'un solénoïde et d'un barreau aimanté sont similaires et il est pertinent de noter ce fait. Cependant, en attribuant des pôles au solénoïde les étudiants vont avoir une idée erronée sur ce qu'est un pôle magnétique. Ils ne vont pas comprendre la différence fondamentale entre un solénoïde vide et un électroaimant.

Et finalement, si un solénoïde et une boucle de courant avaient des pôles, on pourrait s'attendre à ce que n'importe quelle autre distribution de courant ait aussi des pôles. Où sont les pôles d'un conducteur linéaire parcouru par un courant ? Habituellement on insiste sur le fait qu'il n'y a pas de pôles.

Origine :

La comparaison entre les champs des aimants permanents et ceux des distributions de courant est un sujet usuel de la physique universitaire. C'est un sujet important car les étudiants apprennent à différencier les opérateurs divergence et rotationnel. Quelle distribution de divergence conduit au même champ qu'une distribution de rotationnel donnée ?

Apparemment les manuels scolaires ont emprunté ce sujet, mais les auteurs n'ont pas conscience des erreurs qu'ils font.

L'idée que les courants causent l'existence de pôles magnétiques est de plus maintenue en vie par le fait qu'en géographie il est commun de parler des pôles magnétiques nord et sud de la terre. Ce ne sont pas des pôles au sens de la physique pour deux raisons. Premièrement, ils sont créés par des courants électriques. Ainsi le champ magnétique de la terre est à divergence nulle. Et, deuxièmement, suivant la définition géographique ils sont des points à la surface de la terre (les points où la composante horizontale de l'intensité du champ magnétique est nulle). Même si la cause du champ magnétique de la terre était d'origine ferromagnétique, les pôles ne seraient pas des points, mais des régions étendues à l'intérieur de la terre.

Souvent il est dit que la terre est un aimant. Cette idée remonte à Gilbert, qui trouva que l'origine du magnétisme de la terre se trouve à l'intérieur de celle-ci, et pas dans le ciel. Il conjectura qu'il y avait un aimant dans la terre. Son ouvrage "De Magnete..." parut en 1600, c'est-à-dire 220 années avant la découverte par Oerstedt de la relation entre les courants électriques et les champs magnétiques, et longtemps avant que l'on sache que l'intérieur de la terre est si chaud qu'aucun matériau magnétisé ne peut y exister. Si on cherche une comparaison, au lieu de dire que la terre est un aimant, il serait plus juste de comparer la terre à une pelote de fil électrique parcouru par un courant.

Remède :

Ne dites pas qu'un solénoïde ou une boucle de courant ont des pôles. Quand vous présentez l'électroaimant, plutôt que de dire que l'électroaimant a des pôles, il est préférable de dire que son noyau de fer a des pôles.

Sujet :

“..., le flux magnétique ϕ devrait être complètement confiné à l'intérieur du noyau de fer, c'est-à-dire s'écouler à travers les deux enroulements avec la même intensité (pas de flux de fuite).” [1]

“Quand on mesure la tension au secondaire plus précisément, il apparaît qu'elle est plus faible que ce qui serait attendu par les calculs. Ce fait est dû d'une part aux pertes-Joule,... La deuxième raison est que, à cause des fuites, seulement une part du flux d'induction dans l'enroulement primaire traverse l'enroulement secondaire.” [2]

Défaut :

Les étudiants apprennent que les champs de fuite ou champs parasites sont des choses qui doivent être évités. En principe, ils ne sont pas nécessaires, et aucun principe physique n'est violé si nous imaginons un monde physique sans eux. C'est similaire au frottement mécanique. Le frottement aussi apparaît souvent seulement comme une nuisance qu'on essaie d'éliminer. Une analogie un peu grossière pourrait être une fuite dans un tuyau d'arrosage de jardin. Admettons que le tuyau d'arrosage ait des perforations ou que les raccords ne soient pas étanches. Ces fuites peuvent, en principe, être colmatées complètement. Et certes, cela peut aussi être dit de certains “champs parasites”. Un écran métallique empêche les fuites d'un champ électrique, un écran en Mu-métal enferme un champ magnétique ou le tient à l'écart d'un autre équipement.

Maintenant, le même nom de “champ de fuite” ou “champ parasite” est également utilisé dans des cas où le principe de fonctionnement d'un appareil dépend de ce champ. Parmi plusieurs exemples il y a le transformateur dont nous allons discuter dans la suite.

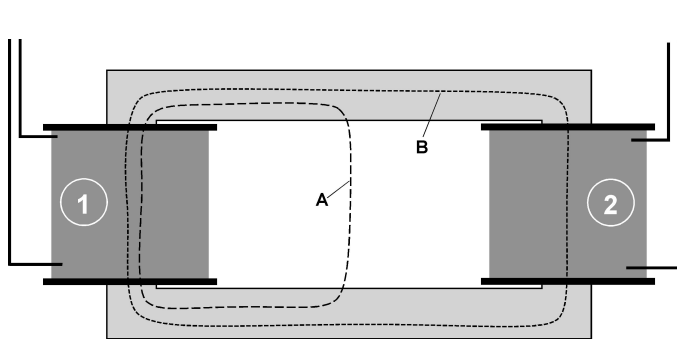


Fig. 1. l'intensité du champ magnétique H est différente de zéro uniquement dans la partie du chemin d'intégration qui se trouve en dehors du noyau de fer.

Nous considérons un transformateur dans sa forme la plus simple : un noyau en fer qui forme un rectangle fermé, avec les deux enroulements placés aux deux côtés opposés les plus courts, Fig. 1. Nous faisons les hypothèses habituelles suivantes :

- la résistance ohmique des enroulements est faible comparée à leur réactance respective ;
- la résistance de la charge est petite comparée avec la réactance de l'enroulement secondaire ;
- la résistance de la charge est grande comparée avec la résistance ohmique de chacun des enroulements ;
- la perméabilité μ du matériau constituant le noyau est beaucoup plus grande que un.

Nous appliquons maintenant la loi d'Ampère et intégrons d'abord le long du chemin A.

$$\oint_A \mathbf{H} d\mathbf{r} = n_1 I_1$$

La valeur de l'intégrale est égale au courant total $n_1 I_1$ qui est entouré par le chemin d'intégration (n est le nombre de spires, les indices 1 et 2 font référence aux enroulements primaire et secondaire, respectivement). Maintenant, l'intensité du champ magnétique H à l'intérieur du noyau est plus petite d'un facteur μ par rapport à l'extérieur. Comme les valeurs typiques de μ sont plus grandes que 1000, la contribution à l'intégrale du chemin à l'intérieur du noyau de fer est négligeable. Pour cette raison, seul le “champ de fuite” contribue à la valeur de l'intégrale.

Nous considérons maintenant le chemin d'intégration B. Il entoure les deux enroulements. Comme il passe sur toute sa longueur dans le noyau de fer, l'intégrale est égale à zéro :

$$\oint_B \mathbf{H} d\mathbf{r} = n_1 I_1 - n_2 I_2 = 0$$

Nous avons ainsi la relation bien connue :

$$n_1 I_1 = n_2 I_2.$$

Nous pouvons voir que cette relation ne serait pas valide s'il n'y avait pas de “champ de fuite”.

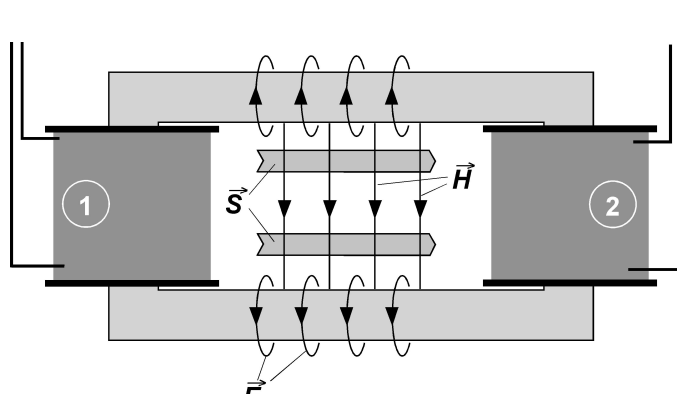


Fig. 2. Les champs entre les branches d'un transformateur. L'énergie circule de gauche à droite.

L'importance de ce champ dénigré peut être encore vue d'une autre façon. La Fig. 2 montre schématiquement les lignes de champ H ainsi que les lignes de champ électrique. Le changement du flux magnétique à l'intérieur du noyau de fer est la cause d'un champ électrique, dont les lignes de champ entourent les branches du noyau de fer. De plus, la figure montre le vecteur de Poynting :

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

c'est-à-dire la densité du flux d'énergie à l'intérieur du champ. On voit que l'énergie se déplace du circuit primaire vers le secondaire à travers le champ.

La situation est analogue à celle de l'énergie transportée au moyen d'un câble électrique. La seule différence est que le champ électrique et le champ magnétique sont intervertis, Fig. 3. Comme les conducteurs ont des potentiels électriques différents, les lignes du champ électrique vont d'un conducteur à l'autre, et comme un courant électrique circule dans les conducteurs, ils sont entourés d'un champ magnétique. La distribution de l'écoulement d'énergie est la même que dans le transformateur.

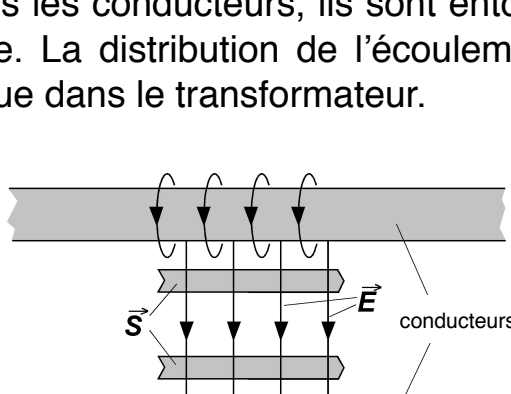


Fig. 3. Les champs entre les deux conducteurs d'un câble électrique. L'énergie circule de gauche à droite.

Le champ parasite du transformateur n'est pas plus responsable des pertes du transformateur que le champ électrique entre les conducteurs d'un câble n'est responsable des pertes du câble. Dans les deux cas, le rendement est essentiellement limité par la dissipation à l'intérieur des “conducteurs”. Dans le transformateur nous avons une dissipation d'énergie dans les enroulements et dans le noyau en fer à cause du changement constant de la magnétisation. Une mesure de cette dissipation est l'intensité du champ magnétique dans le noyau de fer. Idéalement, elle devrait être égale à zéro, tout comme l'intensité du champ électrique à l'intérieur des conducteurs électriques du câble devrait être nulle. Parce que les pertes dans un noyau de fer sont assez élevées, dans les transformateurs industriels la distance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire est choisie aussi courte que possible.

Origine :

Dans la discussion habituelle au sujet du principe de fonctionnement du transformateur, on n'utilise pas l'intensité du champ magnétique H , mais seulement la densité de flux B . Comme B est beaucoup plus grand à l'intérieur du noyau de fer qu'à l'extérieur, on a l'impression que le champ à l'extérieur ne joue pas un rôle essentiel. C'est seulement un exemple parmi beaucoup qui montre que l'usage exclusif de B pour la description des phénomènes magnétiques est la cause d'idées fausses. Une autre cause peut être qu'on évite la discussion du bilan local d'énergie.

Remède :

1. Ne mettez pas tous les “champs parasites” dans le même panier. Comme les termes “champ parasite” ou “champ de fuite” ont une connotation négative, il serait préférable de ne pas employer ces mots pour le champ entre les branches d'un transformateur.
2. Ne limitez pas la discussion du champ magnétique d'un transformateur à B . Discutez également de H .
3. Posez-vous le plus souvent possible les questions : Où est l'énergie ? Par où circule-t-elle ?

[1] Gerthsen: Physik (Physique), 21. Auflage, Springer-Verlag Berlin 2002, p. 414.

[2] Handbuch der experimentellen Schulphysik, Elektrizitätslehre III (Manuel de physique expérimentale à l'école, cours d'électricité), Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln 1965, p. 70.

Sujet :

“L’expérience nous dit que les [...] forces, qui agissent sur un point de masse m peuvent dépendre du vecteur position \mathbf{r} de ce point, et/ou de sa vitesse $\dot{\mathbf{r}}$, et aussi du temps. Par conséquent, cela sera une force $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t)$.” [1]

“En physique un champ de force est un champ de vecteur qui décrit une force sans contact agissant sur une particule en différentes positions dans l’espace. De façon spécifique, un champ de force est un champ de vecteur $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$, où \mathbf{F} est la force qui s’appliquerait à une particule si elle était au point \mathbf{x} .” [2]

“Exprimant à nouveau mathématiquement la définition de l’énergie (via la définition du travail), un champ scalaire de potentiel $U(\mathbf{r})$ est défini comme le champ dont le gradient est égal et opposé à la force produite en chaque point...” [3]

Défaut :

Chaque physicien a l’expérience d’un cours sur la mécanique analytique. Il ou elle y a appris, entre autres choses, ce que nos citations disent : une force dépend de la position et parfois aussi de la vitesse et du temps.

A chaque fois que nous indiquons la valeur d’une grandeur physique, l’entité à laquelle se rapporte cette valeur doit être indiquée clairement. Il y a les grandeurs locales, dont les valeurs se réfèrent à un point, telles que la température, la pression ou l’intensité du champ électrique. D’autres grandeurs se rapportent à une surface. Tous les courants ou les flux appartiennent à cette classe : courant électrique, puissance (= courant d’énergie), flux magnétique, et force (= courant de quantité de mouvement). Les valeurs d’une autre classe de grandeurs se rapportent à une région de l’espace. Ce sont les grandeurs extensives masse, énergie, charge électrique, entropie, etc. Il y a des grandeurs pour lesquelles l’affectation est plus compliquée, comme par exemple la résistance électrique, la capacité, etc.

Notre sujet exact est la force. La force \mathbf{F} est liée à la contrainte mécanique $\boldsymbol{\sigma}$ par la relation suivante :

$$\mathbf{F} = \iint_S \boldsymbol{\sigma} d\mathbf{A}. \quad (1)$$

La contrainte mécanique $\boldsymbol{\sigma}$ est une grandeur tensorielle locale, l’élément de surface $d\mathbf{A}$ est une grandeur vectorielle. Par conséquent, la force dans l’équation (1) se rapporte à la surface d’aire S .

Dans le cas d’une barre qui est sous une contrainte uniaxiale de compression ou de tension dans la direction de sa longueur, l’équation (1) se simplifie en :

$$|\mathbf{F}| = \sigma \cdot A$$

où σ est la composante de la contrainte dans la direction de la barre et A est l’aire de sa section transversale. Pour les liquides ou les gaz au repos les composantes du tenseur de contrainte correspondant aux trois directions de l’espace sont toutes égales et le tenseur est toujours une matrice diagonale. Dans ce cas la contrainte est nommée pression hydrostatique p :

$$|\mathbf{F}| = p \cdot A.$$

Quelque soit l’orientation de la surface de référence, la force a la même direction que le vecteur surface.

Les forces qui sont transmises par les champs électromagnétiques peuvent aussi être calculées par l’équation (1). Dans ce cas, $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur des contraintes de Maxwell. Si la surface S est choisie de telle sorte qu’elle englobe l’ensemble d’un corps, on obtient “la force qui agit sur le corps”.

Nos considérations montrent que, quand nous spécifions une force, nous devons indiquer la surface à laquelle elle se rapporte. Cependant, cette affirmation est en contradiction avec nos citations, qui n’ont de sens que si la force est une grandeur locale, c’est-à-dire si ses valeurs se rapportent à un point.

Nos citations appartiennent à la mécanique analytique. Dans ce contexte, une force peut effectivement être introduite comme une grandeur locale tant qu’on fonctionne avec le modèle de masses ponctuelles et de charges ponctuelles. Alors les deux quantités, masse et force, font référence à un point. Au contraire, en mécanique des milieux continus, la masse est une grandeur extensive et se rapporte donc à une région de l’espace. Par conséquent, une force se rapporte à une surface.

La mécanique du point est traitée à l’université de façon si détaillée qu’il est aisé d’oublier qu’on a affaire à un modèle qui est certes très utile, mais qui est en même temps conceptuellement quelque peu étrange. Pourquoi étrange ? Certaines grandeurs qui sont connues dans la mécanique “normale”, c’est-à-dire en mécanique des milieux continus, deviennent infinies, ou mieux n’existent pas : densités, densités de courant et contrainte mécanique.

Puisqu’en mécanique du point une force se rapporte à un point (et non à une aire), il est possible d’attribuer une force à chaque point de l’espace au moyen d’un corps-test ponctuel. De cette façon, on obtient la fonction $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{r})$, appelée “champ de force”.

Nous savons que les champs de force jouent un rôle important dans la théorie de Hamilton et Lagrange, et que beaucoup de systèmes réels peuvent être représentés avec une très bonne approximation comme des systèmes de masses ponctuelles. Cependant, nous pouvons ainsi perdre de vue le fait que les affirmations telles que celles de nos citations ne sont pas valables de façon générale, mais sont adaptées à la mécanique du point.

Origine :

Newton a attribué une force à un corps et non à un point. Comme à cette époque le concept de champ n’existait pas encore, les forces de Newton ne pouvaient pas se rapporter à une surface de référence. Par conséquent, il a attribué la force au corps au lieu de l’attribuer à sa surface frontière.

La mécanique du point qui a atteint sa pleine maturité avec Lagrange, Hamilton et Jacobi, et qui plus tard a servi de maître pour la mécanique quantique, a été si naturellement enseignée comme la véritable mécanique, que certaines conséquences gênantes liées au fait de représenter un corps à l’aide de points sont facilement négligées.

Remède :

Quand on introduit une nouvelle grandeur physique, il faut présenter clairement l’entité géométrique à laquelle ses valeurs se rapportent. La nécessité d’une telle procédure peut être aisément montrée. Établissez avec vos étudiants ou vos élèves une liste de toutes les grandeurs physiques qu’ils connaissent. Ensuite demandez-leur de préciser l’entité géométrique à laquelle se réfèrent ces grandeurs. Probablement, vous aurez une surprise déplaisante.

Au lieu de travailler avec des champs de force, considérez plutôt les intensités du champ correspondant (électrique, magnétique ou gravitationnel). Ce sont vraiment des grandeurs locales.

[1] C. Schaefer, M. Päsler: Einführung in die Theoretische Physik (Introduction à la physique théorique), Verlag Walter de Gruyter & Co 1970, p. 92

[2] Wikipedia, recherche du terme “Force field” (en anglais)

[3] Wikipedia, recherche du terme “Force” (en anglais)

Sujet :

En introduisant l'induction électromagnétique, deux types d'expérience sur l'induction sont souvent considérés.

Dans l'une d'entre elles, un conducteur électrique est déplacé dans un champ magnétique uniforme qui est constant en fonction du temps, Fig. 1a. L'interprétation de l'expérience est la suivante : une force de Lorentz agit sur les porteurs de charge et les déplace jusqu'à ce que la force électrostatique qui résulte du déplacement compense la force de Lorentz. Entre les extrémités du conducteur une différence de potentiel s'est constituée qui peut être mesurée avec un voltmètre.

Dans la seconde expérience d'induction, le conducteur électrique reste immobile et l'intensité du champ magnétique est modifiée en déplaçant l'aimant, Fig. 1b. Là-encore le voltmètre mesure une tension. Cette expérience ne peut pas être interprétée avec une force de Lorentz. Elle semble être due à un autre effet physique.

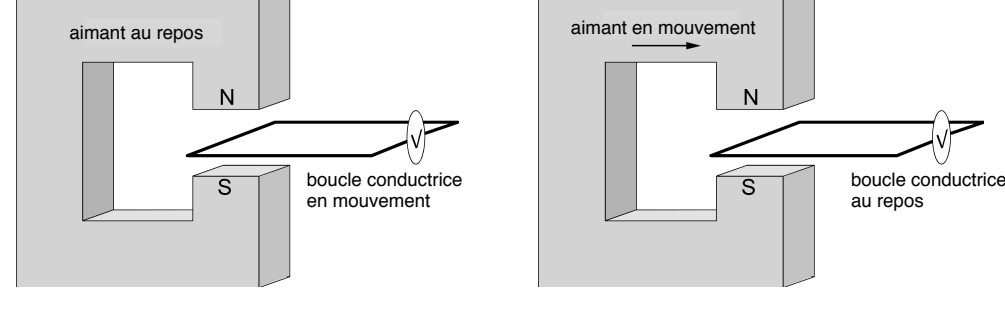


Fig. 1. Induction électromagnétique dans deux référentiels différents. (a) L'aimant est au repos, la boucle conductrice se déplace ; (b) l'aimant se déplace, la boucle conductrice est au repos.

Cependant, les deux résultats peuvent être résumés en une équation, la loi de l'induction magnétique :

$$U_{\text{ind}} = - d\phi/dt$$

Cette procédure est commentée de la façon suivante : "de façon surprenante, deux causes physiques différentes de l'induction magnétique peuvent être résumées en une seule équation".

Défaut :

La même expérience est décrite dans deux référentiels différents.

Nous commençons par considérer la deuxième expérience, Fig. 1b. La boucle est immobile et l'aimant se déplace. Pour l'interprétation, la seconde équation de Maxwell est requise :

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \dot{\mathbf{B}}$$

La densité de flux magnétique à l'intérieur de la boucle change. Par conséquent un champ électrique non conservatif ($\text{rot } \mathbf{E} \neq 0$) est créé. Au moyen de la forme intégrale de la seconde équation de Maxwell

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{r} = - \dot{\phi}$$

ce fait peut être exprimé de la façon suivante : le flux magnétique qui traverse la boucle change. Par conséquent à l'intérieur du conducteur une force électromotrice est créée.

Maintenant l'expérience de la Fig. 1.a : une force de Lorentz agit sur les porteurs de charge. Elle est compensée par une force électrostatique. Il y a un champ électrique conservatif ($\text{rot } \mathbf{E} = 0$). La densité de flux magnétique \mathbf{B} ne dépend pas du temps. Pour concilier la version de l'expérience avec la deuxième équation de Maxwell, on utilise souvent un artifice mathématique quelque peu inélégant. Quand on calcule le flux magnétique comme l'intégrale de surface de l'induction magnétique, on admet que la surface d'intégration change avec le temps. Dans un sens strict, cela correspond à un changement caché du référentiel.

Nous voyons qu'une même expérience est décrite dans deux référentiels différents. Quand on passe d'un référentiel à l'autre les intensités du champ se transforment, c'est-à-dire changent leurs valeurs. C'est seulement de cette façon qu'il est possible que dans un cas nous ayons un champ électrique conservatif et dans l'autre un champ non conservatif.

Pour mieux comprendre les conséquences d'un changement de référentiel, considérons une expérience encore plus simple : Un pôle magnétique nord unique P (l'extrémité d'un long aimant permanent) se déplace relativement à un petit corps Q qui est chargé positivement, Fig. 2. Le mouvement est perpendiculaire à la ligne droite reliant P et Q. Nous décrivons ce qui se passe dans deux référentiels : le référentiel dans lequel P est au repos (figures du haut) et celui dans lequel Q est au repos (figures du bas).

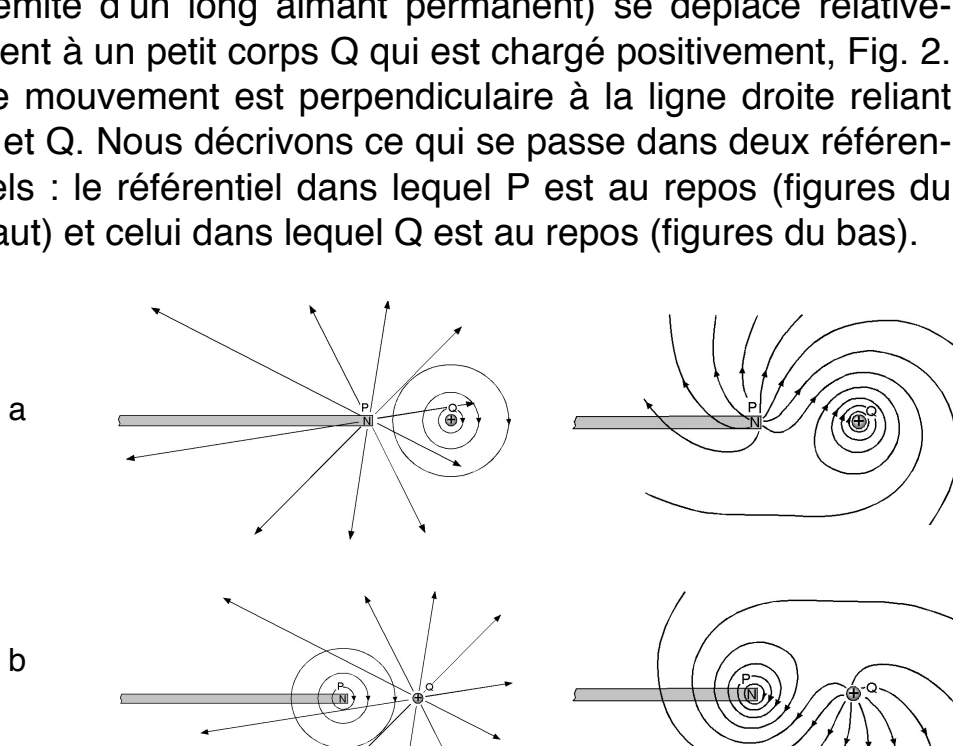


Fig. 2. Un petit corps Q qui est électriquement chargé se déplace par rapport à un pôle magnétique P. Le processus est représenté dans deux référentiels différents. (a) L'aimant est au repos, le corps électrisé se déplace dans la direction perpendiculaire au plan de la figure. (b) Le corps Q est au repos, le pôle magnétique se déplace en dehors du plan de la figure. Les lignes dans les figures du haut (a) sont magnétiques, dans la figure du bas les lignes sont électriques. Les deux dessins à gauche représentent les contributions de P et Q séparément. Les figures à droite montrent le champ résultant.

1. Référentiel de P

La charge électrique qui bouge avec le corps Q (Fig. 2a, mouvement dans le plan du dessin) représente un courant électrique. Ce courant est entouré par un champ magnétique (la première équation de Maxwell est responsable de ce champ). P "ressent" ce champ et est l'objet d'une force vers le haut. Pendant ce temps une force de Lorentz qui est orientée vers le bas agit sur Q. Par conséquent, l'interaction entre P et Q se fait par l'intermédiaire d'un champ magnétique. Dans la partie gauche de la figure 2a les contributions de P et Q au champ magnétique sont représentées séparément. De cette façon, la force sur P due au champ de Q et la force sur Q due au champ de P peuvent être lues. Ces forces peuvent aussi être lues sur la partie droite de la figure, dans laquelle les intensités des champs résultants sont représentées. Les lignes de champ sont plus denses au dessus de Q qu'en dessous. Comme il y a une contrainte de compression dans la direction perpendiculaire aux lignes de champ, Q est poussé vers le bas par le champ. De plus, les lignes de champ sont plus denses au dessus de P qu'en dessous. Comme il y a une contrainte de tension dans la direction des lignes de champ, P est tiré vers le haut par le champ.

2. Référentiel de Q

Le pôle magnétique P en mouvement représente un "courant de déplacement" magnétique (Fig. 2b, mouvement en dehors du plan de la figure). Celui-ci est entouré par un champ électrique (la deuxième équation de Maxwell est responsable de ce champ). Q ressent ce champ électrique et est soumis à une force vers le bas. Pendant ce temps une force qui est orientée vers le haut agit sur P : l'équivalent électrique de la force de Lorentz magnétique (courant magnétique dans un champ électrique). Par conséquent, l'interaction entre P et Q se fait par l'intermédiaire d'un champ électrique. Là aussi, les forces peuvent être lues sur la figure de gauche comme sur la figure de droite.

L'exemple montre qu'en électrodynamique, un changement du référentiel peut nécessiter qu'un phénomène doive être décrit parfois au moyen de la première équation de Maxwell, et parfois au moyen de la deuxième équation, et que la même interaction se fasse parfois par l'intermédiaire d'un champ électrique et parfois par l'intermédiaire d'un champ magnétique.

Origine :

Nous discutons habituellement des changements de référentiel uniquement en mécanique, et nous ne sommes pas familiers à des effets de changement de référentiel dans d'autres domaines de la physique tels que l'électrodynamique ou la thermodynamique.

Remède :

Nous savons de la mécanique qu'un changement de référentiel conduit à des complications et qu'un choix inapproprié du référentiel peut rendre fastidieuse la description d'un phénomène. Si le changement de référentiels n'est pas l'objectif pédagogique, nous recommandons d'éluider le sujet.

Sujet :

Les étudiants en physique apprennent que pour un champ électrique induit le potentiel électrique n'est pas défini : "l'existence de champs électriques rotationnels montre que tous les champs électriques n'ont pas un potentiel électrique [...]. De tels champs ont des lignes de champ fermées. Une charge électrique peut acquérir n'importe quel niveau d'énergie quand elle se déplace sur un chemin fermé."

Défaut :

Nous nous limitons à ne considérer que des champs électriques. Des arguments similaires sont valables pour les champs magnétiques et aussi pour les champs de vitesse des liquides en mouvement.

Parmi les champs électriques, il y a deux classes avec des propriétés particulières : les champs conservatifs et les champs rotationnels.

- Un champ électrique conservatif est un champ pour lequel :

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0$$

partout. Cela signifie que le champ doit avoir des sources quelque part, c'est-à-dire $\text{div } \mathbf{E}$ ne peut pas être nul partout. Sinon, il n'y aurait pas de champ du tout. Les endroits où $\text{div } \mathbf{E} \neq 0$ sont parfois appelés *sources de flux*.

- Un champ purement rotationnel est un champ pour lequel

$$\text{div } \mathbf{E} = 0$$

partout et

$$\text{rot } \mathbf{E} \neq 0$$

à certains endroits. On appelle les endroits où $\text{rot } \mathbf{E} \neq 0$ *sources de rotationnel*.

Généralement, un champ aura les deux types de sources et par conséquent n'appartiendra ni à l'une ni à l'autre catégorie.

Néanmoins, ces concepts jouent un rôle important dans l'enseignement de l'électrodynamique. La raison est qu'on imagine souvent qu'il n'y a rien d'autre dans le monde qu'un dipôle électrique, un condensateur à plaques ou un solénoïde conduisant un courant. Des affirmations simples peuvent être faites à propos de leur champ comme par exemple : le champ électrique d'un dipôle est un champ conservatif, ou le champ électrique autour d'un solénoïde dont le courant électrique change avec le temps est un champ rotationnel.

La simplicité de cette classification conduit parfois à des conclusions qui dépassent le but visé. Un exemple est notre citation : un champ électrique induit n'a pas de potentiel électrique.

Pour visualiser le problème, nous devons tout d'abord clarifier la façon dont nous voulons employer le mot champ.

Parfois nous parlons du champ électrique d'une charge ponctuelle, d'un dipôle ou d'un condensateur (ou du champ magnétique d'un solénoïde, d'une boucle de courant ou d'un barreau aimanté). Quand nous faisons cela, nous imaginons qu'il n'y a rien d'autre dans le monde que la charge ponctuelle, le dipôle, etc.

A d'autres occasions nous parlons du champ dans un domaine donné de l'espace et il se peut que les sources de ce champ ne soient pas notre premier souci.

Les affirmations comme celles de notre citation font référence à la première de ces situations. Elles sont globales et générales et font référence à des systèmes de taille infinie. Elles sont raisonnables et utiles quand l'intention est d'obtenir certaines connaissances générales concernant l'électrodynamique, mais parfois elles sont inappropriées. Quand on traite d'un problème pratique, nous ne sommes pas intéressés par un énoncé sur le monde en général, mais seulement sur une région de l'espace donnée. Par conséquent une question pratique peut être : est-ce que la région de l'espace que nous considérons contient des sources de flux ou de rotationnel ? S'il n'y a pas de source de rotationnel à l'intérieur de cette région, nous pouvons définir un potentiel. Si le rotationnel du champ est non nul seulement à certains endroits dans la région considérée, alors nous pouvons en extraire une région simplement reliée qui ne contient pas de source de rotationnel et définir un potentiel pour cette région. Le fait qu'il y ait des sources de rotationnel en dehors de notre région n'a aucune importance pour notre décision de considérer ou non un potentiel. Si nous prenions au premier degré notre citation, on ne pourrait jamais employer l'outil utile "potentiel". Il serait interdit de dire que le conducteur de neutre du système électrique est au potentiel nul car pour la distribution du champ total du circuit nous avons quelque part dans un transformateur :

$$\text{rot } \mathbf{E} \neq 0.$$

Ou considérez un appareil électronique : s'il fonctionnait avec une batterie, un potentiel existerait, mais s'il était connecté au secteur, il n'y en aurait pas.

Origine :

En électrodynamique, nous aimons travailler avec des systèmes simples comme des charges ponctuelles, des dipôles, des solénoïdes, etc.

Remède :

Celui qui pense qu'il faille définir une règle peut procéder comme en [1] :

"En dehors du conducteur, un potentiel magnétique à plusieurs valeurs existe ; pour le calcul du champ, cette ambiguïté ne joue aucun rôle"... "A l'intérieur du conducteur il n'y a pas de potentiel magnétique."

Celui qui estime que cette approche est trop pointilleuse, n'accordera pas tant d'importance au sujet. En particulier il n'exprimera pas une affirmation comme : "pour un champ électrique induit un potentiel ne peut pas être défini." Il sera décidé si une description avec un potentiel est possible en considérant le domaine de l'espace pertinent pour ce problème particulier.

[1] Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik (Manuel de physique expérimentale), Band II, Elektrizität und Magnetismus, Walter de Gruyter, Berlin 1971, p. 176

Sujet :

Extrait de trois manuels de physique de l'enseignement secondaire :

“Un changement de l'intensité du courant induit un champ électrique dans la bobine qui propulse les charges électriques...”

“Un changement de l'intensité du courant I dans une bobine ou le changement de densité de flux magnétique B qui lui est proportionnel crée dans la bobine qui est à l'origine du champ un champ électrique d'intensité E_{ind} et par conséquent une fem V_{ind} qui s'oppose à ce changement.”

“Quand l'intensité du courant électrique dans la grande bobine est changée, l'intensité du champ magnétique change également et dans la petite bobine une fem est induite.”

Extrait d'un manuel de physique universitaire :

“Les lois de Kirchoff sont aussi valables pour des courants alternatifs :

1. Loi des nœuds : à chaque nœud la somme des courants circulant vers le nœud est égale à la somme des courants qui s'en éloignent.
2. Loi des mailles : toute maille, c'est-à-dire toute boucle fermée d'un circuit, a une tension totale égale à zéro. En d'autres termes : la tension entre deux points du circuit est la même, quelque soit la branche du circuit sur laquelle elle est mesurée...”

Défaut :

Les valeurs de la plupart des grandeurs physiques font référence à une des entités géométriques suivantes : un point (par exemple, la température), une ligne orientée (par exemple, la tension), une surface orientée (par exemple, la force) ou une région de l'espace (par exemple, la masse). (Une quantité qui fait référence à une entité plus complexe, comme par exemple la résistance ou la capacité électrique représente en fait une abréviation pour une caractéristique ou une relation particulière : la caractéristique $U-I$, ou la caractéristique $Q-U$.) Chaque fois que la valeur d'une grandeur physique est donnée, il faut préciser à quel point, ligne ou région de l'espace elle s'applique. La température au point P est de 20 °C, la masse du corps B (à l'intérieur de la région de l'espace occupée par B) est de 500 g, la force sur la section transversale S du câble est de 40 N.

Dans nos citations, cette règle n'est pas respectée, ni dans le cas de la tension, ni dans le cas de l'intensité du champ électrique. Les deux grandeurs sont vaguement attribuées à une bobine, mais ce n'est pas l'affectation correcte.

Considérons la spécification d'une fem de façon générale. Elle est définie par l'intégrale du champ électrique suivant un chemin orienté,

$$U = \int_P^Q \mathbf{E} dr$$

par exemple le chemin s du point P au point Q sur la figure 1.

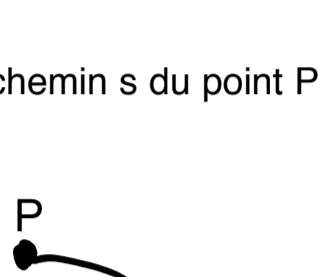


Fig. 1 : Une tension ou fem fait référence à un chemin orienté

Le chemin peut aussi être fermé.

Si le champ considéré est un champ conservatif, la valeur de la fem dépend uniquement de la position des points P et Q. Si ϕ_P et ϕ_Q sont les potentiels électriques aux points P et Q, la fem est

$$U_{PQ} = \phi_Q - \phi_P .$$

Dans ce cas nous pouvons dire que la fem se rapporte à la paire ordonnée de points (P ; Q). La valeur de la fem U_{QP} se rapportant à la paire (Q ; P) est de signe opposé, c'est-à-dire

$$U_{QP} = - U_{PQ} .$$

Souvent on est uniquement intéressé par la valeur absolue de la fem. Il est devenu pratiquement courant de parler de la “tension entre les points P et Q” sans mentionner un ordre, de la même façon qu'on parle d'une “distance entre deux points” en signifiant par là une valeur positive. C'est acceptable pour autant qu'on soit conscient des conclusions erronées qui pourraient en être tirées.

Revenons aux énoncés de nos citations. Nous considérons un circuit $R-L$ avec une bobine constituée d'un unique enroulement, Fig. 2. La force électromotrice le long d'un chemin fermé est :

$$\oint \mathbf{E} dr = - \iint \dot{\mathbf{B}} d\mathbf{A}$$

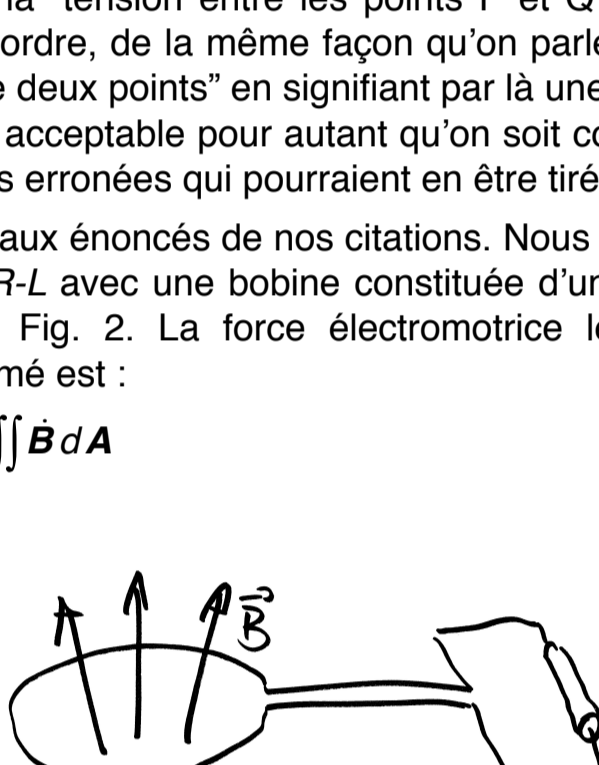


Fig. 2. Sur le contour fermé du circuit $R-L$, seule la résistance contribue à l'intégrale de l'intensité du champ électrique.

Comme chemin d'intégration nous considérons une ligne qui suit le circuit électrique ; elle passe à l'intérieur du conducteur électrique et de la résistance. L'orientation de l'élément de surface $d\mathbf{A}$ et celle de l'élément du chemin $d\mathbf{r}$ sont liées par la règle de la main droite. Si le pouce de la main droite est dirigé dans la direction de $d\mathbf{A}$, les doigts courbés pointent dans la direction de $d\mathbf{r}$, Fig. 3. Pour cette raison, peu importe la façon d'orienter $d\mathbf{A}$ du moment que $d\mathbf{r}$ est orienté de façon cohérente. Le signe de la fem induite fait référence au chemin d'intégration défini de cette façon.

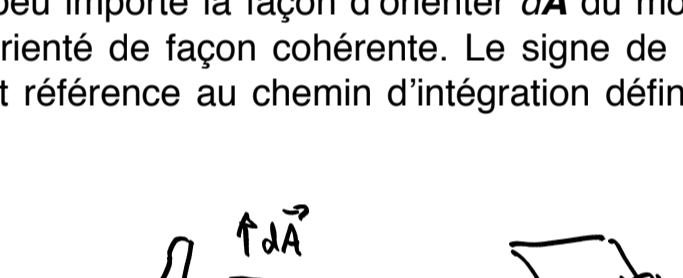


Figure 3 : Les orientations de l'élément de surface et de l'élément du chemin dans la seconde équation de Maxwell sont liées par la règle de la main droite.

Nous nous demandons maintenant comment les différentes parties du chemin contribuent à la fem totale. En d'autres termes : quelles valeurs prend l'intégrale

$$U = \int_P^Q \mathbf{E} dr$$

pour différents choix des points P et Q ? Nous gardons en tête que l'intégration est toujours faite dans la direction de $d\mathbf{r}$, c'est-à-dire avec Q après P.

Pour chaque section P-Q du conducteur, la loi d'Ohm s'applique :

$$U = R \cdot I .$$

Nous supposons que la résistance des conducteurs de notre “bobine” et des câbles d'alimentation peut être négligée comparée à la valeur R_0 de la résistance. Cela signifie que la tension aux bornes de chaque section PQ du chemin en dehors de la résistance est nulle. Ainsi seule la résistance contribue à l'intégrale le long du chemin d'intégration fermé. Uniquement à l'intérieur de la résistance, le champ électrique est différent de zéro. La force électromotrice est nécessaire pour maintenir le champ électrique.

Les arguments restent essentiellement les mêmes quand à la place de considérer une simple boucle nous considérons une bobine avec plus d'enroulements. Dans ce cas le flux magnétique total à travers le circuit est N fois le flux magnétique à travers une boucle et la surface d'intégration a une forme quelque peu compliquée. Mais le résultat est le même : seule la section dans la résistance contribue à la fem totale.

Considérons maintenant nos citations 1, 2 et 3 : il y est dit que la fem est induite à l'intérieur de la bobine. Mais qu'est-ce que cela peut signifier ? Pour spécifier la fem sans ambiguïté, le chemin auquel la fem fait référence aurait dû être indiqué. En passant à “dans de la bobine”, on suggère que le chemin d'intégration “dans de la bobine” est à l'intérieur de la bobine. Cependant, la contribution à l'intégrale le long de n'importe quel chemin à l'intérieur de la bobine est égale à zéro. Ainsi toute fem dans la bobine est égale à zéro.

Cette maladresse n'est pas seulement trouvée dans les manuels de l'enseignement secondaire. Notre quatrième citation est tirée d'un manuel universitaire. Ici, la loi des mailles est employée pour établir l'équation différentielle pour un circuit oscillant. Il y est même souligné que la fem doit être mesurée le long d'un chemin. Il n'est pas vrai cependant que la même valeur de la tension existe sur les deux branches du circuit. La raison est que la loi des mailles n'est plus valable dès que le flux magnétique à travers le circuit change en fonction du temps (tout comme la loi des nœuds ne s'applique plus dès que des charges électriques s'accumulent à la jonction).

Origine :

Quand on enseigne l'électricité, la tension est habituellement introduite en considérant des champs conservatifs. Dans ce cas particulier, une tension peut être vraiment attribuée à une paire de points. Le chemin suivi entre les deux points n'a pas d'influence. En essayant de décrire l'induction électromagnétique avec cette habitude, on rencontre nécessairement des difficultés.

Une difficulté supplémentaire est due à la conviction que la tension peut être définie de façon opérationnelle en faisant référence à un voltmètre : “une tension est ce qui est mesuré par un voltmètre”. Un voltmètre paraît être correctement employé quand ses bornes sont connectées d'une façon quelconque aux points P et Q, du moment que la même valeur de la tension existe entre les points P et Q, suivant la façon dont les câbles de connexion sont installés (notons que les câbles de connexion eux-mêmes peuvent être enroulés pour former une bobine).

Remède :

Quand on s'intéresse à un champ conservatif, la fem est égale à une différence de potentiel. Dans ce cas une tension est définie quand une paire de points rend cette spécification. Cependant, préciser l'ordre des points rend cette spécification un peu lourde et en réalité cela est rarement fait. On évite cette lourdeur, en décrivant le circuit depuis le début par des valeurs de potentiel plutôt que par des différences de potentiel. Cependant, quand il s'agit d'induction électromagnétique, de telles simplifications ne sont plus permises. Magnifique le type d'étudiants nous proposons une des deux procédures suivantes :

Université : Quand on donne une valeur de tension ou de fem, il faut préciser la ligne orientée à laquelle elle se rapporte. Cette ligne peut avoir un début et une fin ou elle peut être fermée. Si elle est fermée et si elle coïncide avec les conducteurs d'un circuit électrique, alors il est suffisant de spécifier le circuit.

Lycée : Là nous nous intéressons au cas où le changement du flux magnétique nous induit des bobines (pas dans une seule boucle fermée). Par conséquent, ne prononcez pas d'énoncés concernant la bobine mais seulement sur la partie restante du circuit ou les sections du reste du circuit. Avec elles, nous pouvons appliquer les mêmes traitements que ceux qui nous sont familiers avec un circuit en courant continu : nous pouvons attribuer un potentiel électrique à chacun de ses points.

Sujet :

Dans la littérature scientifique et technique ainsi que dans les manuels de physique pour l'école, le concept de *courants de Foucault* (NdT : en anglais "eddy currents", qui peut être traduit littéralement par "courants tourbillon") est introduit. Les définitions suivantes qui sont tirées de la littérature essaient d'expliquer ce qu'on entend par courant de Foucault :

1. "Une fem induite n'apparaît pas seulement dans une boucle de conducteur ou une bobine. L'induction électromagnétique se produit aussi quand le champ magnétique change à l'intérieur d'un corps métallique massif. A cause du volume du corps, des courants circulaires, appelés courants de Foucault, apparaissent."
2. "De tels courants induits à l'intérieur des métaux ne suivent pas un chemin bien défini comme cela serait le cas dans un fil ou une bobine. Nous les appelons courants de Foucault."
3. "Parmi les phénomènes d'induction il y a des fem et aussi des courants dont le chemin est apparemment désordonné. Ces courants génèrent des champs magnétiques qui agissent en direction opposée au mouvement et par conséquent gênent le mouvement. Ces courants sont appelés courants de Foucault."
4. "Si un transformateur a un noyau de fer massif, de tels courants apparaissent dans le noyau et produisent son échauffement [...]. Ces courants sont appelés courants de Foucault."
5. "Si le disque bouge dans un champ homogène B , le champ qui traverse chaque pièce de métal change. A sa circonférence une fem circulaire est induite. Les courants circulaires correspondants ou *courants de Foucault*, qui circulent partout à l'intérieur du métal, sont l'objet de forces de Lorentz."
6. "... Ils sont appelés courants tourbillon (courants de Foucault) car les lignes de courant des courants induits se ferment comme un tourbillon. Les courants de Foucault génèrent un champ magnétique qui est opposé à sa cause, c'est-à-dire au champ magnétique originel, suivant la loi de Lenz."
7. "Courants de Foucault : le courant alternatif qui est induit à l'intérieur d'un conducteur électrique par un champ magnétique alternatif ou par le mouvement dans un champ magnétique inhomogène. La chaleur qui est dégagée (effet Joule) peut être employée pour fondre du métal (four à induction). En général il apparaît comme une perte d'énergie indésirable (pertes par courants de Foucault), qui est diminuée dans les transformateurs en employant un noyau constitué d'un empilement de plaques qui sont isolées les unes des autres. Application : dans les freins à courants de Foucault, pour l'amortissement des appareils de mesure électrique et pour la création d'un couple de forces dans les compteurs d'électricité fonctionnant en alternatif."

Deux citations supplémentaires dans le contexte de la supraconductivité où le terme courant de Foucault n'est pas employé :

8. "Un champ magnétique extérieur induit un courant circulaire, qui est la cause d'un champ magnétique en opposition à l'intérieur du supraconducteur, qui compense le champ extérieur."
9. "La même chose est vraie pour des champs magnétiques extérieurs. Ils induisent un courant circulaire, qui rejette complètement le champ magnétique à l'extérieur. Kamerlingh Onnes lança un courant circulaire dans une bobine et déconnecta la batterie."

Défaut :

Il n'est pas facile de comprendre ce qui constitue réellement la caractéristique des courants de Foucault.

La plupart des définitions insiste sur le fait que ce sont des courants qui se ferment ou qui sont circulaires. Cependant c'est aussi vrai pour d'autres courants, même ceux d'un circuit avec une batterie. Ce n'est pas le cas seulement si dp/dt (le taux de changement de la densité de charge) est différent de zéro quelque part dans le circuit.

La définition 2 souligne que pour les courants de Foucault le chemin n'est pas bien défini. Est-ce que cela signifie que le courant pourrait prendre un autre chemin sans raison ou cause quelconque ? Tout courant circule (dans un conducteur isotrope) dans la direction du vecteur champ électrique. Les lignes de champ électrique définissent le chemin du courant électrique. C'est vrai pour un courant dans un câble électrique, aussi bien que pour des courants de Foucault dans le noyau d'un transformateur ou d'un frein à courant de Foucault.

La citation 3 dit que les courants de Foucault ont une apparence désordonnée. Qu'entend-on par cela ? Est-ce que cela signifie que nous ne pouvons pas connaître le chemin du courant ou que nous n'avons simplement pas fait l'effort de calculer la distribution du courant ?

Les citations 1 et 4 soulignent que le corps dans lequel les courants de Foucault circulent est un corps massif. Que signifie massif ? Simplement un grand volume ? Mais parfois les câbles sont plutôt massifs et les freins à courants de Foucault minuscules.

Dans certaines des définitions il est fait référence à l'effet des courants de Foucault. Dans les références 4 et 7, la production de chaleur est mentionnée, et dans 3 et 7 la propriété de freinage due à la loi de Lenz. Cependant des courants qui ne sont pas appelés courants de Foucault produisent aussi de la chaleur et ont aussi un effet de freinage. Chaque générateur souffre de cet effet de freinage.

La citation 7 montre le mieux que la définition est la même que celle de n'importe quel courant électrique induit.

Finalement un commentaire concernant le terme courant circulaire présent dans les citations 8 et 9. Ce qu'il signifie est que les lignes de courant n'ont pas de fins. Cependant c'est vrai pour n'importe quel circuit qui n'est pas interrompu par un condensateur. Nous ne soulignons généralement pas que le courant dans un circuit est circulaire. C'est déjà évident du fait que nous employons le mot "circuit".

Nous pouvons affirmer qu'un même phénomène peut se voir attribuer un nom différent en fonction des circonstances dans lesquelles il apparaît. Dans un frein nous avons des courants de Foucault, dans un supraconducteur un courant circulaire et dans le fer à repasser ou l'ampoule électrique nous avons un courant ordinaire sans nom particulier.

Il est utile de différencier en donnant des noms spécifiques à des phénomènes différents si ces noms saisissent une caractéristique essentielle. Sinon c'est contreproductif. Il est alors préférable d'utiliser un même terme permettant de mettre en avant les similarités.

Le terme courant de Foucault et l'affirmation que la distribution du courant est désorganisée ou indéfinie peut aussi être la cause d'un problème additionnel. Il suggère fortement une similitude avec les écoulements liquides turbulents, c'est-à-dire un phénomène où les termes désorganisés et indéfinis sont adaptés. Ils sont, cependant, à cet égard fondamentalement différents des courants de Foucault de l'électricité.

Origine :

En 1824 François Arago découvrit qu'une aiguille magnétisée qui pouvait tourner librement était attirée par un disque de cuivre en rotation. Cette observation a conduit Faraday à découvrir en 1832 l'induction électromagnétique.

Un disque de cuivre tournant rapidement qui est placé entre deux pôles magnétiques est ralenti. Foucault a conclu en 1855 que le travail qui a été dépensé à mettre le disque en rotation doit réapparaître en chaleur. Il a pu le montrer par des expériences impressionnantes. En français "eddy currents" sont appelés *courants de Foucault*. A la fois l'effet de freinage et la production de chaleur sont depuis lors considérés comme les caractéristiques essentielles des courants de Foucault, bien que ces deux phénomènes existent aussi pour tous les autres courants induits.

Ainsi, les circonstances particulières de la découverte a conduit à l'introduction d'un nouveau terme ou concept, en particulier le fait que l'effet d'attraction ait été découvert avant que Faraday ne donne une explication plus générale de l'induction électromagnétique.

La situation est assez similaire pour la loi de Lenz, qui, elle aussi, a survécu à sa propre généralisation [1].

Remède :

N'utilisez pas de nom particulier pour désigner les courants qui sont induits dans les noyaux magnétiques des transformateurs et dans les freins à courants de Foucault. Pour distinguer un "frein à courants de Foucault" d'un frein mécanique, vous pouvez le nommer frein à induction. S'il y a des doutes sur le fait qu'un courant soit fermé, ne l'appellez pas un courant circulaire, mais dites simplement que le circuit est fermé.

[1] F. Hermann : loi de Lenz, article 3.10

Sujet :

Pour la densité de flux magnétique B dans un long électroaimant (longueur l , nombre de tours N , perméabilité relative du noyau magnétique μ_r), la formule suivante peut être trouvée dans les manuels :

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad (1)$$

Il est supposé que l'intensité du courant électrique n'est pas trop élevée, car sinon le matériau du noyau pourrait approcher de l'état de saturation.

Dans certains manuels on peut trouver une équation équivalente à (1) :

$$B = \mu_r \cdot B_0 \quad (2)$$

Ici, B est la densité de flux à l'intérieur du matériau du noyau et B_0 est celle à l'intérieur de la bobine vide, c'est-à-dire la bobine de laquelle le noyau a été enlevé.

Défaut :

Les équations (1) et (2) ne sont pas correctes. Elles ne sont valables que si l'espace complet occupé par le champ est rempli par le matériau de perméabilité μ_r

"Dans les cas où une substance magnétisable homogène et isotrope occupe tout l'espace du champ magnétique, ou une partie de celui-ci de telle sorte que les lignes d'induction du champ magnétisant ne traversent pas la surface du matériau magnétisé, à l'intérieur du matériau la relation suivante s'applique :

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

où μ_r est la perméabilité magnétique relative de la substance magnétisable, qui...". [1]

Ainsi les équations (1) et (2) sont valables par exemple pour une bobine de forme toroïdale avec un noyau fermé.

Pour comprendre pourquoi les équations ne sont pas valables pour un électroaimant droit normal, commençons par établir les expressions correctes correspondant aux équations (1) et (2) pour le cas d'une bobine avec un noyau toroïdal qui est montré avec une fente sur la figure 1. Par la suite nous considérons le cas d'une bobine étirée.

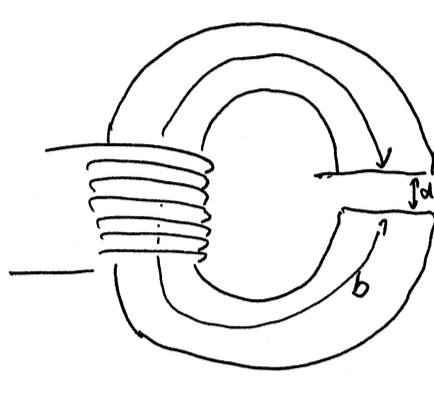


Figure 1 : la densité de flux à l'intérieur du noyau de fer et dans la fente est proportionnelle à μ_r uniquement si la largeur de la fente d est assez petite.

Nous supposons que la fente est si petite que le champ dans la fente peut être considéré homogène.

Comme nous sommes loin de la saturation et que le matériel est isotrope, nous avons partout :

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H. \quad (3)$$

Maintenant admettons que la bobine a N tours et le courant électrique est I . Nous avons alors :

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{r} = N \cdot I$$

où l'intégration se fait sur un chemin qui suit le tore.

Nous supposons maintenant que le rayon de notre anneau (le grand rayon du tore) est grand comparé au rayon d'une section transversale de l'anneau (le petit rayon du tore).

Nous pouvons aisément évaluer l'intégrale :

$$b \cdot H_m + d \cdot H_s = N \cdot I. \quad (4)$$

L'indice m fait référence au matériau constituant le noyau, s fait référence à la fente, b est la partie du chemin d'intégration qui se trouve dans le matériau du noyau, alors que d se rapporte à la partie du chemin dans la fente.

Comme le champ B est à divergence nulle nous avons :

$$B_m = B_s = B,$$

c'est-à-dire B est identique dans le matériau et dans la fente.

Nous obtenons alors en employant l'équation (2) :

$$\mu_r \cdot H_m = H_s.$$

En insérant dans l'équation (4) nous obtenons :

$$H_m = \frac{N \cdot I}{b + \mu_r d}$$

Et en employant l'équation (3)

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I}{b + \mu_r d}. \quad (5)$$

Nous voyons que la dépendance de B en μ_r n'est pas celle de l'équation (1).

Pour une bobine vide, nous obtenons :

$$B_0 = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l},$$

où l est la longueur totale du chemin d'intégration. Avec cette équation, (5) devient :

$$B = \frac{\mu_r \cdot l}{b + \mu_r d} B_0.$$

Il est apparent que la relation entre B et B_0 n'est pas celle qui est indiquée par l'équation (2).

Utilisons maintenant l'équation (5) pour deux situations particulières :

1. Si le solénoïde n'a pas de fente, c'est-à-dire si $d = 0$, ou encore approximativement si $b \gg \mu_r d$, nous avons :

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{b}. \quad (6)$$

Dans cette approximation, la densité de flux est indépendante de la (petite) largeur de la fente et est proportionnelle à la perméabilité relative du matériau constituant le noyau.

Comme le chemin b à l'intérieur du matériau est (presque) égal à la longueur du chemin total l , l'équation devient identique à l'équation (1). Ainsi nous voyons que l'équation (1) est seulement valable quand le noyau n'a pas de fente ou si la fente est petite comparée à b/μ_r .

2. Si $b \ll \mu_r d$, l'équation (5) devient approximativement

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{d}.$$

Maintenant B est indépendant de μ_r mais inversement proportionnel à la largeur de la fente. En comparant avec la bobine vide, nous obtenons :

$$B = \frac{l}{d} B_0.$$

Dans ce cas aussi B est indépendant de μ_r .

Maintenant, laquelle de ces deux approximations correspond à la situation que nous rencontrons à l'école ?

Supposons que nous ayons un aimant torique de longueur totale 50 cm, qu'on aurait construit avec du matériau scolaire typique. Puis supposez que l'aimant soit pourvu d'une fente pas plus étroite que 0,2 cm (sinon il ne serait pas possible d'introduire la sonde à effet Hall). Si nous admettons que $\mu_r = 1000$, nous trouvons que b au dénominateur du second membre de l'équation (5) est de seulement un quart de $\mu_r d$. Nous sommes donc dans le domaine de validité des équations (7) et (8) et pas dans celui de l'équation (6).

En fait à l'école la mesure de μ_r n'est pas faite avec un aimant torique, mais avec un solénoïde droit. Dans ce cas, la distance entre les deux pôles de fer est encore plus grande. Par conséquent on est définitivement dans le domaine de validité de l'équation (7). Certes ces expériences donnent une valeur de μ_r qui est trop petite d'un facteur de plus de 10.

Les équations (1) et (2) suggèrent que la densité de flux magnétique à l'intérieur du noyau d'un électroaimant augmente proportionnellement à la perméabilité relative du matériau. Cela signifierait que la densité de flux augmenterait du même facteur à l'extérieur à la surface du noyau. Ainsi un électroaimant avec un noyau de $\mu_r = 100$ aurait une densité de flux qui serait cent fois celle d'un noyau avec $\mu_r = 1000$. Cependant, l'équation (7) et aussi le bon sens nous indiquent que cela ne peut pas être vrai. Un électroaimant avec $\mu_r = 500$ peut à peine être amélioré en choisissant un autre matériau pour le noyau (cela ne signifie pas que dans certaines situations un matériau avec un très grand μ_r ne soit pas indispensable).

Origine :

Nous avons trouvé les équations incorrectes dans tous les cinq manuels de l'enseignement secondaire que nous avons consultés, mais pas dans tous les manuels universitaires ou les encyclopédies. Cela donne une indication sur l'origine de l'erreur. La physique de la secondaire doit être développée avec aussi peu de grandeurs physiques que possible. Par conséquent on essaie d'introduire la perméabilité relative sans employer le vecteur champ magnétique H . La conclusion erronée peut être issue du fait de l'introduction de μ_r de façon similaire à l'introduction de la constante diélectrique ϵ_r . Celle-ci est réalisée en insérant un diélectrique dans l'espace entre les plaques d'un condensateur et en mesurant la baisse de la différence de potentiel entre les plaques. Les intensités des champs électriques avec et sans le matériau diélectrique sont liées par :

$$E_0 = \epsilon_r \cdot E.$$

Cette relation est applicable, contrairement à son homologue magnétique, car dans le cas d'une capacité tout l'espace qui est occupé par le champ est occupé par le matériau diélectrique. Et de plus, pour les matériaux diélectriques communs ϵ_r est beaucoup plus petit que μ_r pour les matériaux typiques constituant les noyaux de fer.

Remède :

La description de phénomènes magnétostatiques devient plus claire quand on emploie H à la place de B . En faisant ainsi, on peut formuler une règle simple :

Un matériau magnétique doux déplace le champ magnétique (mesuré par H) hors de son intérieur de la même façon qu'un conducteur électrique déplace le champ électrique.

Pour la plupart des applications, cela ne fait aucune différence si le champ est, suivant la valeur de μ_r , déplacé de 99,9% ou de 99,99999%.

[1] B. M. Jaworski et A. A. Detlaf. *Physik griffbereit*, Vieweg, Braunschweig 1972, p. 410

Sujet :

Tout le monde sait que des étincelles électriques causent des interférences radio et TV. Pendant un orage, quand un interrupteur est actionné ou quand un moteur électrique tourne, on peut entendre un bruit de craquement en recevant un signal en modulation d'amplitude. L'étincelle d'allumage d'un moteur de voiture serait aussi la cause d'interférences si la voiture ne disposait pas d'un circuit dédié pour les éliminer. Dans la version originale de l'expérience de Hertz pour montrer l'existence des ondes électromagnétiques, les étincelles jouent un rôle important.

C'est une opinion très répandue de penser que le rayonnement qui est la cause de l'interférence a pour origine le jeu entre les électrodes de la bougie :

“L'étincelle génère des impulsions d'interférence à haute fréquence, qui doivent être supprimées. Pour ce faire, différents moyens sont possibles...”

“...avec l'étincelle, des décharges électriques se forment sous la forme d'oscillations électriques ; l'étincelle saute d'une sphère à l'autre ; ainsi, l'écartement entre les sphères agit comme un émetteur.”

“Une perturbation électromagnétique oscillante (par exemple une décharge par étincelles) génère des ondes électromagnétiques, qui se propagent à la vitesse de la lumière.”

On peut trouver des illustrations de l'expérience de Hertz où sont dessinées des ondes électromagnétiques émanant du jeu entre les deux moitiés de l'oscillateur.

Défaut :

Ce n'est pas l'écartement entre les électrodes qui émet le rayonnement électromagnétique mais le conducteur électrique dont l'écartement entre les électrodes est seulement une très petite partie. Dans le cas de l'oscillateur de Hertz l'antenne entière est émettrice. Le rôle de l'écartement des électrodes est celui d'un interrupteur qui connecte les deux parties de l'antenne dès que la tension a atteint une certaine valeur.

Cette tension doit être très élevée, pour obtenir une forte intensité du champ électrique, et pour obtenir une intensité élevée du champ magnétique après avoir fermé l'interrupteur. Pendant le chargement, les moitiés de l'antenne doivent être déconnectées. Au lieu de les relier au moyen d'un interrupteur normal on utilise la méthode bien plus simple de l'étincelle. Dès que la décharge est initiée, il y a une connexion conductrice. Même si la tension passe à zéro lors de l'oscillation, l'étincelle ne cesse pas car l'ionisation de l'air demeure.

La même chose est vraie pour les étincelles d'un interrupteur pour l'éclairage ou pour les balais d'un moteur électrique : l'émission de l'onde électromagnétique ne se produit pas seulement au niveau de l'étincelle, mais sur le conducteur en entier dans lequel le courant fluctue quand le circuit est ouvert. Ainsi l'étincelle est une condition nécessaire pour l'apparition de l'émission des ondes, mais la source de l'onde est l'ensemble du conducteur dans lequel se produit le changement rapide du courant.

Origine :

Chacun sait que lorsqu'il y a une étincelle, il y a aussi un bruit de craquement. L'étincelle capte l'attention, il y a de la lumière et du son en provient. Il semble plausible que l'étincelle soit aussi la source de l'onde électromagnétique qui produit l'interférence.

Cette idée fautive survit bien qu'elle soit en contradiction avec ce que les étudiants apprennent sur l'antenne dipôle : c'est toute l'antenne qui est responsable de l'émission.

Remède :

Expliquer clairement que le rôle de l'étincelle est seulement celui d'un interrupteur automatique. Le jeu entre les électrodes établit une connexion conductrice entre deux conducteurs métalliques.

3.25 Contrainte mécanique à l'intérieur d'un champ électrique et d'un champ magnétique

Sujet :

Les champs électrique et magnétique sont soumis à une contrainte mécanique. Cette contrainte est forte et il est facile de la ressentir. Elle peut être calculée au moyen d'une formule simple. Néanmoins, dans les manuels pour le lycée et l'université, elle est le plus souvent à peine mentionnée. Parfois elle est rejetée comme une contrainte fictive.

Défaut :

En traitant les forces électrique et magnétique sans mentionner la contrainte dans les champs, elles apparaissent nécessairement comme des actions à distance. En disant que les plaques d'un condensateur s'attirent l'une l'autre sans mentionner la contrainte de tension à l'intérieur du champ entre les plaques, on peut seulement conclure que la force d'une plaque sur l'autre agit à travers la distance. Aucun physicien ne croit plus en de telles actions, au moins depuis la naissance de l'électrodynamique de Maxwell. Newton considérait déjà de telles forces comme une idée dénuée de sens, et Maxwell a indiqué à de nombreuses occasions que pour lui une „actio in distans“ était absurde.

Origine :

Le problème est que le concept de force que nous utilisons encore aujourd'hui suggère des actions à distance. Newton avait introduit le “langage des forces” seulement avec réticence. Pour lui il n'y avait pas d'autre voie possible, puisque le concept de champ n'existait pas encore. Quand finalement Faraday et Maxwell introduisirent le concept de champ, il était déjà trop tard [1]. La solution de dépannage de Newton (un corps A exerce une force sur un corps B sans aucune intervention d'un médium intermédiaire) était déjà devenue la doctrine. Cependant, il y eut encore une autre déconvenue. Avec le bannissement de l'éther hors de la physique, les champs se réduisirent à une chimère – à peine plus qu'un outil mathématique pour calculer des forces. Une entité soumise à une contrainte mécanique était bien trop concrète pour correspondre à l'idée de champ durant l'interrègne sans éther. Lorsque l'espace commença à se remplir de nouveau après l'avènement de la théorie de la relativité générale et de l'électrodynamique quantique, il était bien trop tard. La contrainte mécanique à l'intérieur du champ demeurait “fictive”, ou pire : elle était complètement ignorée.

Remède :

Considérez sérieusement les champs comme des objets. Ils ont toutes les propriétés standards que nous connaissons pour les systèmes matériels – seulement à un autre degré. Les propriétés mécaniques d'un champ sont faciles à calculer à partir de son intensité. Pour le champ électrique, la contrainte en tension dans la direction des lignes de champ est

$$\sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2} |\mathbf{E}|^2.$$

La contrainte en compression perpendiculairement aux lignes de champ est

$$\sigma_{\perp} = +\frac{\epsilon_0}{2} |\mathbf{E}|^2.$$

Les valeurs absolues sont égales à la densité d'énergie du champ. Les expressions pour le champ magnétique sont analogues : au lieu de ϵ_0 il y a μ_0 , et \mathbf{H} vaut pour \mathbf{E} .

Pour aider à avoir une idée concrète du champ, lors de mes cours je mentionne le fait qu'un litre du champ magnétique d'une étoile à neutrons a une masse de 1 kg et que le poids de ce litre sur l'étoile à neutrons est $2 \cdot 10^{11}$ le poids de 1 kg sur la Terre.

[1] *J. C. Maxwell : A treatise on Electricity and Magnetism* (Un traité sur l'électricité et le magnétisme), Volume One, Dover publications, New York, 1954, Article 105, p. 157: “Si l'action de E_2 sur E_1 est effectuée, non par action directe à distance, mais au moyen d'une distribution de contrainte dans un médium s'étendant continuellement de E_2 à E_1 , il est manifeste que si nous connaissons la contrainte en chaque point de toute surface fermée s qui sépare complètement E_1 de E_2 , nous serons capables de déterminer complètement l'action mécanique de E_2 sur E_1 .”

Sujet :

Il est souvent énoncé que les lignes de champ magnétique sont fermées :

“La [...] différence est que les lignes de champ électrique commencent toujours sur les charges positives et se terminent sur les charges négatives, tandis que pour les lignes de champ magnétique il n’y a aucun point dans l’espace, où elles commencent ou finissent, puisque les monopôles magnétiques n’existent pas. Au lieu de cela, les lignes de champ magnétique forment des boucles fermées.”

“Le champ magnétique d’un courant a toujours des lignes de force fermées, contrairement aux lignes du champ électrostatique, qui débutent sur des charges positives (sources) et se terminent sur des charges négatives (puits).”

Défaut :

1. Normalement, quand on parle de lignes de champ magnétique, les lignes de champ de la densité de flux magnétique \mathbf{B} sont sous-entendues. Le fait que des lignes de champ puissent avoir un début et une fin n’est pas une particularité du champ électrique. Tout comme les lignes de champ de \mathbf{E} pour une configuration électrostatique ont un début et une fin, les lignes de champ de \mathbf{H} pour une configuration magnétostatique ont un début et une fin : elles commencent sur un pôle nord d’un corps magnétisé et se terminent sur un pôle sud.

2. Le fait que le champ \mathbf{B} soit à divergence nulle ne permet pas de conclure que les lignes du champ \mathbf{B} sont fermées, et effectivement, en général elles ne le sont pas. L’équation

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

nous dit seulement que les lignes de champ n’ont pas un début et une fin.

Que voulons-nous dire en premier lieu par “lignes de champ fermées” ? Probablement quiconque entend cet énoncé imaginera quelque chose comme ce qui suit : nous avons un courant électrique qui s’écoule par un fil électrique bien défini, typiquement à l’intérieur d’un fil électrique. Une ligne de champ arbitrairement choisie court autour de ce courant. Quand nous commençons en un point de la ligne et suivons la ligne, nous retournons à notre point de départ après un unique tour autour du courant.

Cependant, il n’y a pas de raison physique pour que la ligne doive se fermer après un tour. Et pratiquement il n’y a qu’une chance infime que cela arrive. Si exceptionnellement la ligne fait ainsi, la raison n’est pas tant physique mais plutôt géométrique. Cela est en effet ainsi dans le cas d’un câble droit de longueur infinie, ou bien dans le cas d’un circuit électrique qui est complètement confiné à un plan. La plus petite déviation à cette condition fait que la ligne, après avoir fait un tour, rate son point de départ. On pourrait croire que le champ d’un solénoïde cylindrique ou toroidal a des lignes de champ fermées, mais elles ne le sont pas [1]. L’hélicité inévitable des enroulements est la raison pour laquelle une ligne de champ ne rencontre pas son point de départ après un tour.

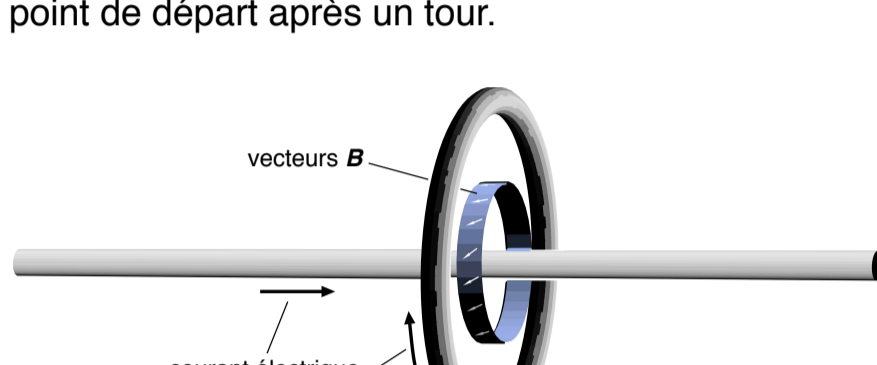


Fig. 1. Courant rectiligne et courant circulaire. Les lignes de champ dans le plan de l’anneau forment une hélice orientée par la main gauche à l’intérieur et une hélice orientée par la main droite à l’extérieur de l’anneau.

A partir de la Fig. 1, qui montre un câble droit et un câble en forme d’anneau, chacun parcouru par un courant, on peut voir que les lignes de champ ne sont pas fermées en général. Considérons les vecteurs champ dans le plan de l’anneau. A l’intérieur de l’anneau, la superposition des champs du courant circulaire et du conducteur droit résulte en une hélice orientée par la main gauche ; à l’extérieur de l’anneau, c’est une hélice orientée par la main droite. A l’évidence, les lignes de champ ne peuvent être fermées.

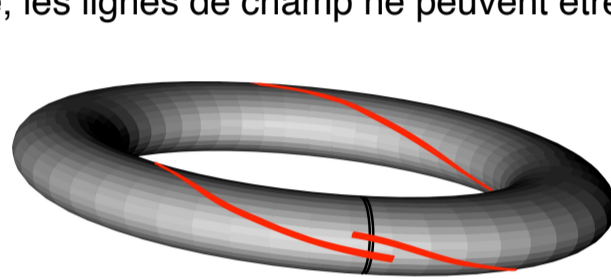


Fig. 2. Un aimant permanent flexible, initialement cylindrique puis tordu et recourbé bout à bout.

La Fig. 2 montre un autre exemple de lignes de champ qui ne sont pas fermées. Un aimant permanent flexible et cylindrique, magnétisé de manière homogène, est tordu autour de l’axe du cylindre, puis courbé et mis bout à bout pour former un tore. Les lignes de magnétisation, et donc les lignes de \mathbf{B} , font maintenant des hélices autour de l’axe du tore (qui était auparavant l’axe du cylindre) et ne se ferment jamais.

Les champs magnétiques dans la nature, par exemple ceux de la Terre ou bien les champs magnétiques cosmiques, sont si complexes que personne ne soupçonnerait que les lignes de champ puissent être toujours fermées.

Un autre exemple technique pour lequel une ligne de champ manque largement son point de départ après avoir tournée autour d’un courant est le champ magnétique d’un réacteur à fusion.

Un très bel article de Joseph Slepian [2] dans l’American Journal of Physics a montré en 1951 que les lignes de champ de \mathbf{B} ne sont pas fermées en général. L’article ne contient pas une seule équation ni aucun chiffre. Dans les décennies qui ont suivies plusieurs autres articles furent écrits sur le sujet, cf. [1, 3] et la littérature qui y est citée.

Origine :

1. Dans les cours à l’école et à l’université, seuls les champs magnétiques simples sont traités : le champ d’un aimant droit et celui d’un aimant en fer à cheval, le champ de courants électriques dans un conducteur droit ou dans un anneau, et le champ dans un solénoïde. Les lignes de champ de \mathbf{B} d’un aimant droit idéal, c’est-à-dire un barreau aimanté avec une magnétisation parfaitement homogène, ou les lignes de champ d’un aimant en fer à cheval parfait sont effectivement fermées ; la même chose est vraie pour le champ d’un câble parfaitement rectiligne ou pour un conducteur parfaitement circulaire. Dans le cas d’un solénoïde, cela est vrai seulement de manière approximative. Le fait que ces sources de champs magnétiques soient majoritairement considérées peut expliquer pourquoi il semble plausible que les lignes de champ soient toujours fermées.

2. Les lignes de champ sont un outil graphique pour la représentation des distributions de l’intensité du champ. Cependant, les étudiants les perçoivent souvent quelque chose à laquelle on peut attribuer une réalité physique. Si l’on imagine les lignes de champ comme des objets physiques, il y a un argument en faveur de l’idée que les lignes de champ sont fermées, même si ce n’est pas après un unique tour autour d’un conducteur parcouru par un courant. Au lieu d’une ligne de champ, considérez un fil. Quelqu’un en a fait une pelote emmêlée et nous affirme que le fil n’a pas de début ni de fin. Dans ce cas la conclusion que le fil forme une boucle fermée ou plusieurs boucles fermées est correcte. Pourquoi cet argument ne vaut-il pas pour les lignes de champ magnétique ? Les lignes de champ ne sont pas des objets physiques mais des objets mathématiques, c’est-à-dire des lignes. Tout ce qu’on pourrait dire dans le meilleur des cas est que, en suivant une ligne de champ, on peut approcher aussi près que l’on veut du point de départ.

Remède :

Évitez de dire que les lignes de champ sont fermées. Il suffit de dire qu’elles n’ont pas de point de départ ni de fin. Toutefois, en faisant cela, on essaierait seulement d’éliminer un symptôme ; les racines du mal sont plus profondes. La cause essentielle de l’erreur est l’idée fautive des lignes de champ en tant qu’objets physiques.

Par conséquent, il est très important, lors de l’introduction du champ de lignes de champ, de ne pas commencer la représentation du champ par des lignes de champ. L’image à montrer en premier pourrait plutôt être une représentation de la distribution d’énergie d’un champ au moyen d’un dégradé de gris, Fig. 3a.

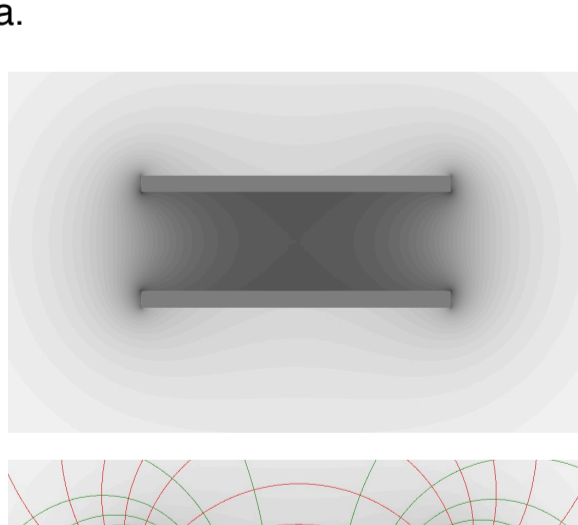


Fig. 3. (a) Représentation du champ d’un solénoïde au moyen d’un dégradé de gris ; (b) représentation du champ d’un solénoïde au moyen d’un dégradé de gris, lignes de champ et surfaces de champ

Ensuite seulement, on montrerait que le champ a une direction préférentielle en chaque point, c’est-à-dire qu’il n’est pas isotrope. Pour représenter graphiquement ce fait, on commence par dessiner des flèches de vecteur. Puis on arrive à une représentation qui est plus connue de nos raisons pratiques : on dessine les lignes de champ, mais aussi les surfaces de champ, Fig. 3b. Nous entendons par surfaces de champ les surfaces orthogonales aux lignes de champ. Pour les champs conservatifs, elles sont identiques aux surfaces équipotentielles. Pour Maxwell il allait de soi de représenter dans toutes ses figures les lignes de champ et les surfaces de champ [4]. Ces deux éléments ont une signification intuitive simple : dans la direction des lignes de champ le champ est en contrainte de tension, dans toutes les directions orthogonales, c’est-à-dire les directions des surfaces de champ, il est en contrainte de compression. Sachant cela, on n’interprétera plus les lignes de champ comme des filaments qui courent à travers le champ, mais comme un moyen de représenter graphiquement la contrainte mécanique dans le champ.

[1] *M. Lieberherr*: The magnetic field lines of a helical coil are not simple loops (Les lignes de champ magnétique d’un enroulement en hélice ne sont pas de simples boucles), Am. J. Phys. 78 (2010), p 1117-1119

[2] *J. Slepian*: Lines of Force in Electric and Magnetic Fields (Lignes de forces dans les champs électrique et magnétique), Am. J. Phys. 19 (1951), p 87-90

[3] *M. Schirber*: Magnetic Fields in Chaos (Champs magnétiques dans le chaos), Phys. Rev. Focus, <http://focus.aps.org/story/v24/st24>

[4] *J. C. Maxwell*: Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus (Manuel d’électricité et de magnétisme), Verlag von Julius Springer, Berlin 1883, Tableau XII à XXI

4

Thermodynamique

4.1 Mécanique et thermodynamique

Sujet :

La mécanique représente le domaine le plus important de la physique. Elle est la base de la physique. La thermodynamique, au contraire, n'est qu'une spécialité moins importante parmi d'autres. C'est là une opinion largement répandue. On peut le voir quand on considère des programmes d'études et des manuels scolaires et universitaires. Un cours typique pour pouvoir enseigner dans le secondaire alloue 6 heures par semaine à la mécanique, mais seulement 2,5 à la thermodynamique. La proportion est la même quant aux nombres de pages des manuels pour le lycée et pour l'université.

On dit souvent et de façon explicite que la mécanique est de la plus grande importance. Dans un manuel scolaire, on peut trouver la phrase suivante à propos de $F = m \cdot a$: "Ceci est vraiment l'énoncé le plus important de ce livre ; il a changé le monde depuis 1686."

Défaut :

La thermodynamique n'est pas seulement traitée beaucoup plus succinctement que la mécanique dans le programme d'enseignement. De plus, souvent ce qui est enseigné n'est pas satisfaisant. Conformément au programme scolaire, elle devrait normalement être traitée en classe de 11ème [correspondant approximativement à la classe de 1^{ère}, NdT] après la mécanique, c'est-à-dire pendant le reste de l'année scolaire. Cependant, dans les turbulences de la fin de l'année scolaire, la thermodynamique est souvent sacrifiée. La situation est la même à l'université. Souvent la thermodynamique est enseignée dans un cours sur un semestre en même temps que l'optique. On commence avec l'optique, mais ensuite le temps est compté pour la thermodynamique. En conséquence, beaucoup d'étudiants quittent l'école et aussi l'université en étant incultes en thermodynamique.

Vu d'aujourd'hui, la mécanique ne mérite pas cette position préférentielle et la thermodynamique ne mérite pas sa mauvaise réputation.

Pourquoi seulement l'équation $F = m \cdot a$ serait-elle si importante ? C'est essentiellement la deuxième loi de Newton, $F = dp/dt$, qui exprime la conservation de la quantité de mouvement p . Mais la conservation de la quantité de mouvement n'est pas unique ; il y a des lois semblables pour l'énergie, le moment cinétique et la charge électrique. Et la série inclut aussi la loi qui énonce la non-conservation de l'entropie : l'entropie peut être créée mais pas détruite.

Origine :

Nous ne pouvons pas l'exprimer plus clairement que ne le fit Ernst Mach en 1883 [1] :

"Quand nous voyons les encyclopédistes du 18ème siècle se croire tout proche de leur but, qui était l'explication physico-mécanique de la nature entière, et Laplace imaginer un génie qui pourrait donner l'état de l'univers à un instant quelconque de l'avenir, s'il connaissait, à un instant initial, toutes les masses qui le composent, avec leurs positions et leurs vitesses, non seulement cette surestimation enthousiaste de la portée des conceptions physiques et mécaniques acquises dans le 18ème siècle nous semble bien excusable, mais elle est vraiment pour nous un spectacle réconfortant, noble et élevé, et nous pouvons sympathiser du plus profond de notre cœur avec cette joie intellectuelle unique dans l'histoire.

Maintenant qu'un siècle s'est écoulé, et que nous sommes devenus plus réfléchis, cette conception du monde des encyclopédistes nous apparaît comme une mythologie mécanique en opposition avec la mythologie animique des anciennes religions. Toutes deux renferment des amplifications abusives et imaginaires d'une connaissance unilatérale."

Remède :

Il n'est pas facile, car il y a une longue tradition d'enseignement. On pourrait commencer la déconstruction de la mécanique en réduisant la place de la cinématique.

[1] La mécanique. Exposé historique et critique de son développement, Edition scientifique A. Hermann, Paris, 1904, traduit de *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, E. Mach, 1883

Sujet :

Lors de l'introduction de la Première Loi de la Thermodynamique, on souligne souvent que l'énergie interne est une variable d'état. Quand on introduit l'entropie, on insiste aussi sur le fait que c'est une variable d'état. Récemment, le terme variable d'état a aussi été utilisé pour la pression, particulièrement dans la littérature scolaire.

Défaut :

Le nom variable d'état a été introduit pour exprimer qu'une grandeur physique dans un état particulier a une certaine valeur. Cependant, ceci est vrai pour toutes les grandeurs physiques à deux exceptions près : le travail et la chaleur. Si on insiste pour désigner seulement quelques grandeurs comme variables d'état, cela donne l'impression que les variables d'état ne correspondent pas à une situation normale, mais sont une exception. Le fait qu'une grandeur, dans un état bien défini, a une certaine valeur, est une caractéristique que l'on attend de toute façon. Si l'on veut insister sur quelque chose, il faudrait plutôt souligner qu'il n'y a que deux grandeurs, le travail et la chaleur, qui ne correspondent pas à cette attente raisonnable.

Origine :

Elle est quelque peu différente pour l'énergie interne, l'entropie et la pression.

La première formulation de la conservation de l'énergie est apparue dans la Première Loi de la Thermodynamique, qui met en relation les variables travail et chaleur avec l'énergie interne. Les scientifiques furent heureux de faire remarquer que l'énergie interne est une variable d'état, en soulignant que l'un des termes représente une quantité avec des propriétés normales. Il est apparu remarquable que la somme de deux variables qui ne sont pas des variables d'état donne une variable d'état.

Venons-en maintenant à l'entropie. Depuis les débuts de la thermodynamique on a cherché à introduire une mesure pour quantifier ce qu'en langage familier on appelle la chaleur. Cela allait sans dire que ce devait être une variable d'état. A la fin du 18ème siècle, Joseph Black a introduit une telle grandeur. D'un point de vue moderne, la chaleur selon Black est bien identifiée à l'entropie. Cependant, depuis le milieu du 19ème siècle, le terme chaleur a été redéfini comme une forme particulière d'énergie, c'est à dire qui n'est pas une variable d'état. Ainsi, la chaleur selon Black a disparu de la physique, jusqu'à ce qu'elle soit réintroduite par Clausius sous le nom d'entropie. Comme Clausius a défini l'entropie par l'intermédiaire de la chaleur qui n'est pas une variable d'état, il est apparu utile d'insister sur le fait que l'entropie était bien une variable d'état. Ce n'est que beaucoup plus tard que l'on reconnut que cette entropie nouvellement introduite était fondamentalement identique avec le concept de chaleur du temps de Black et de Carnot ([1], [2]).

La pression est souvent introduite par l'intermédiaire d'une force. Une force est toujours exercée par un corps sur un autre. La force est manifestement un concept de l'époque où les interactions mécaniques étaient interprétées comme des actions à distance. Par conséquent, il est naturel que l'étudiant recherche un corps qui exerce la pression et un autre sur lequel elle est exercée. Pour le détourner de cette fausse attente, on souligne que la pression est une variable d'état. Cette explication n'est nécessitée que parce que la pression a été introduite depuis le début de façon inappropriée [3].

Remède :

Petite solution : On ne dit pas que l'énergie interne et que l'entropie sont des variables d'état – cela devrait être clair de toutes façons – mais on souligne que le travail et la chaleur sont deux constructions inhabituelles qui ne rentrent pas dans le moule des autres grandeurs physiques.

Grande solution : On procède entièrement sans introduire des symboles et des noms séparés pour les expressions que l'on a l'habitude d'appeler travail et chaleur. En tant que professeur, on peut au premier abord avoir le sentiment qu'il manque quelque chose d'important. Mais on découvrira bientôt qu'il ne manque rien, et qu'en même temps on se débarrasse de quelques problèmes conceptuels.

On peut aussi omettre en toute confiance la désignation "variable d'état" au sujet de la pression. Au lieu d'introduire la grandeur simple "pression" par l'intermédiaire de la grandeur compliquée "force", on peut introduire la pression en tant que grandeur indépendante, en commençant par exemple par une différence de pression : une différence de pression est la cause d'un courant d'air ou d'eau. Il n'est alors plus nécessaire de mentionner que la pression est une grandeur tout à fait normale – une "variable d'état". Le doute qu'il en soit autrement n'existe pas.

[1] Callendar, H. L.: The caloric Theory of Heat and Carnot's Principle (La théorie du calorique et le principe de Carnot). – Proc. Phys. Soc. London 23 (1911). – p. 153: "Finalement, en 1865 quand [l'importance du calorique] fut reconnue plus complètement, Clausius lui donna le nom d'"entropie" et la définit comme l'intégrale de dQ/T . Une telle définition en appelle seulement au mathématicien. Pour faire justice à Carnot, elle devrait être appelée calorique, et définie directement par son équation..., que n'importe quel lycéen pourrait comprendre. Même le mathématicien y gagnerait en considérant le calorique comme un fluide, comme l'électricité, pouvant être générée par le frottement ou tout autre processus irréversible."

[2] Job, G.: Neudarstellung der Wärmelehre – Die Entropie als Wärme (Nouvelle représentation de la chaleur – l'entropie comme chaleur). – Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main 1972.

[3] Herrmann, F.: Einige Vorschläge zur Einführung des Drucks (Quelques propositions pour l'introduction de la pression). – In: Praxis der Naturwissenschaften⁵ (1997). – p. 37

4.3 Les noms de la loi d'état des gaz parfaits

Sujet :

L'équation $pV = nRT$ est introduite sous différents noms : équation des gaz, équation générale des gaz, loi universelle des gaz, équation d'état des gaz parfaits, et d'autres. Comme cette équation met en relation plus de deux variables, on peut être intéressé par les relations entre deux seulement de ces grandeurs, en gardant constantes les autres variables. Les relations correspondantes sont connues sous des noms particuliers. La relation entre p et V constitue la loi de Boyle, la relation $V-T$ est appelée loi de Charles, la relation de proportionnalité $p-T$ est la loi d'Amontons et la relation $V-n$ est la loi d'Avogadro. Dans les littératures française et allemande, la loi de Boyle est appelée loi de Boyle-Mariotte et la loi de Charles, la loi de Gay-Lussac.

Défaut :

1. On peut insister sur l'importance d'une équation en lui donnant un nom propre. Un tel nom permet aussi d'y faire référence facilement. L'équation des gaz (appelons-la ainsi) est importante. Elle est valide pour la matière en un sens très large, pourvu que la substance correspondante soit suffisamment diluée et/ou que la température soit suffisamment élevée. L'équation ne s'applique pas seulement aux gaz dans le sens habituel, comme par exemple à l'air qui nous entoure, mais aussi au soluté dans une solution diluée ou au plasma comprimé dans la région centrale du soleil. Ainsi, l'équation mérite un nom. Une autre question se pose de savoir si les attributs "générale" ou "universelle" sont appropriés, puisqu'une telle classification peut difficilement être surpassée.

2. C'est une belle coutume de donner à des équations le nom de scientifiques illustres. Cependant, comme le montre l'équation des gaz, cela peut aussi être excessif. Dans notre cas, six chercheurs sont honorés au moyen d'une seule équation. Le problème de baptiser une équation avec le nom d'un scientifique est le même que pour le nom des rues. Quelqu'un peut obtenir des honneurs inespérés quand une petite allée qui porte son nom est transformée plus tard en artère principale. Au contraire, il y a de grands scientifiques qui n'ont jamais parrainé une équation importante, Leibniz ou Descartes par exemple. D'autres encore sont honorés pour un aspect mineur de leur travail, comme par exemple Huygens pour les ondes élémentaires ou Faraday pour le quelque peu dérisoire effet Faraday ou la curieuse cavité de Faraday.

3. Revenons à l'équation des gaz. Elle est équivalente à diverses autres équations qui apparemment affirment quelque chose de plutôt différent de la loi des gaz sous sa forme habituelle :

(a) $E(V) - E(V_0) = 0$ pour $T = \text{const}$,

soit : à température fixée, l'énergie d'un gaz est indépendante du volume.

(b) $S(V) - S(V_0) = n \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_0}$, pour $T = \text{const}$,

soit : à température fixée, l'entropie dépend du volume selon une loi logarithmique.

(c) $\mu(p) - \mu(p_0) = R \cdot T \cdot \ln \frac{p}{p_0}$, pour $T = \text{const}$,

soit : à température fixée, le potentiel chimique dépend de la pression selon une loi logarithmique. (A partir de cette équation on obtient facilement la loi d'action de masse et la formule du nivellement barométrique).

Chacune de ces trois équations peut être dérivée de "l'équation des gaz" sans aucun autre apport de physique. On pourrait donc appeler aussi chacune d'elles "équation des gaz", ce qui n'est pas fait.

4. Un gaz n'est pas pleinement décrit par l'équation des gaz ou "l'équation thermique d'état". L'équation thermique d'état n'est qu'une équation d'état parmi d'autres qui sont nécessaires pour caractériser complètement un gaz particulier. Ainsi elle ne décrit pas les propriétés caloriques d'un gaz parfait : comment la température dépend-elle de la chaleur (entropie) contenue dans le gaz ? La réponse à cette question est donnée par "l'équation calorique d'état". Les effets qu'elle décrit sont aussi frappants que ceux décrits par l'équation thermique d'état. Traditionnellement, à l'école, elle est considérée comme moins importante, avec pour résultat que beaucoup de processus intéressants sont ignorés en classe : la détente isentropique dans les machines à vapeur et les moteurs à combustion interne, ou la baisse de la température quand l'altitude augmente.

Origine :

1. Dans le traitement habituel de l'équation des gaz et des proportionnalités diverses qu'elle contient, on peut reconnaître les contributions variées des différentes époques de sa genèse. On voit aussi les différences de point de vue des différents pays.

2. L'équation thermique d'état, qui contient les variables p , V et T , qui sont faciles à mesurer, est trop privilégiée du fait que les grandeurs entropie et potentiel chimique, qui pour beaucoup de processus sont plus importantes, et, soit dit en passant, sont aussi faciles à mesurer, n'ont jamais trouvé une large adhésion.

Remède :

1. Donner des noms aux équations avec parcimonie. Dans le cas de l'équation des gaz nous proposons de ne pas donner de nom aux proportionnalités partielles. Nous recommandons une certaine prudence dans l'attribution d'adjectifs tels que "général", "universel", "fondamental" etc.

2. Si les logarithmes sont connus, discutez de la dépendance au volume de l'entropie et de la dépendance à la pression du potentiel chimique. Traitez dans tous les cas les propriétés "caloriques" des gaz, particulièrement la relation entre la température et le volume à entropie constante, puisqu'elle permet de comprendre le principe de fonctionnement des moteurs thermiques ainsi que la stratification de température dans l'atmosphère.

4.4 Echelles de température préliminaires

Sujet :

Habituellement une échelle de température est introduite en se référant à la dilatation thermique, particulièrement celle des gaz, et la température est définie seulement par la suite, voire pas du tout, comme une grandeur “absolue” T , c’est-à-dire une grandeur indépendante de toute substance thermométrique, en postulant que le rendement η d’un cycle de Carnot entre les températures T_+ et T_- est donné par $\eta = (T_+ - T_-)/T_+$.

Défaut :

En considérant un comportement commun à tous les gaz de faible densité, de façon qu’une échelle thermométrique unique θ puisse leur être associée, et en oubliant toutes les autres substances thermométriques, nous restons avec deux grandeurs pour la température, θ et T , dont la définition, le maniement et la relation doivent être discutés. Le résultat est $\theta \sim T$ et donc $\theta \equiv T$, si pour seulement un point – par exemple le point triple de l’eau – $\theta = T$ est requis. Le cheminement n’est pas difficile, mais il est rarement donné.

Il est plus facile de s’abstenir complètement d’échelles de température provisoires et de cycles de Carnot, et à la place de quantifier directement S et de définir la température T en partant du courant d’entropie I_S et du courant d’énergie P , et en utilisant $P = T I_S$. Il est facile de montrer que la grandeur T introduite de cette façon a toutes les propriétés familières d’une température et peut être mesurée avec un thermomètre classique. Pour l’étalonnage, on peut tirer parti du simple fait que si l’énergie interne ne dépend que de la température (comme cela est vrai pour les gaz de faible densité), la pression p à volume constant doit être proportionnelle à T , de sorte que la température peut être déterminée en mesurant p . De plus, la physique des machines thermiques simples et des pompes à chaleur retombe sur ses pieds. Deux ou trois lignes et les quatre opérations arithmétiques de base suffisent, tandis que normalement on emploie des diagrammes de travail et de chaleur, ainsi que du calcul différentiel et intégral de fonctions de plusieurs variables.

Origine :

Les manuels suivent de façon stricte le développement historique. Le fait que les thermomètres à dilatation de liquide sont toujours utilisés fait apparaître naturel que nous introduisons le concept de température à partir de la dilatation thermique. Comme l’équation des gaz est un objectif d’enseignement important, le traitement de l’échelle de température basée sur la dilatation des gaz semble évident. Par ailleurs, conformément à la conviction générale, l’entropie est au delà de l’horizon scolaire et ainsi en dehors du champ de vision des pédagogues.

Remède :

Il ne pourrait être que bénéfique d’abandonner les préjugés nourris pendant un siècle et demi contre l’entropie et qui appartiennent à notre arrière plan d’enseignement de la physique, qui l’ont reléguée en tant que variable d’état compliquée dans un calcul abstrait et lui dénie sans raison toute propriété à portée de nos sens.

4.5 Dilatation thermique des liquides et des solides

Sujet :

La dilatation thermique des liquides et des solides.

Défaut :

Pour des changements de température de l'ordre de 10°C , l'effet est de l'ordre du millième. Il y a beaucoup d'autres effets du même ordre de grandeur. En général nous ne pouvons pas nous permettre de traiter d'effets aussi faibles en enseignant la physique à des débutants.

Un argument en faveur de ce sujet pourrait être qu'il y a des phénomènes dans notre vie de tous les jours qui peuvent être expliqués par la dilatation thermique des liquides ou des solides. Un exemple est le thermomètre à mercure. Il y a cependant d'autres types de thermomètres qui sont aussi importants et pour lesquels nous ne consacrons aucun temps à l'enseignement.

Un autre exemple qui est mentionné quand on enseigne ce sujet est la dilatation des rails de chemin de fer et des ponts. Nous pensons que ce sujet est discutable. Quand on explique la dilatation des ponts, on devrait aussi expliquer pourquoi la plupart des autres objets ne se dilatent pas quand on les chauffe : les maisons, les rues ou même la Terre entière. Et quand on cite les rails de chemin de fer, on devrait expliquer pourquoi dans les temps anciens il y avait un espace à la jonction entre les rails et pourquoi de nos jours il n'y en a pas.

Il y a un autre effet que l'on confond parfois avec la dilatation thermique à pression constante : c'est la variation de pression à volume constant. Cet effet est important et impressionnant, contrairement à la dilatation thermique. Les deux effets – changement de volume à pression constante et changement de pression à volume constant – sont régis par deux coefficients indépendants. Le changement de pression à volume constant dans les liquides et les solides n'est en temps normal pas traité dans les cours pour débutants. La raison semble être que même ce gros effet n'est pas assez important. Chaque sujet est en compétition avec beaucoup d'autres sujets. Et il y en a tant qui sont assez importants, mais nous n'avons pas le temps d'en parler.

Origine :

La raison pour laquelle la dilatation thermique des liquides et des solides occupe autant de temps d'enseignement ne réside pas dans son importance pour les applications. C'est la vieille échelle de température basée sur le mercure. Avant que l'échelle de température thermodynamique soit introduite en physique, la définition de la température dépendait de la dilatation thermique du mercure. Mais cet argument n'est plus valide de nos jours.

Remède :

Consacrer moins de temps au sujet. Ce ne serait pas grave s'il était complètement ignoré.

4.6 Quantité de chaleur et capacité calorifique

Sujet :

La grandeur Q liée à une transformation qui apparaît dans la première loi de la thermodynamique est appelée quantité de chaleur, énergie thermique ou simplement chaleur. La capacité calorifique C est définie comme le quotient de la chaleur ΔQ fournie à un système par l'augmentation de température qui en résulte ΔT :

$$C := \Delta Q / \Delta T \quad (1)$$

Habituellement on utilise la chaleur massique c obtenue en divisant C par la masse. Pour nos besoins il suffit de considérer C .

Défaut :

Le concept de “capacité” a à voir avec le stockage. Le problème devient évident avec le nom de la “grandeur” que l'on doit stocker : la chaleur Q . Quand on appelle Q quantité de chaleur ou énergie calorifique, on suggère que Q a une valeur bien définie pour un système dans un état donné, et que cette valeur concerne une région donnée de l'espace, ou dans d'autres termes : que Q est une grandeur extensive ou “de type substance”. En fait Q ne possède pas ces propriétés. Q n'est pas une grandeur physique dans le sens habituel du terme, mais $dQ = TdS$ est une pseudo forme différentielle. Pour cette raison il est impossible de l'utiliser en tant que mesure de la chaleur contenue dans un système. Alors qu'il est acceptable de dire que l'on fournit la quantité de chaleur dQ à un système, il n'est pas correct de dire qu'ainsi la chaleur contenue dans le système varie de dQ . Cela semble être un sophisme mais ce n'en est pas un.

Le problème est simplement que la dénomination ne convient pas. Le terme chaleur ou quantité de chaleur suggère que la grandeur correspondante est une grandeur extensive. Mais Q ou dQ n'est pas une grandeur extensive. Il vaudrait mieux ne pas donner un nom ou un symbole propre à cette forme différentielle. Ainsi on ne provoquerait pas des attentes qui ne pourront pas être satisfaites ultérieurement.

Maintenant, si une quantité de chaleur ne peut pas être définie par Q , alors la grandeur définie par l'équation (1) ne peut pas être interprétée comme une capacité calorifique.

Ceux qui ont enseigné la thermodynamique savent combien il est difficile de faire comprendre aux étudiants que Q n'est pas une variable d'état. Les efforts nécessaires sont contrés par le nom de capacité calorifique qui ne convient pas.

Origine :

Les deux termes “chaleur” et “capacité calorifique” ont été introduits au 18ème siècle, c'est à dire à une époque où la grandeur liée à une transformation Q n'existait pas encore. Le terme chaleur était utilisé pour une variable d'état de type substance qui mesurait ce qui en termes courants serait appelé chaleur ou quantité de chaleur. Quand l'énergie apparut au milieu du 19ème siècle, la vieille grandeur d'état chaleur a été dépossédée de son nom, et désormais le nom chaleur a été attribué à une soit-disant forme d'énergie. Comme la nouvelle chaleur avait le mauvais goût de ne pas avoir une valeur dans un état donné, elle fut qualifiée par euphémisme de grandeur liée à une transformation.

Remède :

Quand on fait de la thermodynamique, il faut utiliser l'entropie depuis le tout début. Elle peut être introduite comme la grandeur qui mesure ce qui en termes courants est appelée la chaleur. On peut toujours dire combien d'entropie est contenue ou stockée dans un système et définir une capacité correspondante dS/dT a un sens. La capacité entropique est reliée à la “capacité calorifique” usuelle de façon simple :

$$C = T dS/dT .$$

(à propos, la capacité entropique apparaît dans quelques manuels de physique des solides sous le nom de constante de Sommerfeld [1].)

[1] Kubo, R. und Nagamiya, T.: Solid State Physics (Physique de l'état solide). – McGraw-Hill Book Co., New York 1969. – p. 94

Sujet :

Lu dans un manuel scolaire :

“La transmission d’énergie sous forme de chaleur peut se produire en tant que conduction thermique, convection ou rayonnement.”

Dans une encyclopédie scientifique, sous le mot-clé *transfert de chaleur* :

“Le transfert de chaleur peut se produire de trois façons différentes : par conduction thermique où la chaleur s’écoule à travers un milieu solide ou un fluide au repos ; par convection, où la chaleur est transportée à travers le mouvement d’un milieu (généralement un fluide) ; par rayonnement, où la chaleur est transmise sous la forme d’ondes électromagnétiques.”

Défaut :

La phrase “Dans notre jardin il y a des arbres, des plantes utiles, des légumes et des mauvaises herbes” n’est pas incorrecte, mais il y a quelque chose de gênant. Elle suggère que les quatre catégories de plantes mentionnées représentent une classification des plantes du jardin, ce qu’elle n’est pas. Il y a des plantes qui rentrent dans plusieurs catégories, par exemple les carottes ou les cerisiers.

Il en est de même pour nos citations à propos du transfert de chaleur. Elles suggèrent que tout transfert correspond à une des catégories conduction, convection ou rayonnement, ou au moins qu’il est possible de dire jusqu’à quel point il correspond à l’un ou l’autre type de transport. Cependant, il existe des phénomènes de transfert de chaleur qui ne peuvent pas être classés selon ce schéma.

Avant de voir quelques exemples, on peut caractériser les trois catégories avec un peu plus de détails :

1. *Conduction thermique* : De la chaleur et de l’entropie se propagent à travers un matériau ; le matériau ne se déplace pas. Le transport est dissipatif, c’est à dire de l’entropie nouvelle est produite. La “force motrice” du processus est un gradient de température.

2. *Convection* : De la chaleur et de l’entropie sont fournies à un matériau (par exemple de l’air ou de l’eau). Le matériau se déplace et emporte l’entropie avec lui. Aucun gradient de température n’est nécessaire pour le transport. Cependant, pour déplacer le matériau, il doit y avoir une autre “force motrice”, par exemple un gradient de pression.

3. *Rayonnement thermique* : La chaleur est transportée par un rayonnement électromagnétique.

A présent on peut voir plus facilement que ces catégories ne définissent pas une classification. La première et la deuxième définition (conduction et convection) sont caractérisées par la nature de la force motrice. Elles ne disent rien sur le type des particules porteuses. En fait, la première catégorie comprend la conduction thermique dans des corps non-métalliques (les porteurs sont des phonons), dans les métaux (les porteurs sont des électrons) et dans les gaz (les particules porteuses sont des molécules).

La troisième catégorie au contraire est seulement caractérisée par les particules porteuses, à savoir les photons. Un autre problème avec cette troisième catégorie est que tous les transports d’énergie avec les photons ne peuvent pas être considérés comme des rayonnements thermiques. Les micro-ondes de longueur d’onde unique ne transportent pas d’entropie. Ainsi il n’y a pas de raison d’appeler transfert thermique un tel transport [1].

Un exemple de transport de chaleur qui ne rentre pas dans ce schéma est l’écoulement de chaleur au sein du soleil, de la zone de réaction jusqu’à la surface. (Seulement les dix derniers pourcents du chemin de la zone de réaction à la surface sont de type convectif. Nous ne nous y intéressons pas pour le moment). Les porteurs de l’énergie et de l’entropie dans le soleil sont les photons. Est-ce que le transport appartient alors à la troisième catégorie ? Chaque photon ne parcourt qu’une distance très courte avant d’être absorbé, puis un nouveau photon est émis et se déplace dans n’importe quelle direction. Ainsi le rayonnement se produit en avant, en arrière, à gauche, à droite, en haut, en bas ; en d’autres termes, c’est un processus diffusif et ainsi, analogue à la conduction thermique, mais avec des photons au lieu de phonons. Comme la conduction thermique normale il ne se produit que s’il y a un gradient de température (en moyenne dans le soleil, il est de 30 K/km). Nous pouvons conclure que ce processus n’appartient pas seulement à la troisième catégorie mais aussi à la première.

Un autre exemple : l’entropie est transférée depuis la surface de la Terre jusqu’à la limite supérieure de la troposphère, où elle est irradiée dans l’espace. Une petite partie de ce transport (8%) se produit de façon similaire au processus de transport de chaleur à l’intérieur du soleil : la Terre émet un rayonnement électromagnétique. Celui-ci est absorbé, réémis et ainsi de suite. Ainsi, ce processus aussi appartient à la première et à la troisième catégorie.

Il y a aussi d’autres processus de transport de chaleur pour lesquels on a des difficultés pour leur attribuer l’appartenance à l’une des trois catégories : un faisceau d’atomes thermalisés, électrons ou ions, ou un flux de neutrinos thermiques dans une étoile qui s’effondre.

Dans ce contexte nous pouvons aussi poser la question : si l’on suppose qu’il y a trois sortes de courants de chaleur, ne pourrait-on pas s’attendre aussi à ce qu’il y ait plusieurs sortes de courant électrique et plusieurs sortes de courant de quantité de mouvement, etc. ? Et en effet nous pouvons introduire des catégories pour les autres courants. Cependant nous rencontrerons alors le même genre de difficultés que pour les courants de chaleur. Aussi, quels genres de courant électrique existent-ils ? Il y a des courants réalisés avec des électrons dans des conducteurs métalliques, avec des ions dans une solution, il y a des faisceaux d’électrons libres, des courants réalisés avec différents porteurs dans les plasmas, des conducteurs en mouvement, des supercourants de première ou deuxième espèce. Évidemment, on ne prétendra pas de façon incontournable : “Il y a trois (ou quatre, ou dix) sortes de transport de la charge électrique”.

Origine :

La règle est née à l’époque où trois sortes de transport de chaleur étaient connues et où l’on a conclu quelque peu négligemment qu’il n’y en avait pas d’autres, et que celles-ci définissaient une classification. C’est arrivé quand on ne connaissait encore rien sur l’intérieur du soleil, rien au sujet du transport de chaleur dans l’atmosphère terrestre, rien sur les champs électromagnétiques, les photons, les plasmas et rien sur les neutrinos.

Il ne peut pas être exclu aussi que quelque attrait numérolgique ait joué un rôle : “Jamais deux sans trois”.

Remède :

Si l’on y tient vraiment, on pourrait essayer une classification plus durable. On notera alors que plusieurs classifications peuvent être faites selon les critères choisis. Les critères pourraient être :

- quelles sont les particules porteuses ?
- le transport est-il dissipatif ou non ?
- quelle est la force motrice : un gradient de température, un autre gradient, ou pas de gradient du tout ?

On notera cependant qu’on ne gagne pas grand chose avec chacune de ces classifications. Aussi, notre recommandation est (et pas seulement ici) : s’abstenir de classer.

Mais alors qu’en est-il de ces processus qui ont été appelés initialement conduction, convection et rayonnement ? Nous voulons certainement les distinguer l’un de l’autre tout comme nous voulons distinguer les carottes des orties. Mais dans les deux cas nous n’avons pas besoin de recourir à une classification.

[1] *F. Herrmann et P. Würfel* : Rayonnement thermique, article 4.32

4.8 L'équivalence de la chaleur et du travail

Sujet :

La chaleur est de l'énergie désordonnée selon certains [1], l'énergie cinétique du mouvement désordonné des molécules selon d'autres [2]. Pour d'autres encore, elle correspond à l'énergie cinétique et potentielle du mouvement thermique moléculaire [3], l'énergie qui peut être ajoutée à un objet par contact [4], un nom abrégé pour l'expression $U - W$ [5], l'énergie liée TS [6], l'intégrale $\int TdS$ [7], ou un concept discutable et superflu [8]. Qu'en est-il réellement ?

Défaut :

Clausius lui-même a utilisé deux mesures de chaleur : la chaleur H contenue dans un corps, qu'il imaginait comme l'énergie cinétique des molécules, et la "chaleur fournie" Q , où $Q = H$ n'est valide que dans des cas exceptionnels. Derrière les exemples cités plus haut, nous pouvons facilement reconnaître les descendants de ces deux parents. La diversité d'opinions est une expression de la situation désagréable qu'il n'existe aucune grandeur énergétique qui représente à elle seule tous les aspects désirés du concept de chaleur. Comme avec une couverture trop courte, on est obligé de faire sans l'une ou l'autre propriété. Selon celle que l'on choisit de souligner, le compromis sera différent. Du fait qu'en dépit de cette ambiguïté le traitement mathématique donne les mêmes résultats, on peut conclure que l'équivalence postulée par Clausius est dénuée de sens pour les calculs thermodynamiques. Alors à quoi sert-elle ?

Origine :

La question est aussi vieille que la physique. La réponse donnée par R. Clausius vers 1850 dans sa première loi, dans laquelle il stipulait l'équivalence de la chaleur et du travail, est sur le fond considérée comme toujours valide aujourd'hui, mais elle est clairement ambiguë.

Remède :

Si nous ignorons ce postulat, nous gagnons une nouvelle liberté. Nous n'en avons pas besoin pour formuler la conservation de l'énergie. Nous n'en avons pas besoin non plus pour définir ce qu'est la chaleur. Il est facile de donner une définition opérationnelle ("fondamentale") du concept de chaleur. Une telle procédure n'est habituellement utilisée en physique que pour la définition de quelques grandeurs de base comme la longueur, le temps et la masse. On spécifie l'unité et comment déterminer l'égalité avec l'unité et ses multiples. Cependant, on peut employer cette procédure, qui établit une correspondance entre un concept donné et une grandeur physique, dans beaucoup d'autres cas, par exemple pour la définition de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique, de la charge, de la quantité de matière, de l'entropie, et pour la quantification de concepts tels que la quantité de chaleur, la quantité de données, le désordre ou le caractère aléatoire. Le résultat le plus surprenant en procédant de la sorte est qu'un concept de quantité de chaleur qui n'est pas faussé par une interprétation scientifique ne résulte pas en une grandeur énergétique, mais en l'entropie de Clausius S [9]. Cet accès sans effort à la grandeur thermodynamique la plus importante (à part la température) permet de faire un important ménage dans la thermodynamique. On peut se débarrasser en même temps de concepts tels que l'enthalpie, l'énergie libre, la dégradation d'énergie, les grandeurs liées à une transformation et les fonctions d'état. Le fait qu'une petite erreur peut avoir des conséquences si importantes, pas dans le calcul scientifique mais dans sa sémantique, devrait mettre en garde les théoriciens, dont l'attention est surtout concentrée sur la consistance des calculs, et alarmer les éducateurs, qui doivent en subir les conséquences.

[1] F.J. Dyson: "What is heat?" (Qu'est-ce que la chaleur ?) Scientific American 1954, 191 (No. 3), p. 58 - 63.

[2] R.W. Pohl: "Mechanik, Akustik, Wärmelehre" (Mécanique, acoustique, thermique); Springer: Berlin 1962, p. 248.

[3] C. Gerthsen, O.H. Kneser, H. Vogel: "Physik"; Springer: Berlin 1986, p. 193 - 197.

[4] C. Kittel: "Physik der Wärme (Physique de la chaleur)"; Wiley & Sons: Frankfurt 1973, p. 133.

[5] M. Born: Physikal. Zeitschr. 1921, 22, p. 218 - 286.

[6] H.H. Steinour: "Heat and Entropy" (Chaleur et entropie); J. Chem. Educ. 1948, 25, p. 15 - 20.

[7] G. Falk, W. Ruppel: "Energie und Entropie" (Energie et entropie); Springer: Berlin 1976, p. 92.

[8] G.M. Barrow: "Thermodynamics..."; J. Chem. Educ. 1988, 65, p. 122 - 125.

[9] Les affirmations suivantes, complétées par le choix d'une unité de chaleur, suffisent pour la quantifier sans ambiguïté :

1) tout corps contient de la chaleur, dont la quantité ne peut pas décroître s'il est isolé thermiquement.

2) des corps de la même espèce et dans le même état contiennent des quantités de chaleur égales.

3) la chaleur contenue dans un corps composé est égale à la somme des chaleurs contenues dans chacune de ses parties.

Sujet :

Lu dans un manuel scolaire :

“L’énergie thermique est une partie de l’énergie interne et elle est essentiellement déterminée par la température. Comme dans beaucoup de cas on peut présupposer que les autres composantes sont constantes, on considère souvent seulement l’énergie thermique ...

La chaleur nous dit combien d’énergie thermique est transférée d’un système à un autre ...

La relation suivante relie la chaleur transférée à la variation d’énergie :

$$Q = \Delta E_{\text{therm}} .”$$

Dans un autre manuel scolaire :

“Les énergies potentielle et cinétique des particules prises ensemble constituent l’énergie thermique.”

Dans un troisième :

“L’énergie totale d’un système thermodynamique, qui consiste en l’énergie thermique (énergie potentielle et cinétique des particules), l’énergie chimique et l’énergie nucléaire, est l’énergie interne U .”

Défaut :

L’intention de ces définitions de l’énergie thermique est claire : les auteurs de ces énoncés essaient de définir une grandeur qui mesure le “contenu en chaleur” d’un système et qui a les propriétés suivantes :

1. Elle doit être une variable d’état, c’est à dire qu’elle doit avoir une valeur bien définie pour un système dans un état donné.
2. Elle doit être une grandeur énergétique, c’est à dire une grandeur qui est mesurée en Joule.
3. Elle doit être une partie de l’énergie interne. Une autre partie serait l’énergie chimique.
4. Les variations de cette grandeur doivent être égales à la grandeur liée à une transformation Q , que l’on appelle chaleur en physique.

Le problème est que la grandeur qui satisfait à ces critères n’existe pas et ne peut pas être définie. Il n’est pas possible de distinguer les énergies potentielle et cinétique des particules d’une partie qui pourrait être appelée énergie chimique. Tout accroissement de température est lié aux excitations électroniques, aux oscillations, aux excitations liées au spin, à la dissociation des molécules, au réarrangement des atomes, c’est à dire aux réactions chimiques, et enfin aux réactions nucléaires. Il n’y a aucune possibilité de décomposer sans ambiguïté l’énergie mise en œuvre dans ces processus en une partie thermique et une partie chimique. Si une telle décomposition était possible, elle se manifesterait dans le fait qu’une composante (l’énergie thermique) ne dépendrait que de la température et non du potentiel chimique, et que l’autre composante ne dépendrait que du potentiel chimique et non de la température. Mais une telle décomposition n’est pas possible.

Origine :

La physique, la chimie et la thermodynamique technique ont besoin d’une mesure pour le contenu en chaleur d’un système. Le sens commun suggère qu’il serait possible de la définir, puisqu’intuitivement nous fonctionnons avec succès avec une telle grandeur. Cependant, quand on a essayé de définir une mesure pour la chaleur au 19ème siècle, une erreur a été commise : on a supposé qu’une telle grandeur devait être une grandeur énergétique. Toutefois, la définition d’une grandeur énergétique avec les propriétés désirées ne pouvait pas fonctionner. Il en est résulté l’apparition de plusieurs substituts, chacun satisfaisant à quelques unes des propriétés requises, mais pas aux autres. La grandeur Q , que l’on appelle chaleur, en est un. Le problème est que Q n’est pas une grandeur physique comme on l’entend habituellement. On dit que c’est une “grandeur liée à une transformation” puisque cela n’a aucun sens de chercher sa valeur pour un système donné dans un état donné. Les chimistes préfèrent utiliser une autre grandeur “de remplacement”, l’enthalpie. Cette grandeur se comporte comme un contenu en chaleur, mais seulement quand on se restreint à des transformations à pression constante – restriction inacceptable pour le physicien.

Aucune des grandeurs Q et H ne satisfait l’attente justifiée d’une mesure du contenu en chaleur d’un système. Aussi, pourquoi ne pas définir une grandeur qui réponde mieux à nos besoins, l’énergie thermique ?

Il est intéressant de noter que le concept “d’énergie thermique” ne se retrouve que dans les manuels scolaires, pas dans les textes universitaires. Avons-nous à reprocher aux auteurs de manuels scolaires d’inventer des concepts indéfendables, à cause de leur ignorance de la thermodynamique ? Oui et non. Oui, parce que la définition ne marche pas. Non, parce qu’ils ne sont pas à blâmer si la thermodynamique est si mal connue et tellement mal vue.

C’est l’Université qui est à blâmer. Voici ce que les étudiants apprennent à propos des phénomènes thermiques : des relations entre quatre grandeurs dont les valeurs changent simultanément, des dérivées partielles entrecroisées, des changements de variable, des grandeurs non-intuitives telles que l’enthalpie, l’énergie libre, et l’énergie libre de Gibbs sont les pré-requis de la chambre des horreurs. Pour la simple explication de la compression du gaz dans un moteur diesel, on utilise le coefficient adiabatique défini comme le rapport de deux dérivées partielles, que l’on peut distinguer par le fait qu’une variable est gardée constante dans l’une et une autre variable dans l’autre.

On ne doit pas s’attendre à ce que les étudiants aient une relation détendue avec les phénomènes thermiques de cette façon. Mais comment plus tard en tant qu’enseignant, pourra-t-il, ou elle, présenter les faits aux débutants en thermique ? Il est compréhensible que les professeurs à l’école et les auteurs de manuels scolaires essaient de construire une thermodynamique qui n’offense pas le sens commun.

Remède :

C’est beaucoup plus simple que ce que l’on pourrait croire. Il suffit de s’abstenir de demander qu’une mesure de la chaleur soit une grandeur énergétique. Toutes les difficultés disparaissent quand on introduit l’entropie comme la mesure pour un contenu en chaleur.

Sujet :

Si de la chaleur est fournie à un corps, alors ce corps contiendra plus de chaleur. Si le corps cède de la chaleur, alors il en aura moins à la fin. Quelqu'un qui n'a pas fait d'études en physique n'aura sûrement rien à objecter à ces affirmations. Cependant, la physique nous enseigne qu'elles sont incorrectes : on peut fournir de la chaleur à un corps, mais par la suite il n'en a pas, et bien qu'il ne possède pas de chaleur, on peut en extraire. Cela paraît magique. Le chapeau est vide, mais il en sort un lapin. La physique nous dit que fournir ou extraire de la chaleur, ne change pas la quantité de chaleur d'un système, cela change l'énergie interne ou l'enthalpie, suivant la façon dont la chaleur est fournie. Le fait que l'énergie n'est pas appelée chaleur dès qu'elle arrive dans le corps est plus qu'une simple convention. C'est tout simplement qu'il n'y a pas moyen de dire combien de chaleur est contenue dans un corps. Dans les manuels de physique, cette situation irritante est exprimée de différentes façons. Certains auteurs l'expriment de façon courageuse [1]. D'autres osent des justifications douteuses en maintenant que l'énergie interne peut être subdivisée en constituants qu'ils seraient bien incapables de quantifier [2], [3] (voir aussi [4]). Quelquefois la chaleur et l'énergie interne sont simplement considérées comme identiques [5].

Défaut :

Je ne peux pas imaginer que même un simple écolier comprenne pourquoi il est incorrect de dire que la chaleur fournie à un corps reste dans le corps. La plupart de nos étudiants à l'université seraient aussi incapables de donner une explication. Pour l'étudiant, l'affirmation ne semble être qu'un sophisme, ou alors elle est mémorisée avec les nombreux sujets que l'on ne comprend pas et qui n'ont pas nécessairement besoin d'être compris.

Origine :

Pour décrire l'apport de chaleur à un corps il faudrait une mesure quantitative de la chaleur. La "chaleur" du physicien en tant que "grandeur liée à une transformation" [6] convient aussi peu pour cela que l'énergie interne ou l'enthalpie si prisées par les chimistes. Voir aussi [7], [8].

Remède :

Il est particulièrement simple. On décrit le processus avec l'entropie. L'entropie correspond exactement à l'idée que se fait de la chaleur un non-physicien. Si l'on chauffe un corps, on lui fournit de l'entropie, et après que l'entropie soit reçue, l'entropie est en lui. Il est facile de donner une valeur à la quantité d'entropie qui est dans le corps, et encore plus facile de quantifier de combien l'entropie change quand on réchauffe le corps [9].

[1] Galileo 9 (Oldenbourg 2000) p. 98: "Attention ! Bien faire la différence entre chaleur, énergie interne et température : un objet ne possède pas de chaleur, mais une énergie interne !"

[2] Spektrum Physik (Schroedel Verlag Hannover 2000) p. 17: Sous le titre "les constituants de l'énergie interne" sont spécifiés : l'énergie cinétique des particules ; l'énergie de liaison des particules ; l'énergie chimique et l'énergie nucléaire.

[3] Galileo 9 (Oldenbourg 2000) p. 93: "L'énergie d'un corps, qui n'a pas à être décrite comme énergie mécanique (énergie potentielle ou cinétique) on l'appelle énergie interne E_i . L'énergie atomique, les énergies chimique et biologique font toutes partie de l'énergie interne. Une partie substantielle est aussi l'énergie liée à la température du corps."

[4] G. Job, Energieformen in Altlasten der Physik, Aulis Verlag Deubner Köln, 2002, p. 11.

[5] Metzler-Physik (Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 1988) p. 60: "Dans tous ces cas les corps font un travail de frottement ; ainsi, une partie de cette énergie mécanique est transformée dans une forme d'énergie qui ne peut pas être retransformée en énergie mécanique, mais qui est évacuée comme énergie thermique ou énergie interne vers l'environnement intérieur ou extérieur du système."

[6] F. Herrmann : Variables d'état, article 4.2

[7] G. Job : L'équivalence entre la chaleur et le travail, article 4.8

[8] G. Job : Entropie, article 4.13

[9] F. Herrmann : Mesurer l'entropie, article 4.14

Sujet :

Dans les publications sur l'économie énergétique d'un pays, émanant des autorités publiques et des universités, on trouve souvent des diagrammes communément appelés diagrammes des flux d'énergie [1,2,3]. Ils indiquent le bilan énergétique d'une économie nationale. Le titre peut être quelque chose comme : "Usages estimés de l'énergie aux USA en 2008". Ils montrent avec quels vecteurs l'énergie rentre dans le système, c'est-à-dire l'économie nationale, quelle part est transformée en quelles autres formes d'énergie et sous quelle forme l'énergie quitte le système. Pour le flux sortant, la distinction est faite entre énergie finale, disponible ou utile d'une part, et énergie perdue ou rejetée d'autre part.

Défaut :

L'impression suivante se dégage : pour les applications de l'utilisateur final l'énergie est demandée sous une certaine forme. En conséquence, elle doit être transformée, et en faisant cela, une partie est perdue. On essaie de maintenir les pertes dues à la transformation et au transport aussi faibles que possible, mais pour des raisons physiques des pertes considérables sont inévitables. C'est seulement quand elle est arrivée à destination, c'est à dire à l'utilisateur final, que l'énergie peut être utilisée pour ce pour quoi elle est vraiment nécessaire.

Cette vision des choses ne correspond pas exactement à la réalité. On peut le voir quand on considère que chaque perte d'énergie est due à la production d'entropie. Cette entropie doit être éliminée, c'est-à-dire transférée à l'environnement. Pour cela, il faut de l'énergie et cette énergie est perdue. Le débit de l'énergie perdue P_L est proportionnel au débit d'entropie I_S dont-il faut se débarrasser :

$$P_L = T_0 \cdot I_S .$$

Ici, T_0 est la température absolue de l'environnement, c'est-à-dire du système qui absorbe l'entropie.

A partir de cette considération on peut tirer deux conclusions :

1. D'un point de vue physique, les pertes ne sont pas inévitables. Toute transformation peut aussi être opérée de façon réversible. Cela peut être impossible pour des raisons techniques ou économiques, mais ce n'est pas la physique qui l'interdit. Même la "transformation" de l'énergie chimique du carbone (+ oxygène) en énergie électrique, où on tient généralement le rendement de Carnot responsable de la faible efficacité, peut en principe être opérée de façon réversible, par exemple dans une pile à combustible idéale. Ainsi, dans le diagramme de flux d'énergie, l'énergie entrante pourrait déjà être raisonnablement appelée énergie utile.

2. Après être arrivée au soi-disant utilisateur final, toute l'énergie est finalement "utilisée" pour produire de l'entropie, c'est-à-dire est gaspillée ; toute l'énergie qui a été vendue à l'utilisateur en tant qu'énergie disponible, finit comme énergie perdue. A propos : c'est vrai aussi pour l'utilisateur final que tout processus auquel il s'intéresse peut être réalisé de façon réversible.

Nous ne proclamons pas que les diagrammes sont faux, ni qu'ils sont inutiles. Nous croyons seulement que le message qu'ils expriment est faux. Il n'est pas correct de dire que seulement une fraction de l'énergie primaire soit "vraiment" utile. Après une série d'étapes toute l'énergie primaire finit en production d'entropie, et les diagrammes dont on parle ci-dessus ne racontent que la moitié de l'histoire.

Origine :

Pourquoi les diagrammes de flux d'énergie s'arrêtent-ils à un certain point ? Pourquoi ne montrent-ils pas que toute "l'énergie utilisable" se retrouve finalement dans l'environnement ? C'est parce qu'ils sont publiés par des institutions qui ont des intérêts particuliers. Pour l'industrie de l'énergie, le tableau se termine à l'étape du tarif, là où ils demandent de l'argent. Ils sont concernés par les pertes avant ce point. Ils ne se préoccupent pas de savoir ce que fait le client avec l'énergie qu'ils lui ont vendue.

Remède :

Par dessus-tout, nous rendons clair le fait que la totalité de l'énergie primaire est utilisée pour la production d'entropie. Puisqu'il n'y a pas de limites physiques pour réduire la production d'entropie, il n'y a pas de limites physiques pour économiser l'énergie. Nous parlons des problèmes techniques que cela pose quand on essaie d'atteindre ce but. De cette façon, les étudiants apprennent beaucoup de physique et aussi de chimie.

[1] <https://str.llnl.gov/Sep09/simon.html>

[2] <http://www.energyliteracy.com/?p=310>

[3] <http://blog.everydayscientist.com/?p=1773>

4.12 La tendance vers le minimum d'énergie

Sujet :

La cause couramment invoquée pour expliquer un processus est que le système atteint un état d'énergie minimum :

- un pendule s'arrête en son point le plus bas,
- une planche flottante se positionne à plat,
- une bulle de savon prend une forme sphérique,
- une éponge aspire de l'eau,
- des charges électriques se répartissent sur un conducteur,
- des atomes de gaz excités émettent des photons,
- des ions positifs et négatifs s'arrangent d'eux-mêmes en un réseau cristallin,
- des noyaux lourds se fissionnent.

Défaut :

Sans le dire de façon explicite, toutes ces affirmations partent du principe que chaque système tend vers un état d'énergie minimum et se dirige vers lui à condition qu'il ne soit pas entravé par quelque circonstance. Formulée de cette façon, cependant, la déclaration n'a pas de sens. Si un système atteint un état d'énergie minimum, alors le système complémentaire, l'environnement, doit atteindre une énergie maximum en raison de la conservation de l'énergie. Le même argument appliqué à l'environnement devrait produire le résultat inverse. Ainsi, l'hypothèse ci-dessus ne peut être valide de façon générale. Alors, pour quel système est-elle valide ? La réponse vient de la thermodynamique. Comme l'a exprimé W. Gibbs en 1873, le système doit être fermé pour tout sauf pour l'énergie nécessaire pour garder l'entropie constante. L'entropie S_p produite par les processus qui se déroulent dans le système apparaît seulement dans l'environnement, et avec elle l'énergie TS_p venant du système, T étant la température de l'environnement. Comme S_p et T sont toujours positives, le système perd toujours de l'énergie, puisque tout autre échange d'énergie qui compenserait les pertes, est interdit. Vu de cette façon, la tendance au minimum d'énergie n'est rien de plus qu'une conséquence du principe de l'entropie, appliqué à une classe particulière de systèmes.

Origine :

En mécanique nous ignorons les propriétés thermiques des choses. Les leviers, les poulies, les ressorts, les blocs et les cordes sont considérés comme des objets qui ne peuvent pas être chauffés, c'est-à-dire dont la température et l'entropie ne peuvent pas changer. En fait, nous attribuons de façon tacite à l'environnement l'entropie créée par frottement. Dans ces conditions, nous avons le droit de parler de la tendance à une énergie minimum. La même chose s'applique aux systèmes dans beaucoup d'autres branches de la physique – hydraulique, électricité, nucléaire, physique du solide, etc. Parce que nous ne mentionnons pas la production d'entropie comme la cause de ces processus, nous avons l'impression d'un principe naturel indépendant.

Remède :

Nous pouvons parler explicitement de la production d'entropie dans les systèmes. Comme si souvent, notre relation tendue avec l'entropie nous égare vers des substituts discutables. Le défaut fondamental, qui en conséquence crée des difficultés sans fin et s'oppose à toute tentative d'y remédier, est le dogme de la chaleur en tant que forme spéciale d'énergie, que l'on a chéri pendant un siècle et demi et qui est ancré dans la première loi de la thermodynamique. On ne peut s'attendre à une amélioration durable que si nous sommes prêts à une révision.

4.13 Entropie

Sujet :

“L’entropie” est le nom de la grandeur qui est introduite en thermodynamique classique en tant que fonction abstraite, définie par une intégrale. Cette approche rend cette grandeur tellement distante qu’il en coûte un effort même à un spécialiste pour la manipuler. Son interprétation en tant que mesure du désordre est une approche favorisée par les chimistes de façon à avoir au moins une compréhension grossière de sa signification.

Défaut :

C’est un avantage pour l’approche du chimiste que l’entropie puisse être appréhendée de façon qualitative, mais ce n’est pas suffisant pour satisfaire les critères du physicien. Pour un physicien une grandeur n’est définie que s’il connaît une procédure pour déterminer sa valeur. Un autre défaut est que, quand on utilise l’interprétation du désordre, il semble qu’aucune propriété macroscopique simple ne corresponde à l’entropie.

Origine :

Dans la première moitié du 19^{ème} siècle, il est devenu clair que la conservation de la chaleur, comme supposée par Carnot et d’autres, était indéfendable. Cela amena Clausius en 1850 à essayer de restructurer la thermodynamique en supposant que la chaleur et le travail pouvaient se transformer l’un en l’autre. Dans le cadre de son travail il construisit la grandeur S , de façon à décrire les limitations de cette transformation mutuelle.

Remède :

En 1911 dans une allocution à la Société de Physique de Londres, son président H. L. Callendar [1] releva que S n’était rien d’autre qu’une reconstruction compliquée de la quantité appelée chaleur par Carnot, la seule différence étant que maintenant la chaleur pouvait être produite, mais comme avant, ne pouvait pas être détruite. Cette idée est arrivée un demi-siècle trop tard pour rectifier l’erreur de parcours. On pourrait conclure cependant, que la grandeur S n’a pas seulement le même sens évident et intuitif que l’ancienne chaleur, mais qu’elle peut aussi être quantifiée de la même façon simple. Ainsi le spectre formaliste S de la thermodynamique classique pourrait être réduit à un concept facile à manipuler par un élève d’école élémentaire, et on pourrait se débarrasser de l’arsenal d’outils mathématiques maintenant inutiles. Cette attente est confirmée par l’expérience importante accumulée dans beaucoup d’écoles [2]. Dans le rôle de la chaleur, S devient une grandeur qui ne demande pas plus que les concepts de longueur, temps ou masse, même sous le nom anonyme d’entropie. Le fait qu’elle apparaisse sous d’autres habits dans la théorie de l’information, la physique statistique et les idées liées à l’atome des chimistes ne l’empêche pas d’apparaître dans le rôle de la chaleur en macrophysique.

[1] H. L. Callendar: Proc. Phys. Society of London 23 (1911) 153. Callendar propose également d’abrégé l’unité légale J/K par Carnot.

[2] Le Projet de Physique de Karlsruhe, voir par exemple <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>

4.14 Mesurer l'entropie

Sujet :

Souvent l'entropie est introduite de telle façon que l'on a l'impression que seuls des calculs mathématiques compliqués peuvent permettre d'obtenir sa valeur.

Défaut :

L'entropie et la température sont les grandeurs les plus importantes de la thermodynamique. L'entropie est la grandeur énergétique extensive conjuguée de la grandeur intensive température. Il y a la même relation entre entropie et température qu'entre charge électrique et potentiel électrique ou qu'entre quantité de mouvement et vitesse. Ainsi il est raisonnable d'attendre que l'entropie et les courants d'entropie jouent un rôle important dans l'enseignement de la thermodynamique, tout comme la charge électrique et les courants électriques en électricité, ou la quantité de mouvement et les forces (= courants de quantité de mouvement) en mécanique. La présentation habituelle de l'entropie ne répond pas à cette attente.

Quand elle est mentionnée pour la première fois, il est généralement souligné que l'entropie est une fonction d'état [1]. Mais pourquoi est-il prétendu que c'est une *fonction* ? En premier lieu l'entropie est une grandeur physique ou en termes mathématiques, une variable. Elle est une fonction seulement si on donne sa dépendance par rapport à d'autres grandeurs physiques. Et selon les grandeurs que nous choisissons, cette fonction est différente.

Et pourquoi est-il souligné que l'entropie est une fonction ou une variable *d'état* ? Presque toutes les grandeurs physiques sont des variables d'état. Ce fait, cependant, est tellement évident que l'on ne juge pas nécessaire de le mentionner. C'est seulement parce que la présentation traditionnelle de l'entropie ne permet pas d'avoir une idée intuitive de la grandeur que l'on s'accroche à cette propriété, bien qu'elle ne soit pas du tout caractéristique.

Le défaut le plus important quand on introduit l'entropie est que l'on ne présente aucune procédure de mesure. Sa présentation compliquée nous fait croire qu'une mesure est difficile, voire impossible.

En réalité, l'entropie est une des grandeurs les plus faciles à mesurer. Les valeurs de l'entropie peuvent être déterminées avec une bonne précision avec seulement un équipement de cuisine.

Origine :

Voir [2]

Remède :

Bien sûr, nous ne voulons pas nous débarrasser de l'entropie et de sa mesure, mais du préjugé que l'entropie est difficile à mesurer.

Comment l'entropie peut-elle être mesurée ? Définissons d'abord la tâche plus exactement : déterminer la différence d'entropie de 5 litres d'eau entre 60 °C et 20 °C.

Nous commençons avec de l'eau à 20°C et nous la chauffons avec une résistance immergée jusqu'à ce que sa température soit de 60 °C. Tout en faisant cela, nous mélangeons l'eau et nous mesurons la température en fonction du temps. Le flux d'énergie ou la puissance de la résistance immergée est connu.

A partir de $dE = TdS$, nous obtenons

$$dS = \frac{dE}{T} = \frac{Pdt}{T}.$$

Nous obtenons ainsi la valeur d'une petite variation d'entropie dS comme le quotient de la quantité d'énergie fournie $dE = Pdt$ sur la température absolue T . Puisque la température augmente quand nous chauffons, nous devons intégrer cette relation entre T_1 et T_2 pour obtenir la variation totale d'entropie :

$$\Delta S = P \int_{T_1}^{T_2} \frac{dt}{T} \approx P \sum_i \frac{\Delta t_i}{T_i}.$$

Tant que le changement de température reste faible comparé à la température absolue moyenne nous obtenons approximativement

$$\Delta S \approx \frac{P\Delta t}{\bar{T}},$$

soit : l'accroissement d'entropie est égal à la puissance de la résistance immergée multipliée par le temps de chauffe et divisé par la température absolue.

[1] Gerthsen – Kneser – Vogel: Physik. – Springer-Verlag, Berlin, 1977. – p. 183

[2] G. Job : L'entropie, article 4.13

4.15 Qu'est-ce que l'énergie en réalité? Qu'est-ce que l'entropie en réalité?

Sujet :

Lors d'un récent symposium du WCPE (Conférence Mondiale sur l'Education en Physique) à propos de la présentation de l'énergie dans l'enseignement scolaire, des conférenciers ont répété que l'énergie était un concept abstrait. En disant cela ils étaient en bonne compagnie. Feynman aussi avait écrit [1] : "Il est important de réaliser que dans la physique d'aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie."

Ce n'est pas différent avec l'entropie. Le grand John von Neumann explique [2] : "Personne ne sait ce qu'est réellement l'entropie, de sorte qu'on a toujours l'avantage dans un débat." Ou le mathématicien Harro Heuser [3] : "Le concept d'entropie fait partie des concepts les plus occultes de la physique ..."

Défaut :

Qu'est ce que l'énergie en réalité ? Qu'est-ce-que l'entropie en réalité ?

1. Les questions sont mal posées, il faudrait enlever "en réalité". Et les citations ci-dessus sont inutilement fatalistes. Au lieu d'émettre des avertissements ou des intimidations, notre première réponse à ces questions devrait être : les deux sont des grandeurs physiques, et ainsi une mesure de quelque chose. Bien sûr, cette réponse soulève une nouvelle question : de quoi sont-elles la mesure ? Mais cette question semble beaucoup moins transcendante que la question initiale, et on peut y répondre.

2. Généralement, on pose cette question seulement pour ces deux grandeurs, mais on ne demande jamais quelles sont "en réalité" la masse, la charge électrique, la température ou la pression. Ces questions sont tout aussi intéressantes, et il est tout aussi difficile ou facile d'y répondre.

3. Une question bien posée détermine un ensemble de réponses, dont l'une d'entre elles est correcte. La question : "qui a obtenu la note A au test ?" indique que la réponse correspond au nom de l'un des étudiants. Il y a aussi des questions moins bien posées et il y a des mauvaises questions. Une mauvaise question ne détermine pas un ensemble de réponses et c'est pourquoi il est presque impossible de satisfaire le questionneur. Les parents pourraient vous en raconter des belles à ce sujet. Il y a par dessus tout les questions qui commencent par "pourquoi". Vous y répondez et puis arrive le "pourquoi" suivant. Dans la même catégorie de questions se trouvent celles de la forme : "Qu'est-ce que ... en réalité" ? Quel genre de réponse pourrait satisfaire le questionneur ?

4. Essayons de donner une réponse. Qu'est-ce que l'énergie ? La même chose que la masse. La formule correspondante est citée plus souvent que n'importe quelle autre formule en physique, mais plus de cent ans après sa découverte le message n'est toujours pas passé. Bien sûr, on pourrait continuer en demandant : "et qu'est-ce que c'est que la masse ?" Mais à juste titre personne ne pose cette question. On pourrait objecter que la réponse d'Einstein ne convient pas dans le contexte de la physique classique, puisque la théorie de la relativité ne se manifeste qu'à haute vitesse. Cette objection n'est pas pertinente. Les propriétés du couple masse-énergie sont l'inertie et le poids, et elles se manifestent partout. Le fait que nous ne puissions pas faire la distinction entre une batterie vide et une batterie chargée en les pesant n'a rien à voir avec une vitesse qui n'est pas assez relativiste ; il est dû au fait que la précision de nos mesures n'est pas suffisante.

Et qu'est-ce que l'entropie ? Elle est ce qu'en termes familiers nous appellerions chaleur. Celui qui fait remarquer que cette réponse est trop simple peut continuer en demandant ; mais quelle est la manifestation microscopique de l'entropie ? et ainsi de suite. Mais il ne devrait pas dire que nous ne savons pas ce qu'est l'entropie "en réalité".

Origine :

Il y a une incompréhension qui s'est produite historiquement : l'énergie est "quelque chose", une sorte de substance, qui existe dans le monde réel, et dont la nature est difficile à comprendre.

On ne pose pas la question correspondante au sujet de la charge électrique, parce que l'on croit savoir ce qu'elle est "en réalité". Mais cette croyance est basée sur un malentendu. On confond souvent la grandeur physique "charge électrique" avec le système physique "électron".

Remède :

Introduire les deux grandeurs, l'énergie et l'entropie, au moyen d'un modèle. Imaginez que chacune d'entre elles est une sorte de fluide. L'énergie et l'entropie sont des mesures pour la quantité de ces fluides imaginés. L'un des fluides représente l'inertie et le poids, l'autre représente la chaleur. Une telle introduction est facile à comprendre et constitue une base solide pour une description sérieuse du monde physique.

[1] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands : The Feynman Lectures on Physics (Les cours de physique de Feynman), 1964, Volume I, 4-1

[2] M. Tribus, E. C. McIrvine: Energy and Information (Energie et Information), Sci. Am. 224, Sept. 1971, p. 178-184.

[3] H. Heuser. Unendlichkeiten (Infinités), B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2008, p.

4.16 L'entropie en tant que mesure de l'irréversibilité

Sujet :

L'entropie est introduite quelquefois comme une mesure de l'irréversibilité d'un processus. De cette façon il est possible d'avoir de façon intuitive une certaine idée de l'entropie, qui sinon a la réputation d'être une grandeur abstraite et obscure.

Défaut :

1. Quand on introduit l'entropie en tant que mesure de l'irréversibilité, on perd facilement de vue la question de savoir ce qu'il arrive de l'entropie après qu'elle soit produite. Une question liée est : quel est l'effet de cette entropie dont nous ne connaissons pas l'origine ? L'entropie de l'univers est constante en très bonne approximation. La production d'entropie que nous observons dans notre environnement immédiat nous semble importante, mais elle est insignifiante à l'échelle cosmique. Même à l'échelle terrestre l'entropie produite ne joue qu'un rôle mineur dans le bilan total d'entropie. L'entropie contenue dans le globe terrestre est environ un million de fois celle qui est produite par an à la surface de la terre (essentiellement par absorption du rayonnement solaire). Pour celui qui ne connaît l'entropie que comme une mesure de l'irréversibilité d'un processus, cette entropie ne veut pas dire grand chose.

2. Nous rencontrons l'entropie dans l'équation

$$P = T \cdot I_s . \quad (1)$$

L'équation nous dit que chaque courant d'entropie est accompagné par un courant d'énergie. Elle a la même structure que la relation familière

$$P = U \cdot I .$$

L'équation (1) est utile pour la description des machines thermiques. Leur principe de fonctionnement est facile à comprendre : l'entropie circule à travers la machine ; le courant d'entropie à l'entrée est égal à celui à la sortie. A l'intérieur de la machine, l'entropie va des hautes vers les basses températures, produisant ainsi du travail, c'est-à-dire que la machine transmet de l'énergie par l'intermédiaire de l'arbre de transmission. Pour décrire le principe de fonctionnement de la machine, nous avons besoin de l'entropie. Puisque la transformation est réversible, l'interprétation de l'entropie en tant que mesure de l'irréversibilité est de peu de secours.

3. Quand on cherche une mesure de l'irréversibilité, l'entropie n'est pas vraiment un bon choix. Imaginez que nous voulons comparer l'irréversibilité de processus qui se déroulent dans les systèmes A et B. Ce que nous voulons comparer, ce ne sont pas les états mais les processus. Une affirmation sur l'entropie de A et de B n'est donc pas utile. Il vaut mieux comparer le taux de production d'entropie de A et de B. Cependant, si le taux de production est plus grand dans A que dans B, nous ne pouvons pas conclure que le processus A est "plus irréversible". Si le système A est plus grand que B, il est possible que le processus B soit "plus irréversible". Ainsi, de façon à avoir une mesure de l'irréversibilité plus appropriée, nous devrions relier le taux de production d'entropie à la taille du système. Une meilleure mesure serait le taux de production d'entropie par mole.

Origine :

Quand l'entropie est interprétée comme la chaleur stockée ("chaleur" dans le sens familier du terme) le taux de production d'entropie par mole est un sous-produit évident.

Sujet :

Dans les manuels de biologie et des domaines connexes, on peut trouver des formulations concernant des valeurs négatives de l'entropie, par exemple : "Les systèmes vivants produisent sans interruption de l'entropie positive. Pour éviter une décomposition dans l'équilibre thermodynamique, ces systèmes nécessitent un apport continu d'entropie négative. La seule source abondante d'entropie négative, disponible pour les systèmes vivants, est l'énergie d'excitation des pigments. L'excitation est effectuée par les photons. La seule source naturelle de photons est le soleil." Quelquefois l'entropie négative est appelée néguentropie, et la néguentropie, comme il est énoncé, est identique à l'information de Shannon.

Défaut :

De telles affirmations offensent seulement partiellement la pratique physique, mais elles sont aussi partiellement incorrectes.

1. Chaque fois que la valeur d'une propriété extensive X s'accroît dans un système A et décroît dans un système B, parce qu'il y a un courant de X entre A et B, il y a deux possibilités pour exprimer ce processus : on dit soit qu'il y a un courant de X positif de B vers A, soit un courant de X négatif de A vers B. La théorie (plus précisément l'équation de continuité) ne distingue pas entre ces deux façons de dire. C'est seulement dans le cas où une vitesse peut être attribuée sans ambiguïté au courant, c'est-à-dire que la densité de courant \vec{j}_X peut être exprimée par une densité ρ_X et une vitesse \vec{v}

$$\vec{j}_X = \rho_X \cdot \vec{v}$$

qu'une telle distinction peut être justifiée. Si la densité ρ_X est négative on peut argumenter qu'il est approprié de dire qu'un X négatif circule de A à B. Si ρ_X est positive, on préférera dire qu'un X positif circule de B vers A. Même ainsi, cette distinction n'est pas nécessaire.

Par contre, si la grandeur X ne peut admettre que des valeurs positives en principe, comme c'est le cas pour la masse ou l'entropie, il n'est certainement pas approprié de dire que X négatif circule de A à B puisque cette sorte de formulation suggère qu'une densité, masse ou entropie négative existe.

Quand on parle d'entropie négative, comme dans la citation plus haut, on poursuit clairement un objectif : on a l'intention d'attribuer le mérite au soleil pour le fait que l'entropie du système vivant n'augmente pas. Et c'est là que réside l'erreur : même si on ose dire qu'il n'y a pas d'entropie négative, on devrait admettre que l'écoulement de l'hypothétique entropie négative suit le même chemin que l'entropie positive qui circule en réalité, bien qu'en sens inverse. Maintenant, puisque l'entropie positive s'écoule vers l'environnement, on pourrait dire au mieux que l'entropie négative s'écoule de l'environnement vers le système vivant. Ainsi l'affirmation que de l'entropie négative vient du soleil, n'est tout simplement pas correcte. Puisque le sujet est plutôt complexe, ce fait n'a pas été remarqué.

Pour aller plus loin dans l'illustration du problème, appliquons cette déclaration à un système plus transparent : la résistance chauffante d'un radiateur électrique. La description normale et correcte du bilan d'entropie devrait être comme ceci : l'entropie est produite dans la résistance. Elle est évacuée dans l'environnement. Une affirmation analogue à celle de notre citation dirait : de l'entropie négative est fournie à la résistance avec l'énergie électrique. Cette entropie est compensée par l'entropie qui est produite dans la résistance. De toute évidence cette affirmation n'est pas correcte.

2. Si l'entropie négative (ou néguentropie) est identifiée avec l'information (quantité de données), on commet alors un autre type d'erreur. Rappelons d'abord que l'entropie S et l'information H sont calculées au moyen de la même formule statistique :

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i, \quad H = -f \sum_i p_i \ln p_i$$

Ici p_i est la probabilité du système d'être dans le micro-état numéroté i . k est la constante de Boltzmann et f est un facteur constant choisi de façon que l'unité de H soit le bit. Ainsi les valeurs des deux grandeurs sont déterminées par la même procédure, ce qui signifie que les deux grandeurs sont identiques. L'entropie d'un système et l'information stockée dans son micro-état sont la même grandeur physique, à un facteur constant près.

Maintenant, on peut souvent observer la maladresse suivante. Nous considérons un système A. Au lieu de dire que l'information H est stockée dans A, on dit que H est l'information qui manque à l'observateur. Et on fait encore un pas de plus en disant que l'observateur a la néguentropie N avec :

$$N = -H.$$

Au lieu d'attribuer la valeur au système pour lequel elle a été calculée ou mesurée, on prend le négatif de cette valeur et on l'attribue au complément du système, c'est-à-dire à l'environnement ou à l'observateur qui fait partie de cet environnement. C'est comme si vous décriviez la masse d'un corps en disant que l'environnement a la "négamasse" $n = -m$. On peut conserver une telle procédure quelque temps, mais c'est sans aucun doute extrêmement gênant.

Origine :

L'entropie négative a une longue tradition. Peter Guthrie Tait, un thermodynamicien ami de Lord Kelvin, avait déjà pensé à introduire une entropie négative mais y avait renoncé [1] : "Il est très souhaitable d'avoir un mot pour exprimer la Disponibilité pour le travail de la chaleur dans un réceptacle donné; un terme pour cette possession dont la perte est appelée Dissipation. Malheureusement, l'excellent mot Entropie, que Clausius a introduit à ce sujet, est employé par lui au négatif de l'idée que nous voulons naturellement exprimer."

L'entropie négative fut assurément introduite en physique par Schrödinger. Dans son livre "Qu'est-ce que la vie ?" de 1944, complètement dépourvu de mathématiques, il écrit : "Qu'y-a-t-il de si précieux dans notre nourriture qui nous sauve de la mort ? Il est facile de répondre. Tout processus, tout évènement, tout ce qui arrive – vous pouvez l'appeler comme vous voulez – bref, tout ce qui se passe dans la nature, signifie un accroissement de l'entropie de cette partie du monde dans laquelle se produit le processus. Ainsi un organisme vivant accroît continuellement son entropie – ou si l'on préfère, il produit de l'entropie positive – et ainsi s'approche du dangereux état d'entropie maximale, ce qui signifie la mort. Il peut seulement l'éviter, c'est-à-dire vivre, en extrayant constamment l'entropie négative de son environnement – ce qui en fait est très positif, comme nous allons bientôt le voir. Ce qui nourrit un organisme est l'entropie négative. Ou, pour l'exprimer de façon paradoxale, c'est l'essence du métabolisme que l'organisme réussit en se débarrassant de l'entropie qu'il doit produire aussi longtemps qu'il vit."

Ces déclarations de Schrödinger ont provoqué l'objection de ses collègues. Schrödinger s'est défendu, mais quelque peu sans conviction.

Le terme néguentropie a été introduit en 1956 par Brillouin [2]. A cette époque il est apparu plusieurs publications sur la relation entre la grandeur thermodynamique entropie et la grandeur *information* introduite peu de temps avant par Shannon. Brillouin accorde tant d'importance à cette idée qu'il l'appela "le principe de néguentropie de l'information". Comme mentionné plus tôt, l'inconvénient de sa proposition est qu'elle attribue la grandeur information à l'observateur ou à l'expérimentateur, et non au système pour lequel elle est calculée.

Une raison de cette affectation gênante peut être le nom généralement donné à la grandeur : information.

Supposez que l'on ait calculé pour un stockage de données informatiques (ou pour les micro-états d'un gaz parfait) : $H = x$ Moctets. Quand on calcule la quantité d'information H , il semble logique de dire : "Il me manque l'information x Mo sur le stockage de données (ou le gaz parfait)." Si au contraire H était appelée *quantité de données*, alors une autre dénomination semblerait plus appropriée : "la quantité de données est x Mo". Ainsi, quand on utilise l'expression quantité de données, les valeurs de la grandeur sont correctement attribuées au stockage de données ou au gaz.

Remède :

1. L'entropie négative n'est pas nécessaire. Tout est plus clair quand on se contente de l'entropie positive.

2. Attribuer la grandeur H au stockage de données (ou aux micro-états thermodynamiques) mais pas à l'observateur. L'appeler *quantité de données*.

[1] P. G. Tait: Sketch of Thermodynamics (Tableau de la thermodynamique), Edmonston & Douglas, Edinburgh 1868, p. 100.

[2] L. Brillouin: Science and Information Theory (La science et la théorie de l'information), Academic Press, New York 1962, p. 152.

4.18 L'entropie et la vie

Sujet :

Les systèmes biologiques sont des systèmes hautement ordonnés qui se forment spontanément. Ce fait est souvent considéré comme un problème. On pourrait croire, tel que cela est dit, que la genèse d'un organisme vivant est en contradiction avec la seconde loi de la thermodynamique, du fait que l'entropie d'un système fermé ne peut pas diminuer. En réalité, à ce qu'on nous dit, la deuxième loi n'est pas violée, puisque les systèmes biologiques sont des systèmes ouverts. Leur entropie peut en effet diminuer si l'entropie de l'environnement augmente.

Défaut :

D'abord on nous dit qu'il y a le problème que l'ordre d'un système biologique augmente spontanément. Quelquefois c'est même présenté comme une sorte de paradoxe. Et puis le mystère est dévoilé : nous pouvons nous calmer, tout va bien.

Cependant on aurait pu mettre fin au sujet plus tôt, avant qu'il ne devienne un problème ou un paradoxe. En réalité l'entropie contenue dans les systèmes biologiques n'est en aucune façon exceptionnelle.

Un être humain par exemple contient environ 60 % d'eau. A la température de 25 °C, l'entropie de l'eau est 3.9 J/(K · g). A la température du corps humain, c'est un peu plus. Le reste du corps est formé par des protéines, des lipides et des glucides dont l'entropie par unité de masse n'est pas très différente de celles des autres substances organiques concentrées. Ainsi elle est de 1 à 3 J/(K · g). Il n'est pas difficile d'imaginer un système non-biologique qui coïnciderait avec le corps humain, pas seulement en masse, volume et température, mais aussi en entropie. Ainsi, la quantité d'entropie n'est pas caractéristique pour un système biologique.

Quand on compare le corps humain à un tas de sable de même masse et même température, il se comporte même plus mal, en ce qui concerne l'entropie. Comme le sable est un matériau cristallin, son entropie est seulement environ le quart de celle de la personne.

En fait, quand un système biologique se développe, son entropie ne diminue pas mais augmente. C'est simplement parce que sa masse s'accroît. Si le poids d'une personne augmente de 2 kg, son entropie augmente d'environ 4 kJ/K.

En conclusion, l'entropie n'est pas plus une caractéristique d'un système vivant que la masse ou le volume.

Origine :

Il y a probablement différents facteurs qui s'ajoutent. D'abord, les connotations non-scientifiques de l'entropie. On semble croire que l'entropie doit se comporter de façon caractéristique dans le contexte de processus aussi complexes que la vie organique. Ensuite, le manque de connaissance des valeurs de l'entropie (que l'on peut d'ailleurs trouver facilement dans des tables). Enfin, l'introduction de l'entropie par l'intermédiaire de la physique statistique. La méthode est fascinante, mais apparemment inappropriée pour avoir une idée des valeurs de l'entropie.

Remède :

Introduire l'entropie comme une mesure de la quantité de chaleur. Le faire de manière que l'étudiant ait une idée de ses valeurs. Alors l'hypothèse que l'entropie d'un système vivant pourrait présenter une quelconque particularité n'est pas soulevée depuis le début.

4.19 Le cycle de Carnot

Sujet :

Dans le cours de physique à l'Université, les étudiants ont à connaître le cycle de Carnot. Un gaz parfait parcourt un processus cyclique suivant quatre étapes : deux transformations isothermes et deux transformations isentropiques (ou adiabatiques). Les étudiants apprennent que seulement une certaine partie de la chaleur peut être transformée en travail mécanique au cours d'un tel processus. Quelquefois ces considérations sont généralisées à un processus cyclique arbitraire en le décomposant en parties isothermes et isentropiques infinitésimales. Habituellement, le processus est représenté sur un diagramme p - V .

Défaut :

1. Le travail de Carnot consiste dans la présentation et la justification d'une seule grande idée : dans une machine thermique parfaite le "calorique" circule d'une température plus élevée à une température plus faible et ainsi produit du travail (de la "puissance motrice" selon l'appellation originelle). Le travail est proportionnel à la différence de température et à la quantité de calorique. Selon Carnot le principe de fonctionnement de la machine thermique est analogue à celui de la turbine hydraulique, dans laquelle l'eau passe d'un niveau supérieur à un niveau inférieur tout en produisant du travail. Carnot introduit cette idée au début de son travail. C'est seulement après qu'il explique comment nous pouvons imaginer les détails d'une machine thermique. Tout ce que les étudiants apprennent aujourd'hui sur les idées de Carnot est le calcul fastidieux d'une réalisation spéciale d'une machine thermique.

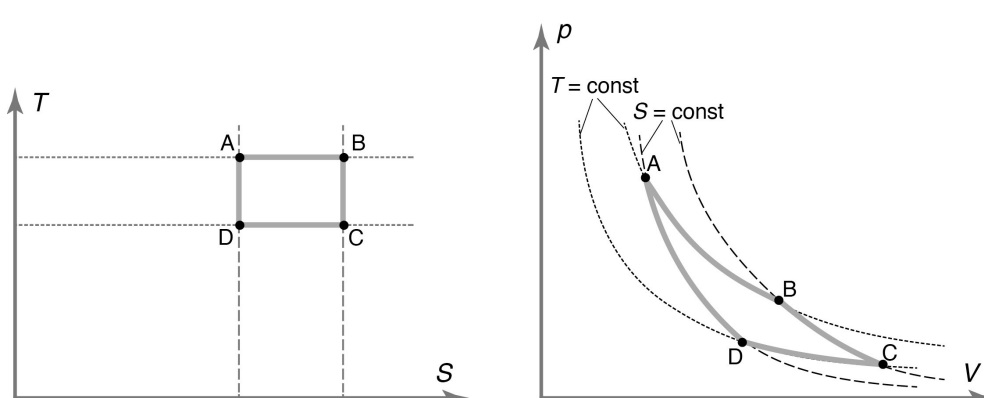


Fig. 1. Diagrammes T - S et p - V du cycle de Carnot. Au cours du cycle le moteur reçoit de l'entropie à haute température et l'évacue à basse température.

2. Deux formes d'énergie sont impliquées dans le cycle de Carnot : pdV et TdS . Si l'on veut réellement traiter le cycle de Carnot, le mieux est de représenter le processus en utilisant les coordonnées des deux formes d'énergie : sur un diagramme T - S et sur un diagramme p - V , figure 1. Le diagramme T - S montre la simplicité du processus. Ici on peut voir clairement l'idée de Carnot : le calorique (aujourd'hui on l'appelle l'entropie) entre dans la machine à une température élevée constante (étape AB) et la quitte à une température basse constante (étape CD). Le diagramme T - S est le même, quelque soit le fluide de travail. Il n'en est pas de même avec le diagramme p - V . C'est un point important sur lequel insiste Carnot avant de traiter le cas particulier du "gaz parfait".

Mais on peut aussi, comme Carnot lui-même, s'abstenir des deux diagrammes. En effet, le diagramme T - S est trivial tandis que le diagramme p - V n'est pas intéressant.

3. Il est plus facile de comprendre le fonctionnement des machines thermiques en considérant une machine avec un fonctionnement continu plutôt qu'une avec un fonctionnement cyclique.

Origine :

1. Depuis que le calorique a été interprété comme une forme d'énergie vers le milieu du 19ème siècle, dans le contexte de l'euphorie qui a accompagné l'introduction de l'énergie, les idées de Carnot apparurent partiellement fausses. Son calorique circule à travers la machine thermique. Sur son chemin entre la haute et la basse température, sa quantité ne change pas. D'un point de vue moderne, ce comportement se conforme à celui de l'entropie. Nous pouvons donc identifier le calorique de Carnot avec l'entropie qui a été officiellement introduite en 1865 par Clausius. Quand on interprète le calorique comme de l'énergie, il en résulte une conclusion incorrecte : il sort moins d'énergie à basse température de la machine qu'il n'en est entré à haute température (la différence correspond au travail fourni par la machine).

L'interprétation inappropriée de l'idée de Carnot a survécu jusqu'à ce jour, même si l'erreur a été relevée à maintes reprises depuis.

2. Un autre souci lié est que l'entropie reste perçue comme une grandeur non-intuitive. Ainsi les professeurs évitent d'avoir à la considérer tant que faire se peut. Par là même, le simple diagramme T - S est laissé de côté.

3. Du temps de Carnot, les processus cycliques étaient la norme, puisque la seule machine thermique connue à l'époque, la machine à vapeur, fonctionnait de manière cyclique. Les turbines à vapeur n'existaient pas encore. La turbine hydraulique, à laquelle se réfère Carnot, fonctionne de façon continue.

Remède :

Qu'est-ce que ce sujet a à voir avec l'enseignement de la physique à l'école ? N'est-ce pas clairement un thème pour l'université ? En effet, quand on le présente de la façon compliquée habituelle, il sort du cadre de la physique scolaire. Mais si on le présente de façon claire, comme cela a été fait par Carnot, alors il convient parfaitement pour l'école.

4.20 Le rendement de Carnot

Sujet :

Le rendement relativement faible des machines thermiques est dû au fait que la chaleur ne peut être que partiellement transformée en travail. La fraction de la quantité totale de chaleur qui peut être transformée en travail dans les conditions idéales est appelée *rendement de Carnot*. Si T_2 et T_1 sont respectivement les températures des sources de chaleur entrantes et sortantes, le rendement de Carnot est

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Défaut :

Ce qui apparaît comme une particularité des machines thermiques n'est rien de plus que l'expression d'une étrange incohérence. En comparaison, considérons un exemple en mécanique, qui a déjà été utilisé par Carnot : un moulin, peut-être dans la Forêt Noire, avec une roue à aubes de hauteur $h_2 - h_1 = 5$ m située à $h_2 = 1000$ m au-dessus du niveau de la mer, dispose d'une énergie potentielle

$$m \cdot g \cdot h = 10 \text{ kJ}$$

pour chaque kg d'eau. De cette quantité, il peut utiliser, dans les conditions idéales, seulement

$$m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = 50 \text{ J.}$$

Ainsi, le rendement "de Carnot" est

$$\eta = \frac{h_2 - T_1}{h_2} = 0,005.$$

Un moulin identique sur le cours inférieur du Rhin, à environ $h = 20$ m au-dessus du niveau de la mer, aurait un rendement de 0,25. Ici nous avons été généreux en calculant l'énergie potentielle par rapport au niveau de la mer. Comparé à environ 20 MJ d'énergie potentielle calculée par rapport au centre de la terre, le rendement résultant pour les deux moulins a une valeur vraiment déprimante :

$$\eta = 2,5 \cdot 10^{-6}.$$

On sent immédiatement qu'il y a quelque chose qui ne va pas ici. Apparemment, le rendement de Carnot n'a rien à faire ni avec le moulin ni avec la machine à vapeur, mais seulement avec les altitudes h_2 et h_1 ou les températures T_1 et T_2 , par rapport à un niveau de référence fictif.

Origine :

Carnot, qui a rédigé ses idées avant que le principe de l'énergie ne soit formulé, ne connaissait pas cette grandeur. Il a comparé la machine à vapeur avec un moulin à eau. Pour lui le travail est issu, tout comme dans le cas du moulin à eau, de la différence "d'énergie potentielle" entre la chaleur qui entre et la chaleur qui sort.

Remède :

Le concept est aussi superflu en thermodynamique qu'en mécanique. Décrit comme "un moulin à entropie", la machine thermique est tout aussi simple qu'un moulin à eau.

Sujet :

Le rendement d'une machine est défini par le quotient de l'énergie utile fournie par l'énergie totale reçue :

$$\eta = \text{énergie utile} / \text{énergie reçue}.$$

Pour une résistance chauffante normale nous obtenons avec cette formule un rendement

$$\eta = 1.$$

Avec un moteur thermique on met au dénominateur de cette expression toute l'énergie qui vient de la source de chaleur et qui rentre dans la machine réelle. Si le moteur thermique est parfait, c'est-à-dire s'il n'y a aucune production d'entropie, le rendement se trouve être la quantité nommée "facteur de Carnot" :

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

Avec une pompe à chaleur, on met sous la forme voulue pour l'énergie fournie, l'énergie qui quitte la pompe à chaleur à la température supérieure T_2 , et l'on obtient :

$$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1}.$$

Défaut :

Le rendement est défini de façon maladroite. On attend d'un rendement défini raisonnablement que

- sa valeur soit comprise entre 0 et 1
- une machine parfaite ait un rendement de 1
- une machine imparfaite ait un rendement < 1 .

Une machine est parfaite quand elle fonctionne de manière réversible, ou en d'autres termes quand aucune entropie n'est produite.

Aucun de ces trois critères n'est rempli par la définition du rendement indiquée ci-dessus. Le rendement de la pompe à chaleur est plus grand que 1, et la première condition n'est pas remplie. La machine parfaite de Carnot, fonctionnant de manière réversible, a un rendement inférieur à 1, de sorte que la deuxième condition n'est pas remplie. La résistance chauffante qui fonctionne de façon irréversible et qui est un gaspilleur d'énergie notoire, a un rendement de 1. Ainsi la troisième condition n'est pas remplie.

Origine :

La recherche d'une définition d'un rendement, d'une efficacité ou d'un coefficient économique des machines thermiques a accompagné pendant près de cent ans le processus complexe de différenciation entre l'énergie et l'entropie. On ne la trouve pas dans le travail de Carnot. Carnot n'aurait probablement pas apprécié la nouvelle définition. Nous l'avons trouvée dans l'œuvre de Helmholtz mais nous ne sommes pas certains que Helmholtz soit l'inventeur de cette mesure.

Bien que ce fut dès le début un choix regrettable, on peut au moins comprendre pourquoi une telle définition a été choisie. D'une part, il n'existait pas encore de pompes à chaleur, c'est-à-dire de machines qui ont un rendement supérieur à 1 d'après la définition précédente. D'autre part, il n'y avait pas encore non plus de piles à combustible, et il semblait que la seule façon de tirer profit de l'énergie du carbone était de le brûler. Il n'importait donc pas d'attribuer le mauvais rendement d'une machine à vapeur à la chaudière ou à la machine réelle.

Remède :

On utilise la définition suivante pour le rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{idéal}}}{P_{\text{réel}}}.$$

$P_{\text{réel}}$ est la consommation d'énergie de la machine réelle dont on voudrait évaluer le rendement. $P_{\text{idéal}}$ est la consommation d'énergie de la machine ou de l'usine qui ferait la même chose, mais en fonctionnant de manière réversible, c'est-à-dire sans production d'entropie.

Avec cette définition, on obtient $\eta = 1$ pour le fonctionnement réversible d'une machine de Carnot, parce qu'elle est identique à la machine parfaite de même performance.

Pour la pompe à chaleur on obtient toujours une valeur de η inférieure ou égale à 1. Si la machine fonctionne sans pertes, c'est-à-dire sans pertes par frottement, pertes de chaleur ou pertes dans les conducteurs électriques, alors elle est parfaite et le rendement sera égal à 1. Dans le cas où nous avons de telles pertes, il sera inférieur à 1.

Une résistance chauffante fournit un certain courant d'entropie (courant de chaleur) I_s à la température haute T_2 . La machine idéale correspondante est une pompe à chaleur qui fournit le même courant d'entropie I_s à la même température T_2 . Elle reçoit cette entropie de l'environnement à la température T_1 . Ainsi sa consommation d'énergie est :

$$P_{\text{idéal}} = (T_2 - T_1) \cdot I_s.$$

D'autre part la consommation d'énergie de la résistance chauffante, qui donne le même courant de chaleur $T_2 \cdot I_s$, est :

$$P_{\text{réel}} = T_2 \cdot I_s.$$

Nous obtenons pour le rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{idéal}}}{P_{\text{réel}}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

c'est-à-dire égal au facteur de Carnot.

La résistance chauffante gaspille d'autant plus d'énergie que la température ambiante T_1 est élevée. En fait, plus T_1 est élevée, moins il faut dépenser de l'énergie avec une pompe à chaleur pour amener l'entropie de la température ambiante à la valeur désirée.

Sur la base de la même considération, nous obtenons comme rendement le facteur de Carnot pour tout autre chauffage irréversible, par exemple la chaudière d'une centrale thermique au charbon. Ainsi, le "point faible" d'une telle centrale n'est pas la turbine presque réversible, mais le fonctionnement irréversible de la chaudière.

La définition donnée ici est connue en thermodynamique en tant que "rendement lié au second principe". Il est introduit comme un concept avancé. Nous proposons d'utiliser cette définition depuis le début et de l'appeler simplement "rendement".

4.22 Le principe Zéro de la thermodynamique

Sujet :

“Si deux systèmes sont chacun en équilibre thermique avec un troisième, alors ils sont aussi en équilibre thermique entre eux.” Cette déclaration est appelée le principe Zéro de la thermodynamique.

Défaut :

Si deux systèmes sont en équilibre thermique, leurs températures sont égales, et si leurs températures sont égales ils sont en équilibre thermique. De ce fait découle le principe Zéro. Il ne fait aucun doute que cette déclaration soit correcte. Cependant elle représente une conclusion tellement simple qu’il est difficile de comprendre comment elle pourrait atteindre l’état de “Principe de la thermodynamique”.

Ceux qui pensent qu’il y a une profonde signification cachée derrière les mots doivent se souvenir que plusieurs autres déclarations sur d’autres équilibres pourraient être formulées sans que personne ne les appelle un “Principe” de quelque chose puisque le contenu de ces affirmations est évident.

Puisque le principe Zéro est souvent cité dans le contexte de la thermodynamique statistique, nous devrions par comparaison considérer l’équilibre chimique. En thermodynamique statistique, le potentiel chimique joue un rôle qui est plutôt semblable à celui de la température : il est l’un des deux paramètres avec la température dans la distribution de probabilité de l’énergie. Ainsi, en plus du principe Zéro on devrait formuler un “principe” analogue pour l’équilibre chimique :

“Si deux systèmes sont chacun en équilibre chimique avec un troisième, alors ils sont aussi en équilibre chimique entre eux.”

La thermodynamique phénoménologique nous montre que nous pouvons formuler encore d’autres “principes Zéro” variés : un pour chacun des termes de l’équation fondamentale de Gibbs :

$$dE = TdS - pdV + \mu dn + \mathbf{v}d\mathbf{p} + \mathbf{F}d\mathbf{s} + \omega d\mathbf{L} + \psi dm + \phi dQ + Id\phi \dots$$

(T = température absolue, S = entropie, p = pression, V = volume, μ = potentiel chimique, n = quantité de matière, \mathbf{v} = vitesse, \mathbf{p} = quantité de mouvement, \mathbf{F} = flux de quantité de mouvement, \mathbf{s} = déplacement, ω = vitesse angulaire, \mathbf{L} = moment cinétique, ψ = potentiel de gravitation, m = masse, ϕ = potentiel électrique, Q = charge électrique, I = courant électrique, ϕ = flux magnétique).

Ainsi nous pourrions formuler pour trois corps qui atteignent la même vitesse au moyen de collisions parfaitement inélastiques :

“Si deux systèmes sont chacun en équilibre de vitesse avec un troisième, alors ils sont aussi en équilibre de vitesse entre eux.”

Origine :

Le besoin d’une formulation du principe Zéro semble se faire sentir quand la température et le potentiel chimique sont introduits en mécanique statistique. On doit alors montrer que l’un des paramètres dans la distribution de probabilité a la propriété de cette grandeur qui nous est familière et que nous appelons température. Cependant, même dans ce contexte le principe Zéro n’est rien d’autre que l’expression de la transitivité d’une grandeur physique.

Remède :

Nous ne traitons pas le principe Zéro à l’école. Quelle est en effet la pertinence de ce sujet pour la physique à l’école ? Il nous aide à comprendre pourquoi la thermodynamique est si impopulaire à l’université et à l’école. Il n’y a aucune autre grandeur intensive que la température avec laquelle nous jouons autant, il n’y a aucune autre grandeur extensive que l’entropie avec laquelle nous faisons tant d’histoires. Quelquefois la thermodynamique peut rappeler les habits neufs de l’empereur.

Concernant le rejet du principe Zéro en particulier nous devons demander à nos collègues de l’université. Nous recommandons à nos étudiants : ne vous laissez pas persuader qu’il y a un problème là où il n’y en a pas.

4.23 Le troisième principe

Sujet :

“Il est impossible d’atteindre le zéro absolu en un nombre fini d’opérations.”

C’est une formulation possible parmi d’autres du Troisième Principe de la Thermodynamique.

Défaut :

Pourquoi croyons-nous que cette déclaration mérite d’être citée ? Il existe un grand nombre d’autres déclarations sur l’impossibilité de quelque chose. Il est impossible de vider un récipient rempli d’air en un nombre fini de processus. Il est impossible de vider complètement une baignoire avec un seau. Nous percevons de telles déclarations comme sans importance. Nous ne les comptons pas parmi les lois de la nature. Cependant, c’est différent avec l’entropie. Nous apprenons à la connaître dans un “emballage” tellement ésotérique que son utilisation sans préjugés est extrêmement difficile. Les affirmations au sujet de l’entropie prennent une importance qui n’est pas en rapport avec ses simples propriétés physiques. Nous avons tant de déférence envers l’entropie et nous lui attribuons tant de connotations métaphysiques, que notre comparaison avec la vidange d’une baignoire peut sembler irrespectueuse. Cependant les deux déclarations sont du même type. Notre simple analogie décrit la situation de façon plus claire que toutes les formulations courantes du troisième principe.

Origine :

L’énoncé remonte à *W. Nernst*. Son étudiant *F. Simon* a formulé le troisième principe de la façon suivante : “Il est impossible de priver complètement un corps de son entropie.” La déclaration compense un manque laissé par le Deuxième Principe, puisqu’il détermine la constante d’intégration quand on calcule l’entropie.

Remède :

Notre respect pour les créateurs du troisième principe ne devrait pas nous empêcher de voir les choses un peu plus sobrement. La déclaration ne devrait pas être disposée sur un autel, mais rangée dans la boîte de nos outils usuels.

Sujet :

Selon beaucoup de gens l'entropie est une grandeur ardue. Ils soutiennent qu'une vraie compréhension n'est possible que quand on comprend son sens microscopique : l'entropie est une certaine caractéristique d'une distribution de probabilité, ou quelque peu plus intuitivement, une mesure du désordre dans l'occupation des microétats du système considéré.

Défaut :

1. La thermodynamique classique ou "phénoménologique" est une théorie, la thermodynamique statistique en est une autre. Une théorie est une description mathématique d'une certaine classe de phénomènes naturels, et généralement, il y a plus qu'une théorie pour décrire les mêmes phénomènes. En général on ne peut pas dire que l'une de ces théories est meilleure que l'autre. L'une peut être plus appropriée pour un but donné, l'autre meilleure pour un autre but.

Par exemple, considérons les théories sur la lumière. L'une d'elles est l'optique géométrique, une autre l'optique ondulatoire, une troisième la description thermodynamique de la lumière et une quatrième l'électrodynamique quantique. Chacune de ces théories a sa *raison d'être*. Personne ne prétendrait que nous n'avons plus besoin de l'optique géométrique depuis que nous avons l'électrodynamique quantique. L'électrodynamique quantique ne nous serait d'aucun secours pour le calcul d'une lentille photographique.

De la même façon la thermodynamique phénoménologique n'est ni meilleure ni pire que la thermodynamique statistique. Pour résoudre certains problèmes, la thermodynamique phénoménologique est plus adéquate que la thermodynamique statistique et pour d'autres problèmes c'est l'inverse.

2. On peut décrire la nature suivant plusieurs échelles de taille et de complexité. On pourrait s'attendre à ce que la description devienne plus simple en allant vers des échelles plus petites. On pourrait espérer qu'en pénétrant dans le monde microscopique on se rapproche des particules élémentaires indivisibles et sans structure. Jusqu'à maintenant, cependant, l'expérience nous a appris que chaque fois que nous avançons d'un pas dans le monde microscopique, la recherche des constituants élémentaires de la matière fait un pas en arrière. En même temps nous observons que quand on progresse dans l'autre direction, c'est-à-dire vers les échelles les plus grandes, le monde ne devient pas nécessairement plus chaotique et confus, comme on aurait pu s'y attendre, mais que des nouvelles règles et lois simples émergent de la complexité. De cela nous apprenons qu'il n'est pas vrai qu'une description microscopique du monde est plus fondamentale qu'une vision macroscopique, ou dans notre cas particulier : la thermodynamique phénoménologique n'est pas moins fondamentale que la thermodynamique statistique.

3. Pour les débutants, la thermodynamique phénoménologique a un avantage sur une approche microscopique pour la description des phénomènes thermiques et de leurs applications. L'entropie, quand on l'introduit convenablement, se trouve être une grandeur particulièrement intuitive. Son maniement est si facile qu'un enfant peut y arriver. On arrive rapidement et sans effort à une description quantitative des phénomènes thermiques : quantité de chaleur, transport de chaleur, transitions de phase, machines thermiques et rendement. Les trois principes de la thermodynamique apparaissent comme évidents.

4. Personne ne prétendrait que nous ne comprenons un circuit électrique composé d'une pile et d'une résistance que si nous connaissons l'interprétation microscopique de la résistivité électrique, c'est-à-dire si nous sommes bien informés sur le couplage électron-phonon. Personne ne commencerait la mécanique avec l'interprétation microscopique de la masse au moyen du mécanisme de Higgs. Ignorer le champ de Higgs ne nous empêche pas d'appliquer avec succès la mécanique Newtonienne.

Origine :

Pour beaucoup de scientifiques à la fin du 19ème siècle, le programme de la science était de réduire tous les phénomènes physiques à la mécanique. Il y avait de bons arguments pour croire que ce programme était raisonnable. Il semblait naturel de rechercher la mécanique cachée derrière chaque phénomène thermique, électrique, magnétique et optique. En particulier, la mécanique semblait gouverner le monde physique à l'échelle microscopique. Tout semblait plus explicable par le mouvement et l'interaction mutuelle de petites "particules" élémentaires. Maxwell considérait que son électrodynamique était une théorie mécanique de l'éther. Avec la théorie cinétique des gaz et la physique statistique, on pouvait remonter des phénomènes thermiques à la mécanique des molécules et autres particules. C'est seulement au début du 20ème siècle qu'il devint clair que les théories non-mécaniques étaient les plus fiables et que l'interprétation mécanique du monde contenait une certaine part de fiction.

Remède :

En enseignant la thermodynamique, introduisez l'entropie au tout début, de la même façon que vous introduisez la masse en mécanique : comme une grandeur qui peut être facilement mesurée directement, et pour laquelle nous avons une intuition simple et directe. Comme la masse est une mesure de l'inertie et du poids, l'entropie est une mesure de ce l'on appellerait en langage courant la quantité de chaleur. Le concept de masse qui est introduit de cette façon à l'école convient pour tous les niveaux d'enseignement jusqu'à l'Université. De façon correspondante, l'entropie introduite telle que décrit ci-dessus, est une base solide de la thermodynamique et de la thermodynamique technique à l'Université.

4.25 Température et énergie cinétique des particules

Sujet :

“Quand on lui fournit de la chaleur, l'énergie cinétique des particules du gaz augmente. La température est une mesure de la moyenne temporelle de l'énergie cinétique d'une particule. [...] A travers la relation entre énergie et température absolue, le concept de température acquiert une interprétation intuitive.”

Défaut :

1. La température n'est-elle pas un concept intuitif pour quelqu'un qui ne connaît rien sur l'énergie cinétique des particules ? Le profane en physique n'a absolument aucun problème avec le concept. Le profane a une sensation de chaud et de froid, et il est habitué à ce qu'on utilise une mesure quantitative pour décrire ce qui est chaud ou froid. Seul un physicien peut croire que l'idée de particules en mouvement peut aider notre intuition – c'est évidemment un cas de “déformation professionnelle”. Rappelons aussi que les particules qui grouillent et se tortillent, qui sont supposées aider l'étudiant à comprendre la température, ne représentent elles-mêmes qu'un modèle grossier, puisque les excitations diverses des corps liquides et solides ne sont que très peu conformes avec l'idée d'une particule.

2. Il est suggéré que la température et l'énergie cinétique des particules représentent la même grandeur à un facteur constant près. Mais ce n'est pas vrai. En physique statistique la température est un paramètre dans la fonction de distribution d'énergie de Boltzmann et il n'est pas important de savoir dans quel degré de liberté l'énergie est stockée. La translation est seulement un mouvement parmi d'autres. L'énergie est aussi stockée dans les rotations et oscillations des molécules, dans les excitations électroniques, dans les différents états d'ionisation, dans les excitations plasmoniques et magnétiques, etc. On pourrait soutenir aussi que le mouvement de translation peut au moins être utilisé comme un indicateur de la température. Cela est vrai mais pourquoi devrions-nous préférer la translation ? Nous ne la considérons pas meilleure que les autres degrés de liberté. Nous la voyons indirectement à travers le mouvement Brownien, mais nous voyons aussi indirectement d'autres excitations : excitations électroniques quand le corps rayonne ou excitations de vibration par son émission infrarouge.

Origine :

Probablement les dernières lueurs de la vieille dispute sur la nature de la chaleur qui se déroulait à la fin du 18ème siècle. La question était : la chaleur est-elle une substance ou seulement du mouvement [1] ? Puisque la théorie de la substance a été rejetée, il est resté pour l'interprétation de la chaleur le mouvement des particules de matière. Au milieu du 19ème siècle elle a été interprétée comme une forme d'énergie. Depuis 1911 elle est aussi identifiée avec l'entropie [2].

Remède :

Nous pouvons dire que l'énergie cinétique des particules est proportionnelle à la température. Mais nous devrions bien faire comprendre que ce n'est pas la seule façon dont la température se manifeste à l'échelle microscopique puisque quand la température augmente tous les "niveaux d'énergie" se remplissent. En ce qui concerne notre compréhension intuitive de la température : il n'est pas nécessaire de recourir à une interprétation microscopique compliquée.

[1] *J. Black, M.D.*: Lectures on the elements of chemistry (Cours sur les éléments de la chimie), edited John Robinson, LL.D., Vol I, Edinburgh: Mundell and Son (1803), p. 30-34

[2] *H. L. Callendar*: Proc. Phys. Soc. London **23** (1911), p. 153

4.26 Entropie de mélange

Sujet :

Deux substances gazeuses différentes sont contenues dans deux réservoirs. Quand on relie les deux réservoirs, les gaz se mélangent. Dans ce processus l'entropie totale du système composé s'accroît. Cet accroissement est appelé entropie de mélange.

Défaut :

Le choix du nom "entropie de mélange" est inapproprié et superflu. L'expression suggère que le mélange des gaz a plus d'entropie que les gaz pris séparément. Une telle affirmation présupposerait que deux systèmes sont comparés l'un avec l'autre : les gaz mélangés avec les gaz non mélangés. Une telle comparaison pourrait être faite de trois façons différentes suivant la façon dont on imagine que le mélange a été réalisé.

1. Nous commençons avec deux gaz A et B contenus dans deux enceintes, Fig. 1a.

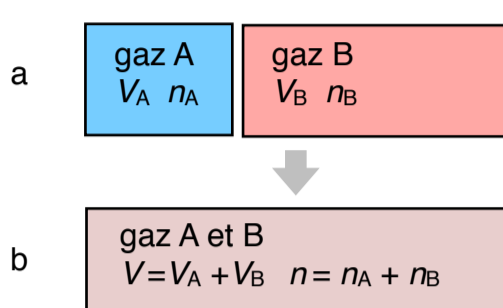


Fig. 1. Le gaz A se répand du volume V_A à V , le gaz B de V_B à V .

L'enceinte de volume V_A contient la quantité de gaz (mesurée en mol) n_A , l'enceinte de volume V_B contient la quantité n_B . Nous relions les enceintes de façon que nous ayons une enceinte de volume $V = V_A + V_B$, Fig. 1b. Les gaz se mélangent et l'entropie augmente de :

$$\Delta S = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A} + n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B} \quad (1)$$

Cette expression représente ce qu'on appelle habituellement l'entropie de mélange. Cependant, l'accroissement d'entropie n'a rien à voir avec le processus de mélange des gaz. Ce n'est rien de plus qu'une expansion isotherme de chacun des deux gaz d'un volume initial V_A ou V_B , respectivement, vers le même volume final V . L'accroissement d'entropie pour une telle expansion est

$$\Delta S = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A}$$

pour le gaz A, et

$$\Delta S = n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B}$$

pour le gaz B. Ainsi l'augmentation totale d'entropie due à l'expansion correspond à ΔS dans l'équation (1).

2. Nous essayons une autre interprétation du mot "mélange". Nous commençons avec deux enceintes de même volume V , Fig. 2a, contenant respectivement les deux gaz A et B.

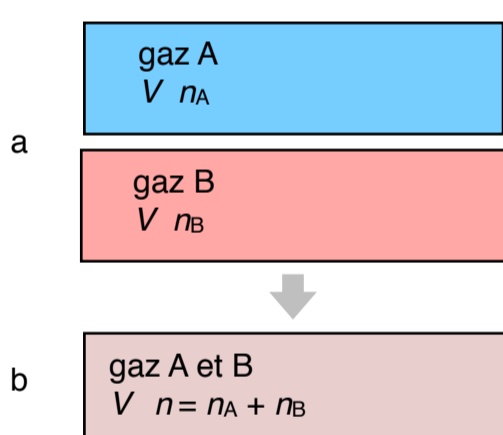


Fig. 2. Les gaz A et B sont transférés dans le même réservoir sans changer d volume.

Nous comparons cette situation avec celle de la figure 2b où les deux gaz occupent une enceinte de volume V . Ici l'entropie totale avant le "mélange" est égale à l'entropie après. Il ne reste rien que l'on puisse appeler entropie de mélange.

3. Finalement une troisième tentative, Fig. 3 : nous comparons l'entropie des gaz A et B (quantités de matière n_A et n_B comme auparavant) tous les deux dans la même enceinte de volume V , avec l'entropie d'un gaz unique C dont la quantité de matière est $n_C = n_A + n_B$.

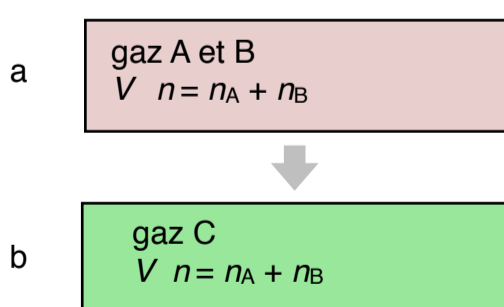


Fig. 3. Les gaz A et B sont remplacés par la même quantité d'un gaz C.

Nous cherchons la différence d'entropie. Quel est l'effet de retirer une caractéristique qui distingue les gaz A et B ? Une telle différence pourrait aussi prétendre au nom "entropie de mélange". Dans ce cas cependant, la différence d'entropie dépend de la nature chimique des gaz et ainsi ne peut pas être égale à la valeur donnée par l'équation (1).

Origine :

Probablement, on avait l'idée en inventant le terme, que l'entropie peut être considérée comme la mesure du désordre d'un système physique. L'interprétation est correcte, mais son maniement n'est pas toujours facile.

Remède :

Ceux qui savent qu'à température constante l'entropie s'accroît avec le volume (et à volume constant avec la température) n'ont plus besoin de ce terme.

4.27 La distribution de vitesse de Maxwell

Sujet :

La fonction de distribution des vitesses moléculaires dans un gaz, calculée par Maxwell, admet la valeur zéro pour $v = 0$. Elle passe par un maximum pour des valeurs croissantes de vitesse, et tend de nouveau vers 0 pour $v \rightarrow \infty$. La vitesse la plus probable v_{mp} , la valeur moyenne de la vitesse v_m et la moyenne quadratique v_{rms} sont différentes. La distribution est mesurée au moyen d'un jet moléculaire. Elle peut être visualisée dans une expérience modèle : de petites sphères en mouvement qui quittent un gaz modèle, sont classées selon leur vitesse.

Défaut :

1. L'aspect de la courbe sur la figure 1, que l'on appelle habituellement distribution de Maxwell, peut surprendre.

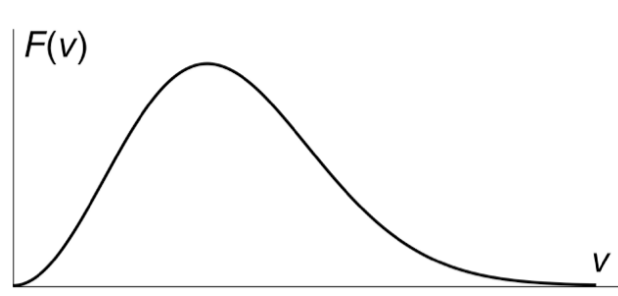


Fig.1 Distribution du module de la vitesse

On peut s'attendre à ce que les vitesses élevées soient rares, comme le montre le diagramme. Mais la probabilité ne devrait-elle pas augmenter quand la vitesse se réduit ? Dans beaucoup de textes cette question évidente n'est pas discutée. En fait, ce comportement de la fonction peut être considéré comme un artefact d'une représentation peu pratique.

La figure montre la distribution du module de la vitesse. La vitesse est une grandeur vectorielle. Les lois de la mécanique deviennent compliquées et d'usage malaisé quand on les formule pour les valeurs absolues des grandeurs mécaniques (vitesse, quantité de mouvement, force). Si dans notre cas nous ne recherchons pas la probabilité de trouver une molécule avec une vitesse dans un intervalle donné dv , mais avec un vecteur vitesse dans l'intervalle (dv_x, dv_y, dv_z) , nous obtenons une distribution gaussienne centrée sur $\vec{v} = \vec{0}$ (vecteur nul).

La figure 2 montre la distribution de probabilité pour une composante du vecteur vitesse, voir aussi l'équation (1) dans la figure 3.

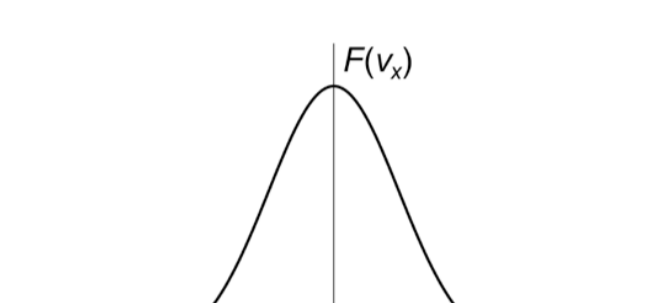


Fig.2 Distribution de la composante suivant x de la vitesse

La raison pour laquelle quand $v \rightarrow 0$ le module de la vitesse tend vers 0 est que nous ne comparons pas des volumes égaux de l'espace des vitesses, mais des intervalles égaux dv . Le volume $4\pi v^2 dv$ dans l'espace des vitesses qui appartient à dv , augmente pour un dv donné comme le carré de la vitesse, voir l'équation (2) dans la figure 3. De cette manière, les grandes vitesses sont "privilégiées" et les petites "pénalisées". Dans le travail original de Maxwell les deux représentations sont clairement distinguées.

Particules avec le vecteur vitesse \vec{v}	
$F_1(\vec{v}) = A \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$	(1)
Particules avec un module de vitesse v	
$F_2(v) = B \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$	(2)
Écoulement de particules de module de vitesse v dans un jet moléculaire	
$F_3(v) = C \cdot v^3 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$	(3)
Particules avec l'énergie E	
$F_4(E) = D \cdot \sqrt{E} \cdot e^{-\frac{E}{kT}}$	(4)

Fig. 3. Diverses distributions de probabilité. Les constantes ont été regroupées dans les coefficients A , B , C et D respectivement.

2. Il est souvent souligné que la courbe de la Fig. 1 est asymétrique, mais habituellement il n'est pas précisé ce qu'on entend par là : est-ce le fait que la courbe elle-même n'a pas d'axe de symétrie, ou veut-on dire qu'elle n'est pas placée symétriquement par rapport à l'axe des ordonnées. Il est également souvent dit que du fait de cette asymétrie les valeurs de v_{mp} , v_m et v_{rms} sont différentes l'une de l'autre. Parfois on insiste sur le fait qu'on doit faire clairement la distinction entre ces valeurs. Le problème pour l'étudiant(e) est qu'il (elle) ne sait pas dans quel contexte cette distinction est importante. Très probablement les étudiants n'auront jamais l'occasion de les confondre.

3. Les équations (1) et (2) donnent la distribution de vitesse des molécules d'un gaz qui est en équilibre thermodynamique. Il est souvent dit ou suggéré que la même distribution vaut pour les particules dans un jet particulière, et que la distribution peut être mesurée directement au moyen d'un tel jet. En réalité, la distribution de vitesse dans un jet particulière a une forme similaire à celle de la distribution des vitesses des particules dans le cas de l'équilibre. Cependant, les fonctions ne sont pas les mêmes, équation (3), Fig. 3. Ici, la vitesse devant le coefficient de Boltzmann est à la puissance trois [1]. (Pour des raisons géométriques, il y a un facteur en v^2 , mais il y a un facteur additionnel en v car une molécule rapide contribue plus fortement à la densité de courant qu'une molécule lente.)

4. Souvent, l'importance de la distribution de vitesse est mise en avant sans préciser ce pour quoi cela est nécessaire. La distribution des composantes de la vitesse permet de calculer la pression. Pour beaucoup d'autres objectifs, c'est la distribution de l'énergie cinétique qui est utile. D'ailleurs cette distribution présente une certaine similitude avec la distribution de vitesse, équation (4). Mais elle permet de répondre par exemple aux questions suivantes [2]: "Combien de molécules d'un gaz ont-elles une énergie suffisante pour initier une réaction chimique endothermique, ou pour ioniser un atome ou une molécule ou pour exciter un atome, ou échapper au champ gravitationnel de la Terre ou d'une autre planète, ou pour vaincre la répulsion électrostatique entre deux noyaux atomiques (dans le but de permettre une réaction de fusion nucléaire) ?" La seule distribution qui n'est pas nécessaire est celle de la vitesse, c'est-à-dire de la valeur absolue de la vitesse.

Origine :

1. On trouve la distribution de vitesse dans l'œuvre de Maxwell [3]. Les résultats de Maxwell sont transmis de génération en génération, puisque Maxwell était un grand physicien.

2. Peut-être un effort pour justifier l'affirmation que la vitesse moyenne est une mesure pour la température.

3. L'interprétation peu critique du modèle expérimental avec les petites sphères.

4. L'interprétation peu critique du modèle expérimental avec les petites sphères.

Remède :

D'autres distributions sont plus utiles, comme celles des composantes du vecteur quantité de mouvement ou celle de l'énergie cinétique. Il vaudrait mieux omettre le modèle expérimental.

[1] *W. Döring: Einführung in die theoretische Physik V, Statistische Mechanik (Introduction à la physique théorique V, Mécanique statistique), Sammlung Götschen, Band 1017, p. 16.*

[2] *H. Vogel: Physik (Physique), Gerthsen - Kneser - Vogel, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1977, p. 169.*

[3] *J. C. Maxwell: On the dynamical theory of gases (Sur la théorie dynamique des gaz); Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 157 (1867) p. 49-88*

Sujet :

L'eau liquide (comme les autres liquides) peut se transformer dans l'état gazeux de deux façons : elle peut s'évaporer et elle peut bouillir. Si on fournit de la chaleur à de l'eau, d'abord sa température augmente. Quand la température d'ébullition est atteinte, sa température n'augmente plus. Une différenciation équivalente entre vaporisation et ébullition n'existe pas pour le processus de fusion.

Voici quelques commentaires typiques tirés de manuels :

“Quand la pression de vapeur devient égale à la pression d'un autre gaz situé au-dessus du liquide, alors le liquide se met à bouillir. Alors, la production de vapeur ne se produit pas seulement à la surface du liquide, mais aussi à l'intérieur ; des bulles de vapeur se forment.” [1]

“Un liquide bout dès que sa pression de vapeur devient égale à la pression de l'air qui le surmonte. La température d'ébullition dépend de la pression de l'air.” [2]

“Ebullition : quand il y a ébullition des bulles de vapeur se forment à l'intérieur du liquide. Tant que le liquide bout, sa température ne change pas Evaporation : la formation de gaz se produit de façon continue à la surface du liquide quand la température est inférieure à la température d'ébullition.” [3]

Défaut :

Il n'y a aucune réponse convaincante aux questions évidentes suivantes : 1. Pourquoi le processus de changement de phase se produit-il lentement dans le cas de l'évaporation et rapidement pour l'ébullition ? 2. Pourquoi la température ne continue pas d'augmenter quand la température d'ébullition est atteinte ?

Il est facile de répondre à ces questions :

La vitesse du processus d'évaporation dépend de la rapidité avec laquelle la vapeur d'eau s'échappe de la surface vers des régions où la pression partielle de la vapeur est plus faible. C'est un processus de diffusion et de tels processus sont notoirement lents. Tout le monde sait que le processus peut être accéléré en soufflant, c'est-à-dire en créant de la convection. Quand l'eau bout, la vitesse d'évaporation n'est plus limitée par la diffusion. Puisque la pression de vapeur à la surface de l'eau est maintenant égale à la pression atmosphérique, c'est-à-dire le gaz est de la vapeur d'eau pure, la vapeur ne quitte plus la région de la surface par diffusion, mais par un processus de ruissellement ou d'écoulement sans résistance. La vapeur peut s'échapper sans entrave. Le taux d'évaporation ne dépend alors plus que du taux de chauffage.

Si de l'entropie est fournie avec un taux suffisamment élevé à de l'eau liquide à température inférieure à la température d'ébullition, la vapeur qui est produite ne peut pas évacuer toute cette entropie. L'entropie s'accumule et la température de l'eau augmente. L'engorgement disparaît quand la température d'ébullition est atteinte. Le taux de formation de la vapeur est maintenant donné par le taux avec lequel l'entropie est fournie. C'est également vrai si la pression atmosphérique n'est pas égale à 1 bar, c'est-à-dire quand la température d'ébullition est inférieure à 100 °C.

La formation des bulles est fascinante mais elle n'est pas nécessaire pour le processus d'ébullition. Si de l'eau est chauffée par au-dessus avec une lampe à infrarouge, l'ébullition commence dès que la surface atteint la température d'ébullition, sans que des bulles apparaissent.

Origine :

Le phénomène le plus voyant, c'est-à-dire la formation des bulles, semble cacher la vue sur l'essentiel.

Remède :

Il faut utiliser la pression partielle de la vapeur d'eau au-dessus de la surface de l'eau. Tant qu'elle est plus faible que la pression atmosphérique nous avons de l'évaporation. L'eau s'échappe par le long processus de diffusion. Quand l'eau bout, la vapeur au-dessus de la surface de l'eau est de la vapeur d'eau pure. Aucune résistance ne s'oppose à son évacuation. On explique la formation des bulles, mais sans oublier de dire qu'elles ne sont une indication pour le processus d'ébullition que quand l'eau est chauffée par en-dessous. L'explication est encore plus facile quand on utilise le potentiel chimique, puisque les deux processus – transition de phase et diffusion – sont pilotés par une différence de potentiel chimique.

[1] Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik (Physique), Springer-Verlag, Berlin, 1977, p. 189.

[2] Sexl, Raab, Streeruwitz, Das mechanische Universum (L'univers mécanique), Band I, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, 1980, p. 205.

[3] Physik (Physique), GROSS-BERHAG, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1996, p. 92.

4.29 Climat océanique et capacité thermique de l'eau

Sujet :

La conviction que la capacité thermique massique c anormalement élevée de l'eau est responsable des hivers doux et des étés frais dans les pays côtiers fait partie du savoir de quelqu'un qui a un niveau général d'éducation en physique.

Défaut :

Pourquoi comparons-nous les capacités thermiques des corps pour 1 kg et non pas pour 1 mole ou 1 m³ ? Dans le cas présent ni la capacité thermique massique $C/m = c$, ni celle par unité de volume $C/V = c \cdot \rho$ n'est la valeur adéquate, mais au mieux la capacité thermique par unité de surface $C/A = c \cdot \rho \cdot h$, où A est la surface et h la profondeur de la couche qui est effective pour l'échange de chaleur. h est alors défini comme la profondeur jusqu'où on peut observer les variations saisonnières de température.

Pour estimer la valeur de h , nous considérons la chaleur Q , absorbée à travers la surface pendant la demi-année d'été $a/2$, où nous admettons une conductivité thermique λ constante et un gradient de température constant $\Delta T/h$ à travers la couche :

$$Q \approx \frac{1}{2} \cdot a \cdot A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

D'autre part, Q peut être estimée à partir de la capacité thermique

$$C = c \cdot \rho \cdot h \cdot A$$

et de la différence de température moyenne $(1/2)\Delta T$ entre la couche considérée et l'environnement :

$$Q \approx c \cdot \rho \cdot h \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{2}$$

De ces deux expressions on obtient

$$h \approx \sqrt{\frac{\lambda a}{c \rho}}$$

et finalement avec $C/A = c \cdot \rho \cdot h$

$$\frac{C}{A} \approx \sqrt{\lambda c \rho a}$$

Le tableau ci-dessous montre que l'eau se sort mal de cette comparaison. On ne peut comprendre l'efficacité de l'eau dans le climat qu'en prenant en compte que les courants dans l'océan mélangent des couches beaucoup plus épaisses que les 2 m calculés, et que les 1000 mm de précipitations annuelles (typique pour l'Europe) correspondent à un taux de renouvellement de la chaleur suffisant pour réchauffer de 10°C une couche d'eau de 60 m d'épaisseur. Ce qui est décisif est que l'eau est liquide et qu'elle est volatile, et non pas sa capacité thermique massique anormale qui ne joue pas un grand rôle à cause des faibles valeurs de la masse volumique et de la conductivité thermique.

	ρ	λ	C/m	C/V	C/A	h
	Mg m ⁻³	J m ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	MJ m ⁻³ K ⁻¹	MJ m ⁻² K ⁻¹	m
eau	1	0,6	4,2	4,2	9	2
granite	2,8	3,6	0,8	2,3	16	7
basalte	2,9	2,1	0,9	2,5	13	5
sable de rivière ¹⁾	1,6	1,1	1	1,7	7	5
terre ²⁾	2	2,3	1,3	2,5	14	5

1) grains fins avec 0,07g/g humidité. 2) sol argileux avec grains fins et 0,14 g/g humidité

Origine :

Nous succombons facilement à la tentation de conclure à une relation de cause à effet à partir d'un parallélisme et cela d'autant plus que la conclusion est suggérée par des experts. L'argument semble convaincant et survit parce que sa réfutation n'est pas facile.

Remède :

Il ne suffit pas seulement d'omettre de telles conclusions incorrectes qui sont plus fréquentes que ce qui est généralement admis.

4.30 Le transport de chaleur à travers l'atmosphère

Sujet :

L'atmosphère de la terre est presque complètement transparente pour la lumière du soleil. Ainsi, la lumière du soleil n'est pas absorbée par l'atmosphère, mais seulement par la surface de la terre. L'atmosphère est presque complètement opaque pour le rayonnement infrarouge émis par la terre. Vu de l'espace extérieur, le rayonnement IR qui vient de la terre est émis par l'atmosphère à une certaine hauteur, appelée altitude d'émission. L'énergie correspondante est transférée de la surface de la terre à l'altitude d'émission au moyen de différents mécanismes, que l'on représente souvent sous la forme de diagrammes de transferts d'énergie comme celui de la figure 1. Il est frappant de voir qu'il y a deux courants d'énergie rayonnante, dont l'amplitude est plus grande que celle du courant d'énergie qui vient du soleil.

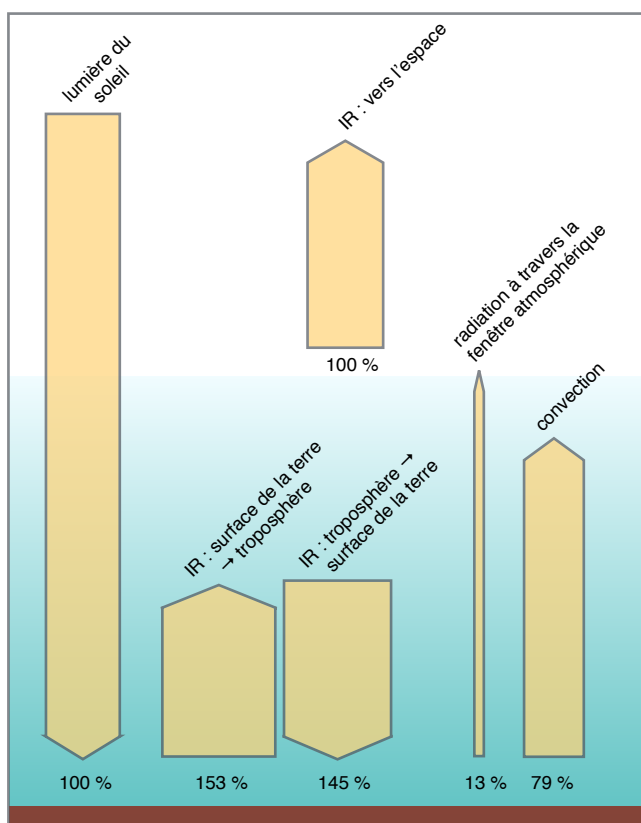


Fig. 1

Défaut :

Une représentation comme celle de la figure 1 suggère que la contribution la plus importante au flux d'énergie entre la surface de la terre et la partie supérieure de la troposphère vient du rayonnement. Les flèches correspondantes sont les plus grandes et la densité de courant d'énergie la plus élevée parmi tous les autres courants d'énergie. Cette impression est confortée par le texte qui accompagne de tels diagrammes.

Cependant, la représentation est trompeuse. Nous obtenons le flux net d'énergie radiative entre la surface de la terre et la partie supérieure de la troposphère en ajoutant les deux courants radiatifs. Le résultat est un courant qui correspond à seulement 8 % du courant d'énergie absorbé par la terre, Fig. 2. Sur cette figure on peut voir clairement que le mécanisme dominant du transport n'est pas le rayonnement, mais la convection. Pour un traitement grossier ou en première approximation, le rayonnement peut même être complètement ignoré.

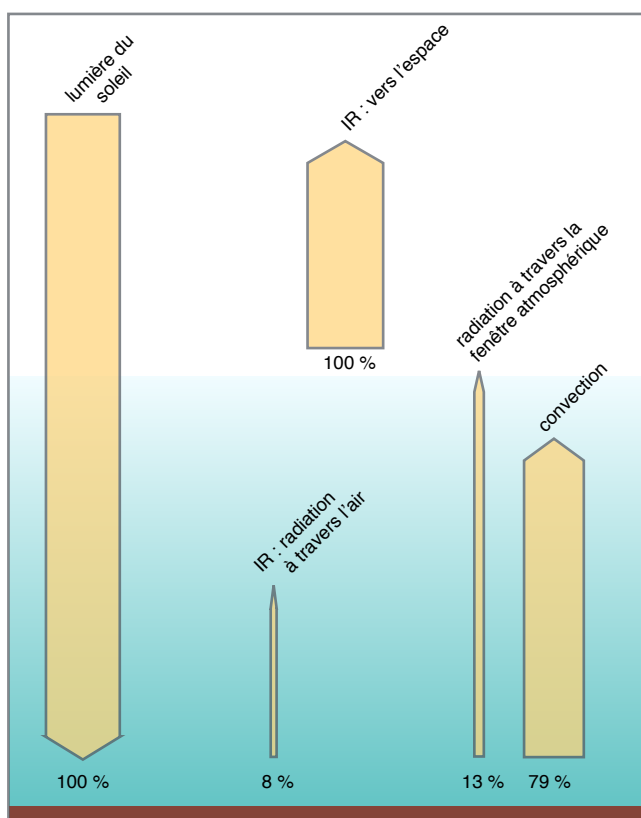


Fig. 2

On pourrait être tenté de défendre la représentation de la figure 1 en plaçant qu'elle contient plus d'informations que la figure 2. Cependant cette information n'est généralement pas demandée, et comme le montre notre expérience, cela désoriente les étudiants.

En fait, on peut décomposer tout autre courant en deux composants (ou plus). Nous pouvons décomposer l'air au repos dans la pièce où nous sommes en deux moitiés, celle qui est constituée des molécules qui se déplacent vers la droite à un instant donné, et l'autre constituée par celles qui se déplacent vers la gauche. De cette façon nous obtenons deux énormes courants d'air en sens inverse. On pourrait procéder de la même manière avec les électrons dans un conducteur sans courant. Il y aurait deux courants électriques forts en sens inverse. A propos, on pourrait décomposer de la même façon les composantes horizontales du rayonnement infra-rouge dans l'atmosphère.

Considérons encore un autre exemple, qui est même plus proche de celui du flux radiatif dans l'atmosphère : le flux de chaleur à travers un solide, disons une barre de cuivre chauffée à une extrémité et refroidie à l'autre. Les phonons dans la barre de cuivre sont ce que sont les photons pour le rayonnement IR dans l'atmosphère. Il ne viendrait à l'idée de personne de décomposer le courant de phonons dans la barre de cuivre en deux courants opposés, quand on s'intéresse au transport de la chaleur dans la barre de cuivre.

Nous ne disons pas qu'une telle décomposition est incorrecte. Elle est seulement compliquée et source d'erreur.

Origine :

Peut-être le fait qu'il est plus facile de mesurer les courants d'énergie par composante que le flux net d'énergie.

Remède :

Représenter les courants d'énergie radiative dans l'atmosphère sans décomposition au lieu des courants d'énergie partielle. Cette grandeur a une valeur bien définie en chaque point du champ de rayonnement. Alors il devient clair que le mécanisme dominant de transport de chaleur à travers la partie inférieure de la troposphère est la convection.

Sujet :

On attribue souvent au frottement les températures élevées qui apparaissent quand une navette spatiale, une capsule spatiale ou une météorite rentre dans l'atmosphère terrestre.

Défaut :

Le frottement génère de la chaleur, et la chaleur signifie température élevée. Tout le monde en a fait l'expérience. Les freins chauffent, un foret peu tranchant peut être porté à l'incandescence, le bois qui est découpé avec une scie circulaire peut être carbonisé par les dents émoussées. Qu'y a-t-il de plus simple que d'expliquer par le frottement les hautes températures lors de l'entrée dans l'atmosphère d'une navette spatiale ou d'une météorite ? Et pourtant ce n'est pas correct.

L'air est comprimé devant un corps qui se déplace à grande vitesse. Si la vitesse est supérieure à la vitesse du son, une onde de choc se forme devant le corps : cela correspond à une augmentation brutale de la pression, de la masse volumique et de la température et à une diminution de la vitesse (dans le système de référence du corps). Plus la vitesse du corps est élevée, plus forts sont ces changements. Pour une capsule qui rentre dans l'atmosphère, la température peut atteindre 20 000 K. (L'écran thermique quant à lui peut chauffer jusqu'à 2 000 K). Dans la détente qui suit et les frottements et les processus de turbulence qui l'accompagnent, la température décroît à nouveau. Ainsi, des températures élevées apparaissent devant le "nez" de l'objet volant, et non aux endroits où se passent les processus de frottement.

Deux questions se posent :

- pourquoi la température augmente-t-elle à la traversée de l'onde de choc ?
- pourquoi la température n'augmente-t-elle plus dans la phase suivante de frottement ?

Nous obtenons les réponses à ces deux questions en considérant l'entropie. Tout ce que nous avons à savoir, c'est que l'entropie d'une quantité donnée de gaz dépend de son volume et de sa température : plus la température est élevée (à volume fixé) et plus grand est le volume (à température fixée), plus le gaz contiendra d'entropie.

En ce qui concerne la navette spatiale, nous considérons une certaine quantité d'air. Dans l'onde de choc, cet air est comprimé très rapidement, et cela signifie qu'il est comprimé de façon isentropique ("adiabatique"). Puisque l'entropie ne change pas et que le volume diminue, la température augmente. L'effet est le même que l'accroissement de température d'une masse d'air descendante dans l'atmosphère.

Le deuxième effet – décroissance de la température malgré le frottement – est peut-être plus inattendu. Pour le comprendre, considérons un système modèle, géométriquement plus simple que la capsule spatiale, la navette ou la météorite, mais dans lequel les processus thermodynamiques sont essentiellement les mêmes : un écoulement stationnaire de gaz dans un tube avec une résistance à l'écoulement, Figure 1.



Fig. 1

Puisque le gaz se détend en traversant la résistance, le débit volumique (en litres par seconde) est plus grand derrière que devant. Si le gaz peut être considéré comme parfait, le processus peut être décrit au moyen d'une équation étonnamment simple :

$$c_p \cdot T + \frac{\dot{m}}{2} v^2 = \text{const}$$

où c_p est la chaleur spécifique à pression constante, T la température absolue, \dot{m} la masse molaire et v la vitesse du gaz.

L'équation nous dit que l'expression à gauche du signe égal a la même valeur en chaque point d'une ligne de courant : quand la vitesse est élevée, la température est basse et vice versa*. (Une condition pour que l'équation soit valide est que le gaz n'échange pas d'énergie à travers les parois de la conduite). L'équation reste valide quand il y a une résistance à l'écoulement dans la conduite. Dans le cas de la Figure 1, l'équation nous dit que la température est plus basse derrière la résistance que devant. Puisque le gaz se détend, sa vitesse est plus grande en aval de la résistance.

Quand on élargit la conduite derrière la résistance, on peut faire en sorte que les vitesses devant et derrière la résistance soient égales, Figure 2.

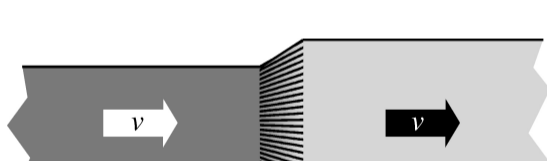


Fig. 2

Maintenant on peut comprendre pourquoi le processus de frottement dans la résistance ne se traduit pas par une augmentation de température. L'entropie du gaz augmente à cause du frottement, mais cet accroissement ne se manifeste pas par une température plus élevée mais par un plus grand volume. Ainsi la constance de la température dans la configuration de la Figure 2 a la même explication que celle de la détente bien connue de Gay-Lussac.

Les mêmes arguments sont valables pour la navette spatiale. Ici aussi nous avons une détente accompagnée d'un processus de frottement. Dans ce cas il y a un effet supplémentaire : l'air se mélange avec l'air ambiant. L'effet résultant est que la température de l'air décroît vraiment**.

En résumé, un gaz se réchauffe quand il est comprimé de façon isentropique. Quand il se détend, sa température diminue à nouveau. La température d'un gaz n'augmente pas seulement par frottement, mais aussi par compression. La simple chaîne d'arguments mouvement → frottement → chaleur, correcte pour les corps solides et liquides, n'est pas valable pour les gaz. Quelle propriété du gaz est responsable de ce comportement ? Simplement le fait que les gaz sont compressibles.

Origine :

Les changements de température dus à des compressions ou détentes isentropiques sont des effets omniprésents. La manifestation la plus spectaculaire est la neige sur les hautes montagnes. Le profane en physique a pour beaucoup d'effets thermiques une explication qui tient le coup face à une analyse physique approfondie. Dans le cas présent cependant, il manque une explication : le profane voit la neige au sommet des montagnes, et il voit la corrélation avec l'altitude, mais pas celle avec la pression de l'air. Au contraire il explique correctement l'effet du frottement sur la température. Aussi, pourquoi ne pas attribuer au frottement l'effet thermique de la navette spatiale ou des météorites ? Apparemment quelques physiciens ne sont pas en avance sur le profane. La raison peut être qu'ils ne sont pas familiarisés avec cet outil simple et puissant qu'est l'entropie.

Remède :

Montrer que les compressions et détentes isentropiques sont la cause de beaucoup d'effets thermiques frappants. Les hautes températures qui causent la fonte des couches externes d'une météorite et qui mettent en danger la navette spatiale ne sont que l'une d'entre elles.

* Un exemple est l'air qui sort d'un pneu de voiture quand on ouvre la valve. A l'intérieur du pneu la vitesse de l'air est nulle, immédiatement après avoir quitté le pneu elle est élevée. Donc sa température diminue.

** En fait, les processus sont encore plus compliqués. A cause des hautes températures il y a des excitations électroniques des molécules, des dissociations et d'autres réactions chimiques. Tout cela cause une diminution supplémentaire de la température.

Sujet :

Nous commentons trois affirmations sur le rayonnement thermique, que l'on peut trouver dans des manuels. Elles sont en partie contradictoires et en partie incorrectes. Elles n'apparaissent pas nécessairement dans le même manuel.

(1) Le transfert de chaleur peut se produire sous la forme de conduction, convection et rayonnement thermique.

(2) Le domaine de l'infrarouge ou rayonnement thermique commence à la fin du rouge dans le spectre de la lumière visible.

(3) La chaleur arrive à la Terre avec la lumière du Soleil. Elle se manifeste par une augmentation de température du corps qui absorbe la lumière.

Défaut :

Notre sujet est ce rayonnement électromagnétique que l'on appelle "chaleur rayonnée" ou "rayonnement thermique". On caractérise avec ces noms une méthode particulière de création de rayonnement électromagnétique : un corps émet un rayonnement électromagnétique parce que sa température absolue est supérieure à zéro. Il existe d'autres procédures pour produire un rayonnement électromagnétique. Les rayonnements correspondants sont appelés rayonnements non-thermiques. Des exemples de rayonnement non-thermiques sont les micro-ondes produites à l'aide d'un klystron, la luminescence d'une diode semi-conductrice, ou la lumière d'un laser.

On peut d'abord faire une objection quelque peu banale contre l'une de ces affirmations : le rayonnement thermique n'est pas limité au domaine infrarouge. La lumière du Soleil est du rayonnement thermique mais la plus grande partie de son énergie correspond à la partie visible du spectre. Le fond diffus cosmologique est thermique et le maximum de son spectre est situé dans le domaine des micro-ondes. Le plasma d'un réacteur à fusion émet un rayonnement thermique dans le domaine des rayons X.

Un défaut plus sérieux et plus subtil réside dans l'affirmation que le rayonnement thermique transfère de la chaleur. Pour analyser cette affirmation, nous devons d'abord clarifier ce que cela signifie quand on dit que de la chaleur, ou "de l'énergie sous forme de chaleur" est transférée. Un transfert de chaleur est un transfert d'énergie accompagné par un transport d'entropie. Le courant d'énergie P et le courant d'entropie I_S sont proportionnels :

$$P = T \cdot I_S .$$

En général un flux d'énergie a différentes contributions : chaleur, travail, énergies électrique et chimique. C'est seulement la partie qui correspond à l'équation ci-dessus que l'on appelle chaleur.

Pour décider si tout ou quelle partie d'un rayonnement électromagnétique donné est de la chaleur, nous devons considérer le flux d'énergie et nous devons connaître la température. Si le rayonnement a un spectre de Planck, il n'y a pas de problème. Mais plus le spectre est sélectif, plus il est difficile d'attribuer une température au rayonnement. La situation redevient simple quand le rayonnement provient d'un émetteur non-thermique, comme les micro-ondes d'un klystron ou les ondes électromagnétiques d'un émetteur de radio. Dans ces cas-là, ce flux d'entropie est presque nul et on n'appellera pas les ondes émises, rayonnement thermique. Quand on considère seulement l'effet des ondes électromagnétiques sur un corps absorbant récepteur, c'est-à-dire le fait que le récepteur chauffe, ces difficultés sont facilement ignorées.

Venons en maintenant à une incorrection dans une de nos citations. L'effet de chauffage du récepteur n'est pas un indicateur de la chaleur qui peut être transportée par le rayonnement. L'effet de chauffage est du au fait que le rayonnement transfère de l'énergie et que cette énergie est dissipée dans le corps absorbant. La "forme" de cette énergie n'importe pas. Un rayonnement complètement sans entropie a pour effet le même chauffage qu'un rayonnement thermique si les deux rayonnements transportent la même énergie et si les deux sont complètement absorbés.

En résumé : à partir du chauffage d'un corps absorbant nous ne pouvons pas conclure que la chaleur a été transportée par le rayonnement incident.

En effet, dans ces cas où l'on utilise le plus souvent cet argument, c'est-à-dire dans le cas de la lumière du Soleil ou du rayonnement infrarouge provenant d'un corps rayonnant, le taux de production d'entropie dans le processus d'absorption est beaucoup plus grand que l'apport d'entropie par le rayonnement.

Nous avons vu que le chauffage d'un corps absorbant ne prouve pas que le rayonnement transfère de l'entropie. Il y a cependant un indicateur clair pour l'entropie transférée par un rayonnement donné. Au lieu de regarder le corps absorbant, examinez l'émetteur. Si la température d'un corps décroît, c'est à dire si son entropie décroît, alors qu'il n'a aucun contact matériel avec son environnement, nous pouvons conclure que le rayonnement émis par le corps doit avoir évacué de l'entropie puisque le Deuxième Principe nous dit que l'entropie ne peut pas être détruite.

Origine :

Le rayonnement thermique a été observé et étudié longtemps avant qu'il soit possible de reconnaître que la nature du rayonnement était la même que celle de la lumière et longtemps avant que l'on comprenne la relation entre l'énergie et la chaleur. Le nom chaleur rayonnée (strahlende Wärme) est probablement dû à Scheele [1]. En 1790 Pictet [2] croyait que la lumière et la chaleur existaient séparément. En particulier, il croyait avoir montré que la lumière de la Lune n'était pas accompagnée de chaleur, contrairement à celle du Soleil. Dans les premières dizaines d'années du 19ème siècle, on a été de plus en plus convaincu que la lumière et la chaleur rayonnée avaient la même nature. Cependant on a du attendre l'apparition de deux grandes théories pour en avoir une clarification précise : l'électrodynamique de Maxwell et la thermodynamique statistique du rayonnement de Planck [3].

Remède :

Ne pas identifier rayonnement infrarouge et transfert de chaleur radiatif.

Concernant le rayonnement électromagnétique du Soleil, affirmer qu'il transfère de l'énergie. Le chauffage d'un corps absorbant est principalement du à la dissipation de cette énergie. Comme argument pour le fait que le rayonnement transfère aussi de l'entropie, considérer le refroidissement de l'émetteur au lieu du chauffage du corps absorbant.

Au lieu de donner un nom au rayonnement – rayonnement thermique ou chaleur rayonnée – attribuer le nom à l'émetteur : émetteur thermique.

[1] *E. Mach*: Die Principien der Wärmelehre (Les principes de la théorie de la chaleur). – Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1919. – p. 126

[2] *M. A. Pictet*: Essai sur le feu. – Genève 1790

[3] *M. Planck*: Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung (Conférences sur la théorie du rayonnement thermique). – Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1913

Sujet :

Comme étudiant à l'université, on a à étudier deux sortes de sources de lumière, qui diffèrent dans leur mode de fonctionnement. A la première classe appartiennent les corps rayonnants, le Soleil et les flammes blanc-jaunâtres des bougies. A la seconde appartiennent les lampes à décharge, les lasers, les DELs et les flammes colorées.

En ce qui concerne les sources lumineuses de la première classe, les étudiants apprennent que les corps noirs, chauds, émettent un rayonnement électromagnétique : le rayonnement thermique ou de corps noir. Le spectre ne dépend que de la température de l'émetteur. La fonction correspondante est appelée loi de Planck.

Concernant l'émission des sources de la deuxième classe, le mécanisme semble être différent : les étudiants apprennent que les électrons dans les atomes, les molécules ou un réseau cristallin, vont d'un état excité à un état de moindre énergie et de ce fait émettent un photon. La fréquence de la lumière correspondante est obtenue à partir de la différence d'énergie entre les deux états ; l'intensité dépend de la probabilité de transition. L'excitation peut être réalisée de différentes manières : électriquement, thermiquement ou par pompage optique.

Défaut :

Les diverses sources de lumière sont abordées sur deux niveaux conceptuels différents : le Soleil, la lampe à incandescence, la flamme d'une bougie etc., sont traités sur le plan thermodynamique, la lampe à décharge, le laser et la DEL sont décrits en discutant de processus qui ont lieu au niveau atomique. Ainsi, on peut avoir l'impression que l'émission de la lampe à incandescence n'a rien à voir avec la physique de l'atome, et que l'émission des atomes de sodium quand on jette du sel de table dans un gaz enflammé, n'a rien à voir avec la thermodynamique.

En fait, les deux types de sources lumineuses sont basés sur les transitions d'un système d'un état excité à un état de moindre énergie, et dans les deux cas l'intensité est influencée par les lois de la thermodynamique.

Une justification pour choisir deux approches différentes pourrait être que l'on est souvent seulement intéressé par la forme du spectre. En effet, le spectre d'un corps noir peut être obtenu en n'utilisant que des arguments de physique statistique. Le mécanisme microscopique n'est pas pertinent. Au contraire, la thermodynamique est de peu de secours pour obtenir le spectre d'une lampe à décharge. Dans ce cas, la physique de l'atome est nécessaire.

Cependant, si on n'explique pas comment sont reliés les deux types d'explication, on peut seulement espérer que les étudiants ne vont pas faire ce que l'on attend d'eux normalement : poser des questions quand ils ne comprennent pas. Une telle question pourrait être : pourquoi le Soleil n'a pas un spectre de raies comme une lampe à décharge hydrogène-hélium ?

Origine :

Les théories et explications du rayonnement de corps noir et des spectres de raies ont été développées de façon indépendante, et elles ont conservé cette indépendance jusqu'à aujourd'hui dans l'enseignement de la physique. Notre exemple montre aussi que ce que l'on désigne par "explication satisfaisante" n'est pas clair du tout. Dans un cas nous présentons comme explication la réduction à un mécanisme microscopique, et dans l'autre la description du processus de production du rayonnement et ses propriétés spectrales.

Remède :

Un corps dont la température n'est pas égale à 0 K émet un rayonnement électromagnétique. Si son émissivité $e(f)$ est égale à un à toutes les fréquences (les valeurs de e sont comprises entre 0 et 1), la densité de flux d'énergie j_E dans l'intervalle de fréquence df du rayonnement, est donné par la loi de Planck :

$$dj_E = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{kf} - 1} df$$

Maintenant, l'émissivité d'un corps est égale pour chaque fréquence à son absorbance

$$e(f) = a(f).$$

Si e est égale à 1 pour toutes les fréquences, c'est vrai aussi pour a et le corps est complètement opaque ; il est noir.

Si $e(f) = 1$ n'est pas vrai pour toutes les fréquences, alors la loi de Planck devient :

$$dj_E = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{kf} - 1} df \quad (1)$$

Comme pour chaque fréquence e est inférieur ou égal à 1, la densité de flux d'énergie spectrale pour un corps qui n'est pas noir est, pour tout f , inférieure ou égale à celle qui est donnée par la formule de Planck. Un exemple d'un tel spectre est celui de la lumière de flammes colorées : la lumière bleuâtre d'une flamme de méthane, ou la lumière jaune d'une flamme d'hydrogène dans laquelle on jette du sel.

Le fait que le spectre de corps rayonnants peut être décrit par la thermodynamique ne signifie pas que le mécanisme d'émission à l'échelle microscopique est différent en principe de celui d'une lampe à décharge. Chaque photon qui quitte un corps incandescent est généré lors d'une transition : pour les photons de lumière visible une transition électronique, pour les photons d'infrarouge à grande longueur d'onde, une transition de vibration ou de rotation. Comme souvent dans un solide, des transitions de toutes énergies sont possibles, le cas particulier de l'émetteur de Planck est souvent réalisé. (Cependant, tous les éléments macroscopiques de matière n'émettent pas de la lumière avec un spectre de Planck. Une belle expérience qui le montre consiste à chauffer avec un bec Bunsen deux petits morceaux de matériaux différents l'un à côté de l'autre ; par exemple, un morceau de fer d'un côté et un morceau de quartz ou de saphir ou un caillou blanc de l'autre. Tandis que le morceau de fer rougeoie brillamment, le quartz, saphir ou caillou n'émet aucune lumière visible.)

Le Soleil représente un émetteur thermique particulièrement intéressant. Nous savons qu'il est constitué presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium. On devrait donc s'attendre à ce que son spectre soit un spectre de raies semblable à celui d'une lampe à décharge hydrogène-hélium (qui serait cependant excitée de façon thermique et non électrique). D'autre part, nous savons que la lumière du Soleil a un spectre continu, très proche d'un spectre de Planck.

Comment réconcilier ces deux affirmations ? L'explication vient du facteur $e(f) = a(f)$ dans l'équation (1). Ce facteur est presque exactement égal à zéro à toutes les fréquences pour de l'hydrogène excité thermiquement en laboratoire. A l'exception de quelques fréquences dans l'ultraviolet, le gaz est complètement transparent. Le spectre d'émission de la lampe diffère donc fortement d'un spectre de Planck. Cependant, l'absorbance et donc l'émissivité du corps augmente quand le corps devient plus épais. Quand la lumière pénètre dans un corps et quand son trajet y est suffisamment long, elle trouvera éventuellement une transition convenable. La longueur du trajet correspondante dépend bien sûr de la fréquence de la lumière. Dans le Soleil elle est au pire de quelques centaines de kilomètres. C'est beaucoup comparé à la taille d'une lampe à décharge, mais très peu comparé au rayon du Soleil. Une couche de matière solaire d'une épaisseur de 10 cm (prise dans la région de la photosphère) est complètement transparente : elle n'absorbe pratiquement rien et ainsi n'émet rien (dans la direction perpendiculaire à la couche). Quand l'épaisseur de la couche augmente, l'absorption, et donc l'émission, augmente aussi. Le spectre est maintenant semblable à celui d'une lampe à décharge [1]. Quand l'épaisseur de la couche de gaz augmente encore, il y a de plus en plus d'émission dans la région entre les raies du spectre. Une couche épaisse de 1000 km absorbe complètement toute lumière, et ainsi émet comme un corps noir à la température de 6000 K.

Mais quelles sont les transitions responsables de ces absorptions et émissions ? Même si nous avons eu un mélange pur hydrogène-hélium et si nous avons négligé l'ionisation (faible), nous aurions eu une absorption totale dans le domaine visible quand la couche a atteint une épaisseur de plusieurs centaines de kilomètres. Cette absorption est due à la largeur des raies du spectre. Mais il y a des mécanismes d'absorption en plus : le gaz hydrogène-hélium est faiblement ionisé et les électrons libres absorbent la lumière. De plus, la matière du Soleil contient aussi tous les autres éléments, bien qu'à faible concentration, et l'absorption par ces éléments se trouve en partie dans le domaine visible.

Puisque nous savons que nous pouvons considérer le trajet de la lumière dans le Soleil comme arbitrairement long, nous n'avons pas besoin de nous inquiéter de savoir quel est le mécanisme dominant d'absorption. Ceci est semblable à une expérience de boîte noire consistant en une boîte dans laquelle un petit trou a été percé. Le trou est noir, que les parois intérieures réfléchissent ou diffusent, quelles soient noires, blanches, jaunes ou bleues. Le mécanisme d'absorption n'a aucune incidence sur la noirceur du trou.

[1] *M. Vollmer* : Hot Gases : The transition from line spectra to thermal radiation (Gaz chauds : la transition des raies de spectre vers le rayonnement thermique). Am. J. Phys. **73**, (2005), p.215.

5

Mécanique

5.1 Vitesse instantanée et vitesse moyenne

Sujet :

Dans un cours de physique j'ai trouvé les énoncés suivants mis en avant :

“Par vitesse v d'un mouvement uniforme nous entendons le quotient constant d'un déplacement arbitraire Δs par le temps Δt nécessaire pour ce déplacement : $v = \Delta s / \Delta t$.”

“Pour un mouvement uniforme avec des valeurs initiales $t = 0$ et $s = 0$ en plus de $v = \Delta s / \Delta t$ nous avons : $v = s / t$.”

“En réalité nous trouvons que la vitesse instantanée est approximativement égale à la vitesse moyenne dans un intervalle de temps qui est aussi petit que possible.”

Et dans un autre manuel, tout autant mis en avant :

“Définition : si pour un mouvement rectiligne d'un corps le déplacement s et le temps t sont proportionnels l'un à l'autre, le quotient constant $s/t = v$ est appelé la vitesse du corps.”

“Définition : si dans une partie d'un mouvement rectiligne tous les quotients $\Delta s / \Delta t$ ont la même valeur, alors $\Delta s / \Delta t = v$ est la vitesse dans cette partie.”

“Si Δs et Δt sont des intervalles du déplacement et du temps d'un mouvement arbitraire, correspondant l'un à l'autre, alors

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

est la vitesse moyenne de ce mouvement pour le déplacement Δs ou l'intervalle de temps Δt respectivement.”

“La vitesse instantanée au temps t_0 est obtenue approximativement en prenant la vitesse d'intervalle sur un intervalle de temps qui est aussi petit que possible et qui contient t_0 .”

Des propositions similaires sont trouvées pour l'accélération.

De tels énoncés ne sont pas propres aux ouvrages dont ils ont été extraits. Ils peuvent être trouvés dans bien d'autres manuels de physique, qu'ils soient récents avec une présentation moderne ou qu'ils datent de cent ans.

Défaut :

Le concept de vitesse est introduit avec une méticulosité inhabituelle. Plusieurs questions peuvent alors venir à l'esprit.

1. Une telle rigueur ne peut être maintenue par la suite. Elle est à comparer avec le flou de l'introduction des concepts de force, de chaleur ou de l'intensité du courant électrique.

2. Juste au commencement du cours de physique, une telle formalisation a un effet intimidant sur les étudiants.

3. La distance n'est pas grande entre une pensée rigoureuse et la pédanterie. On peut se demander si dans le cas présent la limite de la pédanterie n'a pas été franchie.

4. Il est énoncé que la vitesse est *définie* par $\Delta s / \Delta t$. Il n'est pas dit que $v = \Delta s / \Delta t$ est la relation entre v , s et t . Voulons-nous dire aux étudiants que le concept de vitesse qu'ils avaient auparavant n'est pas la vitesse au sens de la physique ? Nous ferions mieux de ne pas présenter un détail mathématiquement embelli comme une nouvelle connaissance. A ce propos : si on insiste pour *définir* la vitesse, cela peut être fait encore d'une autre manière.¹

5. Ce qui est proposé pour comprendre la vitesse n'est pas vraiment pratique. Le détour mène à deux ou trois vitesses particulières : la vitesse instantanée, la vitesse d'intervalle et la vitesse moyenne. Si nous procédions de manière similaire avec d'autres grandeurs physiques, nous n'irions pas très loin. Voici ce qui nous devrions affirmer en introduisant d'autres grandeurs : “En réalité nous trouvons que l'intensité instantanée du courant électrique est approximativement égale à l'intensité moyenne dans un intervalle de temps qui est aussi petit que possible.” Ou bien : “La masse volumique locale est approximativement égale à la masse volumique moyenne dans une région de l'espace qui est aussi petite que possible.”

Origine :

Probablement un legs des débuts de la physique en tant que science. Dans des manuels du 18^{ème} siècle on rencontre une méticulosité similaire aussi dans d'autres contextes, pour lesquels nous ne voyons de nos jours aucun problème.

Remède :

Un désarmement peut être atteint de plusieurs façons. Il n'est pas nécessaire d'expliquer ce qui est entendu par vitesse et par vitesse constante. L'équation $v = s/t$ décrit la relation entre la vitesse, la distance parcourue et le temps qui est nécessaire dans le cas d'une vitesse constante. Si elle n'est pas constante, nous procédons de la même façon que pour d'autres grandeurs physiques dont les valeurs changent avec le temps. La vitesse est mesurée avec le tachymètre.

¹ Nous esquissons deux autres procédures pour définir la vitesse. Toutefois, nous ne recommandons pas d'utiliser ces définitions à l'école.

1. La vitesse peut être définie au moyen de la relation :

$dE = v dp$, c'est-à-dire la variation élémentaire d'énergie par la variation élémentaire de quantité de mouvement. Cela est analogue à la définition de la différence de potentiel électrique (la variation élémentaire d'énergie par la variation élémentaire de la charge électrique) ou à celle de la température absolue (la variation élémentaire d'énergie par la variation élémentaire d'entropie).

2. La vitesse peut être définie de manière opérationnelle. Au moyen d'un tachymètre qui n'a pas besoin d'être calibré, nous pouvons assurer qu'une vitesse est constante au cours du temps. Ainsi nous pouvons définir une unité v_0 de la vitesse. Alors, des multiples de cette unité peuvent être facilement construits. Un corps A est mu avec une vitesse v_0 relativement à un corps B, qui pour sa part se meut à la vitesse v_0 relativement à la terre. Ainsi A a la vitesse $2 v_0$ relativement à la terre.

Sujet :

Dans le contexte de la cinématique, il est commun d'introduire la grandeur physique "accélération". Nous distinguons entre accélération instantanée et accélération moyenne, accélération tangentielle, radiale et normale, accélération angulaire, accélération centrifuge, centripète et de Coriolis. Les étudiants apprennent également qu'un mouvement circulaire uniforme est un mouvement accéléré.

Défaut :

1. Les termes techniques sont utiles, parce qu'avec eux un énoncé scientifique peut être formulé de manière succincte. Souvent on peut mettre en un mot ce qui demanderait autrement une phrase entière. Ainsi, un énoncé peut devenir plus clair en employant un terme technique bien défini. Toutefois, il y a un nombre optimum ou une concentration optimale pour les termes techniques. Quand il y en a trop, il se peut que le caractère compréhensible soit dégradé à nouveau. Un énoncé peut devenir plus court, mais puisque chaque terme technique nécessite d'être défini, l'ensemble du texte peut ne pas être plus succinct. Le caractère compréhensible peut se dégrader, puisque le lecteur doit connaître les définitions. Un exemple est la prolifération de noms distincts pour une et une seule grandeur physique, l'accélération.

2. Le mouvement d'un point peut être décrit par plusieurs fonctions différentes du temps. Les plus communément utilisées sont la position $\mathbf{s}(t)$, la vitesse $\mathbf{v}(t) = d\mathbf{s}/dt$, et l'accélération $\mathbf{a}(t) = d^2\mathbf{s}/dt^2$. On peut même introduire des dérivées temporelles d'ordre plus élevé. La dérivée troisième de la position par rapport au temps est parfois appelée l'à coup (« jerk » en américain). Le mot exprime clairement la signification du concept. Cependant, si l'intention n'est pas de chambouler la cinématique, on peut se demander lesquelles de ces fonctions sont vraiment nécessaires.

Considérons l'un des types de mouvement les plus importants : un mouvement avec une accélération uniforme. Une description au moyen de la fonction $\mathbf{s}(t)$ est, au moins pour les élèves de lycée, plutôt compliquée, puisque \mathbf{s} est une fonction quadratique du temps. $\mathbf{v}(t)$ est plus simple, puisqu'elle est linéaire en temps. Encore plus simple mathématiquement est l'accélération, puisque $\mathbf{a}(t)$ est constante. Mais c'est la dérivée troisième par rapport au temps qui présente la plus grande simplicité : elle est nulle pour tout t . On peut apprendre beaucoup en comparant ces quatre fonctions. Si, cependant, on est seulement intéressé par une description succincte du mouvement, on essaiera de limiter la discussion aux fonctions qui donnent le meilleur accès intuitif au phénomène. Selon nous, ce sont $\mathbf{s}(t)$ et $\mathbf{v}(t)$. Dans notre exemple $\mathbf{v}(t)$ nous dit que la vitesse augmente uniformément avec le temps. Nous croyons que cet énoncé est plus facile à saisir que de dire que l'accélération est constante. Cela devient évident quand on demande à des personnes versées dans la technique de préciser la performance d'une voiture. Ils ne répondent pas que l'accélération maximale de la voiture s'élève à un certain nombre de mètre par seconde carré, mais ils disent que la voiture accélère de 0 à 100 km/h en tant de secondes. Ainsi ils utilisent la vitesse et non l'accélération. Ils expriment l'accélération en termes de vitesse.

On pourrait croire qu'un enseignant de physique ne peut simplement pas faire sans l'accélération, puisque la grandeur apparaît dans la deuxième loi de Newton. En réalité, il n'y a pas d'accélération dans l'œuvre de Newton. Il formule sa deuxième loi avec la variation temporelle de la quantité de mouvement.

3. Le nom accélération pour la grandeur \mathbf{a} est la cause de plusieurs incongruités. J'ai lu récemment dans un article d'un journal de physique : "Les particules chargées émettent des rayonnements qu'elles soient accélérées ou décélérées ou lorsque qu'elles changent la direction de leur mouvement." Il n'y a certainement rien de faux dans cette formulation. Cependant, la phrase suivante est : "Les particules qui se déplacent sur une trajectoire circulaire – même quand leur vitesse est constante – sont accélérées et émettent du rayonnement...". Alors que, dans la première phrase, l'auteur fait la distinction entre accélérer, décélérer et changer de direction, dans la phrase suivante, chaque particule, sans plus de cérémonies, exécute un mouvement accéléré dès que $\mathbf{a}(t)$ est différent de zéro.

Nous connaissons ce problème également ailleurs. Dans le langage courant, nous avons souvent des expressions différentes pour les valeurs positive et négative d'une grandeur physique : accélération et décélération, pression et tension, chaleur et froid... La physique, toutefois, n'a besoin que d'un seul nom pour une grandeur.

Origine :

Contrairement à une croyance commune, Newton n'a pas utilisé une grandeur "accélération". Selon sa formulation de la seconde loi, la variation du "mouvement" (*motus*) d'un corps est proportionnelle à la force qui est en train d'agir sur lui. Il employa le mot *motus* comme une abréviation pour *quantitas motus*, la quantité de mouvement. Huygens également n'utilisa pas une grandeur "accélération" [1]. Dans une publication de 1754, Euler utilisa le quotient différentiel d^2s/dt^2 , mais il ne lui donna ni un nom particulier ni un symbole propre [2]. La citation la plus ancienne de l'accélération en tant que grandeur physique que nous ayons trouvée se trouve dans l'ouvrage *Opera omnia* de Johann Bernoulli datant de 1742 [3]. Apparemment elle fut introduite au cours de la mathématisation croissante de la mécanique qui survint après Newton.

Remède :

Nous n'introduisons pas une grandeur *accélération*. Pour la cinématique, nous nous limitons à décrire la position et la vitesse comme fonctions du temps. En dynamique également, nous n'avons pas besoin d'accélération. Nous formulons la seconde loi de Newton comme $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$.

[1] E. J. Dijkstra: Die Mechanisierung des Weltbildes (La mécanisation de l'image du monde). – Springer-Verlag, Berlin, 1956. – p. 528.

[2] L. Euler: Vollständige Theorie der Maschinen, die durch Reaktion des Wassers in Bewegung versetzt werden (Théorie complète des machines, qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau). – Ostwald's Klassiker der Exakten Naturwissenschaften, Nr. 182. – Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1911.

[3] S. Sambursky: Der Weg der Physik (Le chemin de la physique). – Artemis Verlag, Zürich, 1975. – p. 428.

5.3 Actions à distance

Sujet :

Les énoncés comme “la lune est attirée par la terre”, “le soleil exerce une force sur la terre”, “les pôles semblables se repoussent, des pôles contraires s’attirent l’un l’autre”.

Défaut :

Ces énoncés suggèrent qu’il y a une influence ou une action d’un corps A sur un autre corps B sans la participation ou la médiation d’un troisième système qui relie A et B. Depuis l’époque de l’introduction en physique de l’électrodynamique moderne par Faraday et Maxwell, c’est-à-dire de la première théorie des champs, les scientifiques sont convaincus que de telles actions n’existent pas et qu’une telle description est inappropriée.

Origine :

Le langage des actions à distance qui peut être trouvé dans tous les cours de physique date du temps de Newton. En effet, avant l’arrivée de la théorie de Faraday et Maxwell, il n’y avait pas d’autre choix que d’imaginer les forces électriques, magnétiques et de gravitation comme des actions à distance. Newton lui-même considérait les actions à distance comme un défaut de sa théorie.

Remède :

Dès que des forces de gravitation, électriques et magnétiques entre deux corps sont examinées, le champ correspondant est introduit en tant que troisième participant. Le champ est décrit comme un système qui est aussi réel que les deux corps. L’attraction ou la répulsion électrique par exemple sont décrites de la façon suivante : deux corps de même charge sont repoussés l’un par l’autre par le champ, des corps de charge opposée sont attirés l’un vers l’autre par le champ.

5.4 Les lois de Newton

Sujet :

1. Tout corps persiste dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins qu'il ne soit forcé de changer son état par l'action d'une force externe.
2. La variation de la quantité de mouvement d'un corps est parallèle et proportionnelle à la force qui agit sur lui.
3. Les forces de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens opposé.

Défaut :

Chacune de ces trois lois est un cas particulier d'un énoncé qui peut être formulé d'une façon bien plus simple : la quantité de mouvement ne peut être créée et ne peut être détruite. Cela apparaît facilement en considérant que la grandeur "force" n'est rien d'autre que l'intensité du courant d'un courant de quantité de mouvement. Ainsi, les lois de Newton peuvent aussi être formulées de la manière suivante :

1. La quantité de mouvement d'un corps ne change pas tant qu'aucune quantité de mouvement n'entre ou ne quitte ce corps.
2. La variation temporelle de la quantité de mouvement d'un corps est égale au courant de quantité de mouvement entrant ou quittant ce corps.
3. Quand un courant de quantité de mouvement s'écoule d'un corps A vers un corps B, le courant de quantité de mouvement quittant A est égal au courant de quantité de mouvement entrant dans B.

Ces corollaires de la loi de conservation de la quantité de mouvement sont si simples qu'on leur attribuerait à peine le statut de théorèmes ou de lois en tant que tels. Pour s'en convaincre, il suffit de formuler les énoncés correspondants pour une autre grandeur conservée, ou encore plus simplement pour une quantité d'eau : "la quantité d'eau dans un récipient ne change pas tant qu'aucune eau ne rentre ou ne sort du récipient..."

Origine :

Tout le monde connaît l'origine des lois de Newton. Toutefois, une analyse approfondie du travail de Newton est nécessaire pour comprendre pourquoi dans le système newtonien les trois lois apparaissent comme indépendantes les unes des autres. Elles sont les composantes d'un système compliqué d'observations et de définitions. Bien sûr, Newton n'a pas placé la conservation de la quantité de mouvement au commencement de ses réflexions.

Remède :

Introduisez la quantité de mouvement au tout début des classes de mécanique comme une grandeur en elle-même, comme une mesure quantitative du mouvement, ou en termes plus courant, de l' "élan" ou de l' "impulsion". Quand la quantité de mouvement d'un corps change, ne dites pas, "une force agit sur lui", mais "de la quantité de mouvement s'écoule vers lui (ou hors de lui)". Cette façon de parler est inhabituelle pour un professeur de physique expérimenté. Pour un débutant, cependant, elle est plus facile, puisqu'elle évite quelques unes des complications que comportent la discussion des lois de Newton, en particulier la troisième loi.

5.5 Equilibre statique et troisième loi de Newton

Sujet :

Les forces agissent sur les corps. Si un corps P, sur lequel un autre corps A exerce une force F_{AP} , n'est pas accéléré, alors il doit exister au moins un autre corps B qui exerce une force F_{BP} sur P de telle sorte que la force résultante sur P soit nulle. P est dans un état d'équilibre statique. Maintenant, lorsque A exerce une force F_{AP} sur P, conformément à la troisième loi de Newton, P doit exercer une force F_{PA} sur A. De la même manière, P doit aussi exercer une force F_{PB} sur B. Chacune de ces quatre forces F_{AP} , F_{BP} , F_{PA} , et F_{PB} , a la même valeur absolue, alors que leurs directions sont deux à deux opposées :

$$F_{AP} = -F_{BP}, \quad F_{AP} = -F_{PA}, \quad F_{BP} = -F_{PB}, \quad F_{PB} = -F_{PA}.$$

Ceci est la description de la situation dans laquelle P est au repos. C'est, outre le cas où toutes les forces sont nulles, la situation statique la plus simple que nous pouvons imaginer. Qui veut comprendre ce qu'est une force, doit être capable conceptuellement de faire la distinction entre ces quatre forces.

Défaut :

Le traitement du problème est si compliqué, qu'un élève moyen pourra à peine le comprendre. En réalité, des étudiants de licence peinent à distinguer ces forces. Malgré cela, l'école fait l'effort désespéré d'introduire le concept de force de Newton au début de l'école secondaire.

Origine :

Le concept de force que nous employons encore aujourd'hui fut conçu par Newton. Il fut introduit à une époque où les interactions mécaniques ne pouvaient être décrites que par des actions à distance. Le concept de champ ne fut introduit en physique que plus de cent ans plus tard. Selon Newton une force est attribuée à deux corps : le corps qui exerce la force et le corps sur lequel la force est exercée. Dans l'exemple que nous avons mentionné, il y a trois corps, ce qui conduit à six forces. Quatre d'entre elles sont en relation avec le corps P, c'est-à-dire qu'elles sont exercées soit par le corps P soit sur le corps P.

Une simplification conceptuelle aurait pu advenir dans la moitié du 19^{ème} siècle lorsque Faraday et Maxwell introduisirent le concept de champ. En réalité, cela fut fait seulement après qu'il fut devenu clair que la quantité de mouvement devait être considérée comme une grandeur en elle-même, au lieu d'une abréviation pour le produit $m \cdot v$. En effet, en 1908, c'est-à-dire trois ans après la publication de la théorie de la relativité restreinte, Max Planck [1] a montré qu'une force n'est rien d'autre que l'intensité d'un courant de quantité de mouvement. Ainsi, la valeur d'une force ne se référerait pas à deux corps, mais à une section transversale du système conduisant la quantité de mouvement (de la même façon que d'autres courants font intervenir des sections transversales).

Si cette idée est appliquée à la situation décrite ci-dessus, le méli-mélo des forces s'en va simplement. Chacune de ces quatre forces se retrouve être l'intensité du courant de quantité de mouvement d'un même courant considéré sur quatre sections transversales différentes : F_{PA} est l'intensité du courant qui s'écoule de A vers P en quittant A, $-F_{AP}$ est l'intensité de ce même courant entrant dans P, F_{BP} est l'intensité de ce courant quittant P à nouveau, et $-F_{PB}$ finalement est son intensité en entrant dans B. Puisque nulle part, ni à l'intérieur des corps, ni entre eux, la quantité de mouvement ne s'accumule, la valeur absolue de toutes ces intensités est la même. Le signe algébrique n'est pas toujours le même parce que les surfaces auxquelles se réfère le courant ne sont pas toujours orientées dans la même direction.

Remède :

La difficulté disparaît quand, au lieu de forces, les courants de quantité de mouvement sont utilisés. Alors la description verbale de la situation est la suivante : un courant de quantité de mouvement s'écoule de A vers P et de P vers B. Puisqu'aucune quantité de mouvement ne peut s'accumuler nulle part, l'intensité du courant doit être la même dans toute section de passage du courant.

[1] M. Planck: Phys. Z. 9, 1908, p. 828.

5.6 Espace absolu

Sujet :

“L’espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure par sa nature toujours similaire et immobile.” (Newton [1])

“Il est à peine nécessaire de faire remarquer que, dans ces considérations, Newton est encore une fois en contradiction avec son dessein de n’étudier que des faits. Personne ne peut rien dire de l’espace absolu et du mouvement absolu, qui sont des notions purement abstraites, qui ne peuvent en rien être le résultat de l’expérience.” (Mach [2])

“Par conséquent il était nécessaire de démythifier les mots “temps absolu” et “espace absolu” comme des préjugés magiques et non prouvés de l’époque prérelativiste.” [3]

Défaut :

Les phénomènes gravitationnels peuvent être divisés en deux classes.

Ceux de la première classe ont à voir avec l’interaction gravitationnelle de corps qui sont au repos les uns par rapport aux autres. Dans la physique classique, ils sont décrits par la loi de la gravitation de Newton et ils sont similaires aux phénomènes de l’électrostatique. Nous devrions les appeler phénomènes gravitostatiques. Un corps ressent cette composante du champ gravitationnel qui est décrite par le champ vectoriel de l’intensité du champ de gravitation.

Les phénomènes de la seconde classe sont observés lorsqu’un corps est accéléré. Ils sont décrits aujourd’hui (de même que les phénomènes statiques) par le tenseur métrique de la théorie générale de la relativité. Un corps “ressent” lorsqu’il est accéléré relativement à d’autres corps. La dépendance en distance est différente de celle de l’interaction statique : des corps à grande distance ont un plus grand poids que dans le cas des forces statiques [4]. Pour cette raison des forces d’accélération apparaissent seulement par rapport aux masses immenses qui sont réparties dans l’univers, alors que l’influence de la “petite” masse dans notre voisinage est si infime qu’elle ne peut être encore détectée. Ces forces se dévoileraient par l’effet Lense-Thirring (aussi appelé effet gravitomagnétique). Les physiciens sont convaincus que cet effet existe.

Comment Newton traita-t-il ces deux classes de forces ou d’effets ? Il décrit le premier, l’effet gravitostatique, par sa loi de gravitation bien connue. Il considérait comme un défaut que sa théorie suggéra l’idée d’une action-à-distance, et il exprima ce point de vue de manière explicite. Toutefois, son embarras ne le conduisit pas jusqu’à mentionner dans ses *Principia* un medium qui pourrait être rendu responsable de la transmission de la quantité de mouvement (la *quantitas motus*) entre les corps célestes. Nous connaissons tous son “*hypotheses non fingo*”. On pourrait croire que, de son point de vue, il aurait été conséquent de voir la cause de la seconde classe de forces, les forces inertielles, dans les étoiles, comme cela fut d’ailleurs proposée par George Berkeley, quelque peu plus jeune que lui. Cependant, Newton préféra ici une autre interprétation, qui en réalité est l’idée la plus sensée. Les forces d’accélération ne tirent pas leur origine des corps lointains, mais de l’“espace absolu”, c’est-à-dire de quelque chose qui existe au même endroit que le corps considéré. Il utilise ainsi une description locale. A certain droit on peut considérer cette idée comme un précurseur de ce qui sera plus tard appelé un champ.

De ce point de vue on pourrait dire que la critique de Mach n’est pas adéquate, et qu’une condamnation irréfléchie de l’espace absolu – voir notre troisième citation– n’aide pas pour une appréciation détachée des idées de Newton.

Origine :

Elle a déjà été mentionnée dans la section précédente. Une des raisons pour lesquelles les phénomènes gravitationnels statiques et dynamiques sont traités de façon tellement différente pourrait être qu’une théorie des actions-à-distance pour les forces inertielles n’était pas encore prête, même si l’idée de base de Berkeley existait déjà.

Remède :

Un peu plus de respect pour l’espace absolu de Newton. L’idée n’est pas aussi mauvaise que beaucoup voudraient nous le faire croire.

[1] Wikipedia (en), mot-clé “Absolute time and space”

[2] E. Mach : Die Mechanik in ihrer Entwicklung, Leipzig: Brockhaus, 1897, p. 223, (La mécanique, exposé historique et critique de son développement, traduit par Emile Bertrand, Editeur A. Hermann, Paris, 1904, p. 222).

[3] Dorn-Bader, Physik (Physique), Gymnasium Gesamtband, Hannover: Schroedel, 2000, p. 405.

[4] D. W. Sciama: The Physical Foundations of General Relativity (Les fondations physiques de la relativité générale), New York: Doubleday & Company, 1969, p. 22-33.

5.7 La quantité de mouvement comme le produit de m et v

Sujet :

Habituellement la quantité de mouvement d'un corps est définie comme le produit de sa masse et de sa vitesse :

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}. \quad (1)$$

Ainsi, \mathbf{p} n'est rien d'autre qu'une abréviation pour le produit de m et \mathbf{v} . La quantité de mouvement semble être un exemple typique d'une "grandeur dérivée". Dans certains livres la quantité de mouvement est explicitement appelée une grandeur auxiliaire [1].

Défaut :

Il y a plusieurs arguments pour introduire la quantité de mouvement non comme une grandeur dérivée mais comme une grandeur de base en elle-même.

1) La quantité de mouvement est une grandeur conservée. Cette propriété rend facile la mesure de la quantité de mouvement d'un corps en mouvement sans avoir recours à l'équation (1) [2,3]. Puisque la masse (gravitationnelle) et la vitesse peuvent être mesurées indépendamment, l'équation (1) peut être vérifiée expérimentalement.

2) L'équation (1) ne vaut pas pour tout système. La quantité de mouvement du champ électromagnétique ne peut pas être calculée avec cette équation. La densité de quantité de mouvement du champ électromagnétique peut être calculée à partir de l'intensité du champ électrique et du champ magnétique :

$$\rho_p = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}}{c^2}$$

3) Il y a une analogie de grande portée entre la mécanique et l'électricité : une correspondance entre des grandeurs physiques et des relations entre ces grandeurs. Par exemple, l'analogie électrique de la grandeur extensive conservée quantité de mouvement est la charge électrique, et l'analogie de la grandeur intensive vitesse est le potentiel électrique. L'analogie de l'équation (1), qui nous dit que pour des vitesses non-relativistes la quantité de mouvement est proportionnelle à la vitesse, est l'équation

$$Q = C \cdot U, \quad (2)$$

qui nous dit que, pour un condensateur à plaques fixes, la charge est proportionnelle à la différence de potentiel entre les plaques. Une comparaison des équations (1) et (2) montre que la masse peut être interprétée comme une "capacité de quantité de mouvement". Plus grande est la masse d'un corps, plus il contient de quantité de mouvement à une vitesse donnée.

Cette comparaison montre qu'il n'est pas pertinent de définir la quantité de mouvement par l'équation (1). C'est comme si on définissait la charge électrique par l'équation (2), au lieu de l'introduire comme une grandeur en elle-même, qui peut être mesurée sans avoir recours à U et C .

4) Introduire la quantité de mouvement directement en tant que grandeur indépendante est également suggéré par le fait que la quantité de mouvement (ou plus exactement la densité de quantité de mouvement) est une composante du tenseur énergie-impulsion. Cela signifie que pour le champ gravitationnel la quantité de mouvement joue un rôle similaire à la charge électrique pour le champ électromagnétique. Ensemble avec la densité d'énergie, la densité de courant d'énergie et la densité de courant de quantité de mouvement, elle constitue l'une des sources du champ gravitationnel. Les sources d'un champ jouent une part importante dans les interactions fondamentales, et il semble inadéquat de les considérer comme des grandeurs dérivées.

Origine :

Contrairement à la charge électrique, la grandeur physique quantité de mouvement acquit son existence par un long processus historique. Au 17ème siècle la formulation des lois gouvernant les collisions fut un objectif affiché des sciences mécaniques. Il était espéré avec raison qu'une grandeur invariante devait jouer un rôle décisif et on essaya d'exprimer cette grandeur comme une combinaison de la masse et de la vitesse.

En 1644 Descartes publia ses Principia philosophiae, dans lesquels il énonça la conservation du produit de la masse et de la vitesse, la *quantitas motus*, la quantité de mouvement. Quelques dizaines d'années plus tard, Leibniz crut prouver que le produit de la masse et du carré de la vitesse était l'invariant "correct" pour un processus de collision. En conséquence de quoi éclata la longue et célèbre dispute sur ce qui est la vraie "mesure de force", à laquelle mit fin Daniel Bernoulli seulement en 1726, et pour laquelle il n'y eut ni vainqueurs ni vaincus. Ce qu'il advint fut l'émergence de deux grandeurs, l'une étant ce qu'on appelle maintenant la quantité de mouvement et l'autre l'énergie cinétique.

Naturellement, le résultat fut une quantité de mouvement qui était *définie* par l'équation (1). Seulement bien plus tard il fut découvert que, si on devait construire la quantité de mouvement comme une grandeur conservée, alors la relation (1) devait être abandonnée. La théorie de la relativité restreinte nous dit que la nouvelle quantité de mouvement conservée n'est pas proportionnelle à la vitesse. L'équation (1) fut sauvée en introduisant une masse dépendante de la vitesse.

Remède :

Introduire la quantité de mouvement comme une grandeur de plein droit, avec sa propre procédure de mesure, c'est-à-dire de la même façon à laquelle nous sommes habitués pour introduire la charge électrique. Alors l'équation (1) prend le rôle d'une définition de la masse inertielle, comme le coefficient de proportionnalité entre la quantité de mouvement et la vitesse.

[1] R. W. Pohl: *Mechanik, Akustik und Wärmelehre (Mécanique, acoustique et thermique)*.– Springer-Verlag, Berlin, 1969.– p. 45

[2] F. Herrmann: The Karlsruhe Physics Course, The Teacher's Manual (le cours de physique de Karlsruhe, manuel du professeur), p. 23,

http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/english/KPK_Teacher.pdf

[3] F. Herrmann, M. Schubart: Measuring momentum without the use of $p = mv$ in a demonstration experiment (Mesurer la quantité de mouvement sans utiliser $p=mv$ dans une expérience de démonstration), Am. J. Phys. **57** (1989), p. 858

5.8 La quantité de mouvement sous-estimée

Sujet :

“Deuxième loi : l'accélération \mathbf{a} d'un corps est directement proportionnelle à la force \mathbf{F} agissant sur le corps et inversement proportionnelle à la masse m du corps, c'est-à-dire :

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} .”$$

“La valeur de la force centripète sur un objet de masse m se déplaçant à la vitesse tangentielle v le long de la trajectoire de rayon de courbure r est :

$$F = mac = mv^2/r .”$$

Défaut :

Clairement il n'y a aucune objection à la validité et à l'utilité de l'équation :

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} . \quad (1)$$

Nous croyons, toutefois, qu'il n'est pas pertinent de l'appeler “deuxième loi”, ou “loi fondamentale du mouvement”, puisqu'elle englobe deux autres lois qui devraient être clairement séparées l'une de l'autre. La première est en effet la deuxième loi de Newton :

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt . \quad (2)$$

Elle nous dit que la quantité de mouvement peut changer uniquement quand un courant de quantité de mouvement entre ou quitte un système (en d'autres termes : quand “une force agit sur le système”). Il énonce ainsi que la quantité de mouvement est une grandeur conservée.

Pour obtenir l'équation (1) nous avons de plus besoin de l'équation

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v} , \quad (3)$$

ou plus exactement de sa dérivée en temps

$$d\mathbf{p}/dt = m d\mathbf{v}/dt .$$

La nature de l'équation (3) est différente de celle de l'équation (2). Elle est ce que dans un autre contexte on appellerait une équation constitutive. De telles équations sont valables pour certains systèmes dans certaines circonstances. Ainsi, l'équation

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$$

est valable seulement tant que la vitesse est petite comparée à c , et elle n'est pas valable pour le champ électromagnétique, puisque ce système n'est pas décrit par les variables m et \mathbf{v} .

Afin de rendre notre argumentation plus claire, considérons les lois correspondantes de l'électricité. L'analogie suivante entre les lois de la mécanique et celle de l'électricité est bien connue :

Mécanique	Electricité
$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$	$I = dQ/dt$
$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$	$Q = C \cdot U$
$\mathbf{F} = m \cdot d\mathbf{v}/dt = m \cdot \mathbf{a}$	$I = C \cdot dU/dt$

Il est évident qu'à l'équation

$$I = C \cdot dU/dt$$

on ne donnerait pas un nom comme “loi fondamentale de l'électricité”.

En sautant l'équation (2) et en déclarant que l'équation (1) est la loi fondamentale, ou bien aussi la deuxième loi, alors il n'y a aucun besoin de mentionner la quantité de mouvement.

Apparemment, cela est considéré comme un avantage. En effet, dans le déroulement habituel de l'enseignement en mécanique, la grandeur force, c'est-à-dire le courant de quantité de mouvement, est largement discutée au commencement, alors que la quantité de mouvement doit attendre que l'on aborde les phénomènes de collision.

La tendance à contourner la quantité de mouvement peut également être observée sur d'autres exemples, voir notre seconde citation. Ici encore, le résultat intermédiaire est manquant. La première étape pour déterminer la force centripète est de calculer le taux de variation temporelle de la quantité de mouvement du corps en rotation :

$$d\mathbf{p}/dt = mv^2/r .$$

Le terme de droite de l'équation contient seulement des grandeurs qui caractérisent le corps en rotation. C'est seulement en utilisant la seconde loi de Newton que nous obtenons :

$$F_c = mv^2/r .$$

Origine :

Le mépris de la quantité de mouvement et sa réduction à un simple invariant dans les processus de collision n'est pas un vestige des premiers temps de la mécanique. Au contraire, déjà avant l'époque de Newton et à son époque la quantité de mouvement était la grandeur au bilan de laquelle on s'intéressait. Son nom latin original était *quantitas motus*, c.à.d *quantité de mouvement*. La quantité de mouvement gagna en importance dans la physique moderne.

La physique relativiste nous dit que la densité de quantité de mouvement est une composante du tenseur énergie-impulsion, et ainsi appartient aux sources du champ gravitationnel. Par conséquent, l'apparent mépris de la quantité de mouvement en mécanique élémentaire semble incompréhensible.

Nous croyons qu'il faut en blâmer Leibniz. Dans la célèbre controverse à propos de la “vraie mesure de la force” entre Leibniz et les Cartésiens la question était laquelle des deux expressions $m \cdot v$ et $m \cdot v^2$ est la mesure “correcte” de la quantité de mouvement. Aujourd'hui nous savons que la physique a besoin des deux expressions. La première est ce que nous appelons aujourd'hui quantité de mouvement et la seconde (mis à part un facteur 2) est l'énergie cinétique. Les deux correspondent à ce qu'à l'époque de Leibniz était appelée force par certains, et qu'aujourd'hui nous appellerions impulsion ou élan (dans le sens courant du terme). Maintenant, dans la tradition d'enseignement de la mécanique, ce concept quotidien d'impulsion est principalement associé à la grandeur physique énergie cinétique, c'est-à-dire essentiellement avec le $m \cdot v^2$ de Leibniz. La raison simple en est que nous introduisons généralement l'énergie cinétique avant la quantité de mouvement. De la sorte, lorsque la quantité de mouvement est introduite, la place pour une grandeur physique qui mesure ce que nous associons intuitivement avec le concept d'impulsion est déjà occupée. Comme résultat, la plupart des étudiants considèrent la quantité de mouvement comme la grandeur la plus abstraite. Ils apprennent que la quantité de mouvement mesure quelque chose plutôt similaire à l'énergie cinétique sans pour autant être la même grandeur. Ainsi la quantité de mouvement est perçue comme une grandeur plus difficile et son rôle est essentiellement réduit à un invariant dans les phénomènes de collision.

Soit dit en passant, à cet égard le destin de la quantité de mouvement est quelque peu similaire à celui de l'entropie.

Initialement cette grandeur était une mesure parfaite de ce qu'en langage courant aurait été appelée chaleur. Après l'introduction de l'énergie et la découverte de sa conservation, le nom et l'image mentale qui étaient associés au mot chaleur furent transférés à la forme différentielle dQ . Il en est résulté que l'entropie fut alors considérée comme une grandeur plutôt “abstraite”.

Remède :

Introduisez la quantité de mouvement comme une grandeur de base au tout début de la mécanique.

Introduisez la comme une mesure de ce qu'en langage courant on appellerait l'impulsion ou l'élan.

Introduisez la seconde loi de Newton comme Newton le fit :

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt .$$

Introduisez la relation $\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$ plus tard, de la même façon que vous commentez la relation $Q = C \cdot U$ après l'introduction de la charge électrique Q .

Pour ce qui est du mouvement circulaire, avant d'introduire la force centripète, montrez que

$$d\mathbf{p}/dt = mv^2/r .$$

5.9 Impulsion

Sujet :

“L’impulsion $\Delta\vec{p}$ d’une force est une grandeur vectorielle qui est définie par

$$\Delta\vec{p} = \int_{t_0}^{t_1} \vec{F} dt .”$$

Défaut :

L’introduction de l’impulsion commence avec l’équation

$$\vec{F} = d\vec{p}/dt .$$

Chacune des trois grandeurs \vec{F} , \vec{p} et t a une signification claire. L’équation est transformée en $d\vec{p} = \vec{F}dt$, et un nom est donné à l’expression du terme de droite. Dans les manuels cela est souvent fait avec force détails et il est suggéré qu’il y a quelque chose à comprendre qui dépasse la deuxième loi de Newton. En particulier, l’étudiant a l’impression qu’une nouvelle grandeur physique a été introduite. En réalité, l’impulsion n’est pas une grandeur physique – au moins dans le sens usuel du mot. Une grandeur physique a une valeur bien définie dans un état donné [1]. Cela, cependant, n’est pas vrai pour l’impulsion.

Que le concept ne soit pas indispensable peut aussi être vu dans le fait que différentes autres “grandeurs” pourraient être construites en utilisant la même recette – ce qui n’est pas fait. En effet, en considérant que chaque force puisse être considérée comme un courant de quantité de mouvement et l’impulsion comme l’intégrale temporelle du courant de quantité de mouvement, on voit que des intégrales équivalentes peuvent être écrites pour tout autre courant, par exemple un courant électrique, un courant de masse ou un courant d’énergie. Ainsi, l’expression

$$\int P dt$$

(où P est le courant d’énergie ou “puissance”) pourrait être introduite comme une nouvelle “grandeur” et un nom particulier pourrait lui être attribué.

Nous ne voulons pas dire que calculer une telle intégrale n’a pas de sens. Nous croyons seulement qu’il n’est pas adéquat de la présenter comme une nouvelle grandeur physique.

En réalité, il est trivial qu’en intégrant une force (un courant de quantité de mouvement) en fonction du temps, il en résulte la variation de quantité de mouvement du corps sur lequel la force agit (vers lequel la quantité de mouvement s’écoule). Cela est trivial parce que la quantité de mouvement est une grandeur extensive ou de type-substance.

En multipliant l’intensité du courant de l’écoulement d’eau par le temps, lorsqu’on remplit la baignoire, on obtient la quantité d’eau qui a coulé dans la baignoire. Pour comprendre cet énoncé, nous n’avons pas besoin du concept d’une “impulsion d’eau”.

Un nom particulier pour l’intégrale temporelle de la force est aussi superflu que les noms travail et chaleur pour les formes différentielles Fds et TdS respectivement. Ce sont deux expressions qui ne représentent aucune grandeur physique au sens usuel.

Origine :

Cette expression fut introduite pour décrire les processus de transfert de quantité de mouvement, qui sont rapides et dont la dépendance particulière en temps est de peu d’importance. Ce point de vue est compréhensible, mais on peut également y répondre sans avoir besoin d’une nouvelle dénomination. Il est suffisant de dire qu’une certaine partie de quantité de mouvement est transférée. Cependant, entre les grandeurs force et quantité de mouvement, la force a toujours été considérée comme la plus fondamentale. La quantité de mouvement était seulement conçue comme une abréviation pour le produit de la masse et de la vitesse. Ainsi il semblait plus naturel de proposer un énoncé à propos de la force plutôt que de la quantité de mouvement.

Remède :

En prenant sérieusement la quantité de mouvement comme une grandeur de plein droit, l’impulsion n’est pas nécessaire. La mécanique ne perd rien en omettant ce concept, au contraire elle gagne en clarté.

[1] G. Falk: Theoretische Physik, II Thermodynamik (Physique théorique, II thermodynamique), Heidelberger Taschenbücher. Springer-Verlag Berlin, 1968, p. 4

5.10 Etat de mouvement

Sujet :

Les étudiants savent quoi répondre lorsqu'ils sont demandé dans un examen quels sont les effets d'une force : une force cause une déformation ou un changement dans l'état de mouvement du corps sur lequel elle agit.

Défaut :

Par "changement de l'état de mouvement" est entendu un changement de la vitesse. Les élèves du lycée connaissent les vecteurs. Ainsi on peut s'attendre à ce qu'ils sachent que la vitesse est une grandeur vectorielle. En disant que l'état de mouvement est changé, nous exprimons vaguement quelque chose qui aurait pu être dit clairement : en précisant la grandeur physique dont la valeur change, comme il est couramment d'usage dans d'autres circonstances. Nous disons que la température augmente lorsqu'on fournit de la chaleur. Nous ne disons pas que l'état thermique change. En fournissant de la charge électrique à un corps, nous disons que le potentiel électrique augmente. Nous ne disons pas que l'état électrique change. En gonflant un pneu nous disons que nous fournissons de l'air au pneu. Nous ne disons pas que nous changeons l'état de compression du pneu.

Origine :

Les termes viennent directement du grand maître. Sa première loi s'écrit :

"Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare."

(Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.)

Là est l' "état de mouvement".

Il est compréhensible que Newton dût s'exprimer de cette façon. Il ne pouvait se référer à la vitesse comme une grandeur vectorielle, puisque le concept de vecteur fut introduit seulement plus de cent ans plus tard..

Remède :

L'expression "état de mouvement" est appropriée dans un sens plus général. La signification de l' "état de mouvement" pourrait inclure toutes les données qui caractérisent le mouvement : vitesse, accélération, rotation... Cependant, pour ce qui concerne les lois de Newton, il est mieux de préciser que le changement est celui de la vitesse.

Sujet :

“Bien que nous puissions déjà avoir une idée intuitive d’une force comme une poussée ou une traction, comme celle exercée par nos muscles... les lois de Newton nous permettent d’affiner notre compréhension des forces.” [1]

“Nous avons tous une compréhension intuitive assez profonde de ce que sont les forces et des effets qu’elles ont sur les objets. Nous sommes constamment en train d’utiliser nos muscles pour exercer des forces : nous soulevons une tasse de café pour la porter à nos lèvres, nous poussons une voiture coincée dans un fossé pour l’en sortir et nous exerçons une force pour arrêter un ballon de basket quand nous l’attrapons.” [2]

“Le concept de force peut tirer son origine de nos sensations musculaires.” [3]

Défaut :

Nous percevons la mise en action de nos muscles comme un effort. Nous ne la percevons pas comme une perception sensorielle spécifique mais comme un acte de volonté. Mais de quelle grandeur physique cet effort peut-il être considéré comme la mesure ? D’un côté une *force* agit aussi longtemps que le muscle est tendu. De l’autre, l’activité musculaire nécessite de l’énergie. De l’ATP est transformé en ADP, que nos muscles déplacent quelque chose (délivrent du travail mécanique) ou non (c’est-à-dire ne produisent que de la chaleur). Ainsi, nos sensations musculaires renvoient à une force (un courant de quantité de mouvement) tout autant qu’à un courant d’énergie, c’est-à-dire à la grandeur physique *puissance*. Comme dans l’enseignement de la physique les concepts force et puissance sont souvent confondus, nous pensons qu’il n’est pas sage de faire appel aux sensations musculaires lorsque l’on introduit le concept de force.

Origine :

Il y a des raisons de suspecter que la sensation musculaire est mise en avant parce qu’on pourrait prendre les muscles comme la cause ou le responsable de la force. Prenons un exemple : qui ou quoi est la cause de la force dans la corde sur la Fig. 1a ? Notre sentiment immédiat peut être que ce devrait être le ressort. Et sur la Fig. 1b ? Ne devrait-elle pas être le personnage avec ses muscles ? Ce sentiment nous amène à dire : “le ressort tire”, ou “le personnage tire”. Nous ne disons pas : “la corde tire”, ou “le mur tire”. Mais quelque chose doit clocher avec ces affirmations. Considérons la Fig. 1c. Ici, lequel des deux ressorts serait responsable de la force, lequel serait la cause de la force ? Et lequel des deux personnages sur la Fig. 1d ? Finalement, nous pouvons aussi considérer la corde comme étant un ressort avec une très grande constante de raideur. Ainsi, notre procédure pour trouver la cause de la force ne marche pas. La question est donc : mais se peut-il que notre sentiment nous ait menti ? N’y a-t-il réellement rien qui distingue le ressort ou le personnage du reste de l’arrangement ? Si, il y a quelque chose. Les deux, le ressort et le personnage, peuvent agir comme une source d’énergie mécanique. Et par conséquent ils nous apparaissent comme l’origine, le responsable de ce que nous observons. En réalité, ils ne doivent pas fournir de l’énergie mécanique, ils doivent juste être capables de la fournir. Ainsi, si nous les rendons responsables de la force, nous nous trompons de cible.

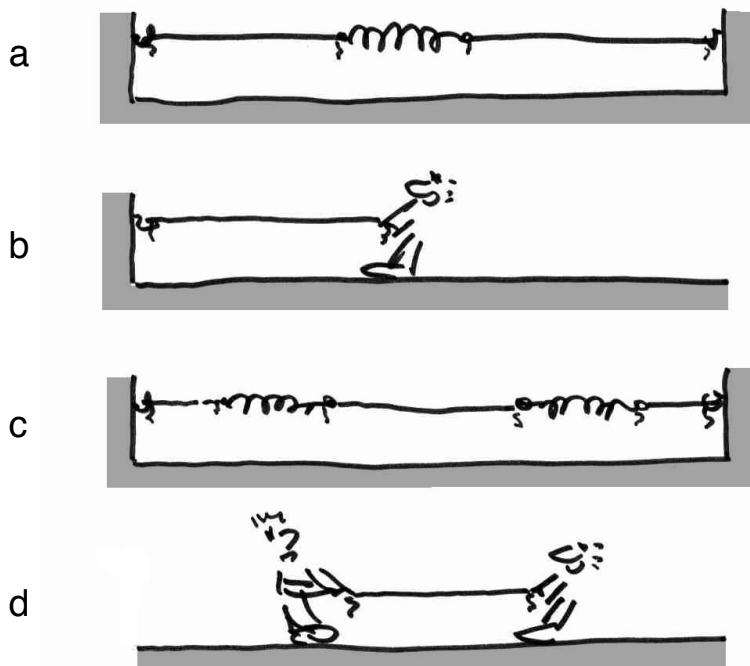


Fig. 1. (a) Le ressort est-il la cause de la force ? (b) Le personnage est-il la cause de la force ? (c) Lequel des deux ressorts serait la cause de la force ? (d) Lequel des deux personnages serait la cause

Remède :

En réalité, nous sommes parfaitement capables de percevoir des forces qui agissent sur notre corps. La Nature nous a munis d’organes sensitifs particuliers dans ce but. Dans notre peau nous avons des capteurs pour des contraintes de compression, de tension et de cisaillement, qui sont aussi fiables pour la mesure des forces que d’autres capteurs dans notre corps sont fiables pour la “mesure” d’autres grandeurs physiques : température, intensité lumineuse et intensité sonore. De cette façon nous pouvons ressentir des forces, que nos muscles soient actifs ou non. Nous pouvons même avoir une assez bonne idée de l’unité de force : une légère pression sur notre peau avec un doigt, ou bien un poids de 100 g placé sur notre bras, correspond à un Newton.

[1] P. A. Tipler and G. Mosca: Physics – for Scientists and Engineers (Physique – pour scientifiques et ingénieurs), Sixth edition, W. H. Freeman and Company, New York, 2008, p. 93.

[2] http://theory.uwinnipeg.ca/mod_tech/node20.html

[3] Citation tirée d’un manuel scolaire allemand

Sujet :

Dans les livres scolaires on trouve des définitions de l'oscillateur harmonique, souvent soulignées, comme la suivante : "en mécanique, un oscillateur harmonique est un système dans lequel on trouve une force de rappel qui est proportionnelle au déplacement :

$$F = -D \cdot s. \quad (1)$$

Apparemment une grande importance est accordée à cette proportionnalité.

Défaut :

1. Une phrase soulignée appelle une attention particulière : "Ce que je dis est important !" Les énoncés cités plus haut ne méritent cependant pas ce statut d'importance.

On peut remarquer qu'il y a deux autres variables qui sont proportionnelles l'une à l'autre, la quantité de mouvement et la vitesse :

$$p = m \cdot v. \quad (2)$$

Les deux relations (1) et (2) ont la même structure et sont d'importance similaire pour l'oscillation. Elles caractérisent les deux composants de l'oscillateur : le ressort (équation (1)) et le corps en mouvement (équation (2)). Avec la loi de conservation de la quantité de mouvement, elles permettent de poser l'équation du mouvement.

On pourrait objecter que l'équation (2) n'a pas valeur d'équation clé, puisqu'elle est vraie de toute manière. Des déviations à la proportionnalité entre vitesse et quantité de mouvement ne sont observées qu'à des vitesses relativistes. La citer comme une condition pour un mouvement harmonique n'apparaîtrait-il pas comme de la pédanterie ? Mais qu'en est-il de l'équation (1) ? En introduisant l'oscillateur comme un système composé d'une masse et d'un ressort, cette équation aussi est supposée acquise, puisque personne n'aura l'intention de sur-étirer le ressort.

Afin d'examiner un problème mécanique avec un certain recul, il est bon de le transposer en un problème électrique.

Un circuit électrique oscille également de manière harmonique seulement si deux relations linéaires sont satisfaites, qui caractérisent les deux composants du circuit, c'est-à-dire le condensateur et la bobine :

$$n\Phi = L \cdot I$$

et

$$Q = C \cdot U.$$

Avec la loi de conservation de la charge, elles permettent de poser l'équation différentielle de l'oscillateur.

Dans ce cas il est particulièrement facile de ne pas respecter la linéarité : en utilisant une bobine avec un cœur de fer qui atteint la saturation ou bien en utilisant un condensateur électrolytique. En dépit de cette possibilité personne ne croit nécessaire d'énoncer :

"En électricité, un circuit oscillant harmoniquement est un système composé d'une bobine et d'un condensateur, dans lequel le flux magnétique dans la bobine est proportionnel au courant électrique et la tension aux bornes du condensateur est proportionnelle à sa charge électrique". Pourquoi ne formulons-nous pas une telle définition ? Parce que nous tenons pour acquis que le flux magnétique est proportionnel au courant électrique et que la tension est proportionnelle à la charge.

2. Avons-nous réellement besoin d'un nom particulier pour cette force (*force de rappel*) dans un oscillateur mécanique ? Pour être cohérent, on devrait alors plaider que le courant électrique dans la bobine du circuit oscillant mérite son propre nom, à savoir *courant de rappel*.

Origine :

Cela est un exemple de plus du traitement particulier réservé à la mécanique. La domination de la mécanique, causée par l'Histoire, demeure sans être remise en cause.

Remède :

Ne feignez pas la rigueur lorsqu'il n'y en a pas besoin. Souligner des phrases peut aider. Souligner des énoncés triviaux est fâcheux.

5.13 Ligne d'action

Sujet :

Lors de l'introduction de la grandeur physique "force" il est parfois souligné qu'une force est déterminée par trois éléments, ou que trois indications doivent être données : 1. son intensité, 2. son sens, 3. son point d'application. Plus tard, dans le contexte du traitement du couple, une quatrième caractéristique est attribuée à la force : sa ligne d'action.

Défaut :

C'est seulement un exemple de la façon inutilement compliquée de présenter le concept de force. A nouveau, la force semble nécessiter un traitement particulier. La force est une grandeur vectorielle et en tant que telle une force est déterminée par ses trois composantes ou autrement dit par son intensité et sa direction. Mais pourquoi serait-il nécessaire d'attribuer en plus un point d'attaque à une force ? Est-ce une caractéristique particulière de la force ? Cela ne l'est pas. C'est plutôt une sorte de bizarrerie.

Les valeurs de la plupart des grandeurs physiques se rapportent à l'une des quatre entités géométriques suivantes : un point (comme la pression et la température), une ligne (comme la tension), une surface (comme l'intensité du courant électrique et le flux magnétique) ou une région de l'espace (comme la masse, la charge électrique et l'entropie). Les grandeurs qui se rapportent à un point sont parfois appelées grandeurs intensives ou locales. Les grandeurs qui se rapportent à une région de l'espace sont les grandeurs extensives. Les grandeurs dont les valeurs appartiennent à une surface sont celles dénommées courants, flux ou écoulements. Cette classification vaut pour les grandeurs scalaires, aussi bien que vectorielles ou tensorielles. Ainsi, la température est un scalaire, et l'intensité d'un champ électrique une grandeur vectorielle locale. La charge électrique est un scalaire et la quantité de mouvement une grandeur vectorielle extensive. La puissance est un scalaire, la force une grandeur vectorielle se rapportant à une surface.

Nous pouvons maintenant dire plus clairement ce qu'il en est du point d'application d'une force. Il est supposé être l'entité géométrique à laquelle se rapporte la valeur d'une force. Nous pouvons alors faire deux remarques :

1. Cette entité géométrique à laquelle se rapporte la valeur d'une force n'est pas un point mais une surface.
2. Il n'est pas usuel en physique de faire mention de cette entité dans la définition d'une grandeur. Nous ne disons pas : une température est déterminée par sa valeur et par le point où la température est considérée. Et nous ne disons pas : la charge électrique est déterminée par son intensité et par le corps où elle se trouve.

Origine :

En mécanique classique du point, telle que développée aux 18ème et 19ème siècles, une force correspond effectivement à un point. La mécanique du point était et est encore très fructueuse, mais en particulier pour ce qui concerne la physique à l'école, nous devrions être conscients que c'est une approximation particulière pour laquelle plusieurs concepts dont nous avons besoin pour la physique scolaire deviennent singuliers ou dénués de sens, comme par exemple toutes les densités et les densités de courant.

Remède :

Il devrait devenir clair que la valeur d'une force se réfère à une surface. Mais cela ne doit pas être souligné comme une caractéristique particulière des forces. Cela est également vrai pour tout autre courant ou grandeur de flux.

Sujet :

“La pression dans un fluide agit avec une égale intensité vers le haut, vers le bas et sur les côtés.”

Défaut :

La citation est tirée d'un cours d'université quelque peu ancien. Elle illustre un problème que nous pouvons rencontrer aussi dans des textes plus modernes : la distinction entre force et pression.

Traditionnellement la force est introduite en premier. Ensuite la pression est définie comme une force par unité de surface. Toutefois, la relation ne peut pas être

$$p = \Delta F / \Delta A,$$

puisque la pression p est un scalaire et ΔF est un vecteur. De plus, ΔA est un vecteur, et on ne peut pas diviser par un vecteur.

Ce problème peut être éludé en définissant la pression au moyen de

$$p = dE/dV,$$

c'est-à-dire la pression est la variation d'énergie par la variation de volume. Mais normalement cela n'est pas fait ainsi. Si l'on reste sur l'introduction de la force par unité de surface, au lieu de

$$p = \Delta F / \Delta A$$

on devrait écrire :

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

où $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur de la contrainte mécanique. En statique des fluides (sans frottement interne) ce tenseur a seulement trois éléments diagonaux qui ont tous la même valeur. Il peut ainsi être caractérisé par un seul nombre, qui est appelé pression hydrostatique. Dans ce cas, l'équation (1) peut être écrite :

$$\mathbf{F} = p \cdot \mathbf{A}.$$

En général, $\boldsymbol{\sigma}$ n'a pas une structure aussi simple. Cela est évident, même pour le profane : il est possible de soumettre un objet à des contraintes mécaniques indépendamment dans trois directions orthogonales deux à deux. Si cette simple observation n'est pas débattue, il sera difficile de comprendre pourquoi cela vaut la peine de mentionner que la pression dans les fluides est la même dans toutes les directions.

Il y a encore un autre problème avec notre citation : apparemment l'auteur lui-même s'est empêtré dans la jungle des concepts scalaire, vecteur et tenseur. En effet, l'énoncé que la pression est la même vers le haut et vers le bas n'a aucun sens. Un tenseur distingue trois axes mutuellement orthogonaux, mais ces axes n'ont pas d'orientation. Par conséquent, il n'y a pas de pression vers le haut ou vers le bas. Il y a seulement une pression dans la direction verticale. Ainsi la contrainte verticale (ou pression) peut être différente de la contrainte horizontale (ce qui n'est pas le cas dans les fluides cependant). Apparemment, la pression vers le haut et vers le bas a été confondue avec la force vers le haut et vers le bas.

Origine :

La vieille idée newtonienne selon laquelle une force agit sur un corps. En définissant la pression au moyen de la force, il est plutôt naturel de rechercher un corps sur lequel une pression agit, et il semble plausible que la pression (ou la contrainte mécanique) ait une orientation.

Remède :

Introduire la force comme une grandeur qui se rapporte à une surface, c'est-à-dire ni à un point ni à un corps.

Avant de discuter de la pression dans les fluides, introduire la contrainte mécanique dans les matériaux solides et montrer qu'elle dépend de la direction. Il est facile de voir qu'on peut imposer une contrainte mécanique sur un corps indépendamment dans trois directions orthogonales l'une à l'autre. Les liquides et les gaz sont des cas particuliers, pour lesquels les trois contraintes ont des valeurs identiques.

(Un autre cas particulier sont les champs électrique et magnétique. Dans ce cas les trois contraintes principales ont la même valeur absolue. Dans la direction du vecteur intensité du champ, la contrainte est négative (tension) et dans les directions perpendiculaires au vecteur intensité du champ, elle est positive.)

Eviter de dire “pression sur...”. On peut dire : pression dans une direction donnée, par exemple pression dans la direction horizontale.

Sujet :

L'équation de Bernoulli

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \text{const}$$

est valable pour un écoulement stationnaire, incompressible, non visqueux (sans frottement). p est la pression, ρ la masse volumique, g l'intensité du champ gravitationnel, h la hauteur (comptée positivement vers le haut) et v la vitesse. Ici, "const" signifie que la somme dans le membre de gauche de l'équation ne change pas lorsqu'on se déplace le long d'une ligne de courant. Si les valeurs des variables locales sont les mêmes en tout point d'une section transversale, alors la condition est encore moins restrictive. Dans ce cas "const" signifie "a la même valeur sur toute section transversale".

Habituellement, l'équation est interprétée de la façon suivante. Il existe plusieurs types de pressions : la pression statique p , la pression gravitationnelle $\rho \cdot g \cdot h$ et la pression dynamique ou pression d'arrêt $(\rho/2) \cdot v^2$. L'équation de Bernoulli nous dit que la somme de ces trois pressions est constante (sous les conditions qui ont été mentionnées).

Défaut :

Qualitativement et traduite en mots, l'équation affirme la chose suivante :

1. Aux endroits où l'écoulement est rapide, la pression est plus basse que là où il est lent.
2. La pression augmente quand on descend à l'intérieur du fluide.

Ces formulations ne contiennent qu'une seule pression, qui est la grandeur p dans l'équation de Bernoulli. Les deux termes $\rho \cdot g \cdot h$ et $(\rho/2) \cdot v^2$ ont la dimension d'une pression, mais ce ne sont pas ce que nous entendons normalement par pression. Les termes d'une somme ne représentent pas nécessairement des grandeurs physiques du même type. Le terme $\rho \cdot g \cdot h$ ne peut pas être la pression due à la gravitation, puisque la pression due à la gravitation augmente lorsque l'on va vers le bas alors que $\rho \cdot g \cdot h$ diminue.

Origine :

Cette interprétation répréhensible est probablement due au désir de considérer la pression comme une grandeur pour laquelle une sorte de loi de conservation est valable. En effet, la formulation "la pression totale est constante" rappelle une certaine façon d'exprimer la conservation de l'énergie, de la charge électrique ou du moment cinétique : "dans un système isolé la quantité totale d'énergie (de charge électrique, de moment cinétique) reste constante". De tels énoncés sont élégants, puisqu'il est facile de les formuler et puisqu'ils sont universellement valables. Grâce à l'équation de Bernoulli, la pression aussi pourrait faire partie de ce cercle illustre des grandeurs conservées. De plus, une telle conclusion semble naturelle, puisque l'équation de Bernoulli peut être déduite de la loi de conservation de l'énergie.

Nous pensons que présenter les choses de cette façon est exagéré. La pression ne peut être une "grandeur conservée", parce qu'une condition nécessaire pour être conservée est que la grandeur soit extensive – ce qui n'est pas vrai pour la pression.

On pourrait objecter que donner le nom "pression dynamique" au terme $(\rho/2) \cdot v^2$ ne peut être ni faux ni vrai, puisque ce n'est qu'une question de définition. Cependant, le choix d'un nom peut être plus ou moins approprié et nous croyons que le nom pression pour les termes $\rho \cdot g \cdot h$ et $(\rho/2) \cdot v^2$ ne l'est pas. La pression est une grandeur pour laquelle nous avons une intuition solide. Appeler $(\rho/2) \cdot v^2$ une pression inciterait nos étudiants à croire que la pression est un concept difficile. L'attribut séduisant "dynamique" renforce encore plus cette idée.

De plus, l'expression $(\rho/2) \cdot v^2$ est connue comme la densité de l'énergie cinétique. Ainsi on pourrait proposer d'appeler tous les termes de l'équation de Bernoulli des densités d'énergie : nous pourrions appeler p la densité d'énergie statique, $(\rho/2) \cdot v^2$ la densité d'énergie dynamique et $\rho \cdot g \cdot h$ la densité d'énergie gravitationnelle. Il est clair que ce ne serait pas une bonne idée.

Remède :

Lire l'équation de Bernoulli ainsi : la pression diminue quand (1) la vitesse augmente, (2) la hauteur augmente. Les deux affirmations sont acceptables.

5.16 Force et énergie

Sujet :

Des formulations contenant les mots “force motrice” comme les suivantes :

- “La force motrice venant du moteur pousse la voiture en avant.”
- “Puisque la force motrice d’une voiture vient du moteur, elle est...”
- “Dans un véhicule hybride ... un système de transfert de force motrice est constitué...”.
- “La force motrice, qui est transmise du moteur vers les roues...”.
- “Une voiture qui roule lentement peut être accélérée par la force du moteur.”

Défaut :

Si quelque chose est transmis de A à B, alors, selon le langage courant, cette chose est d’abord située en A et ensuite en B. Concernant les citations ci-dessus, dont certaines sont tirées de manuels scolaires, cela ne s’applique pas si le terme “force” est utilisé dans son sens de la physique, même en étant généreux. Les affirmations sont correctes, cependant, en remplaçant le mot “force” par ce qui est appelée énergie en physique.

Origine :

De nos jours, le mot “force” est utilisé en physique pour la grandeur F . Mais il y a aussi une longue tradition selon laquelle le mot avait d’autres significations. Ainsi, dans le passé le mot était utilisé pour décrire ce que nous appelons aujourd’hui énergie – notre énergie cinétique était appelée *force vive* ou *vis viva*, de même également que ce que nous appelons maintenant quantité de mouvement. La célèbre controverse historique entre Leibniz et les Cartésiens à propos de la “vraie mesure de force” –quelle est, de l’expression $m \cdot v$ ou de l’expression $m \cdot v^2$, la “vraie” mesure pour la description d’un mouvement ?– l’atteste. Apparemment, la tradition est si fortement enracinée dans la terminologie scientifique que même aujourd’hui le mot “force” est souvent pris pour ce qui devrait être appelé “énergie”, sans que cela soit perçu par l’auteur et par le lecteur. En conséquence nous ne devrions pas incriminer nos élèves ou nos étudiants lorsqu’ils ne font pas la distinction entre ces deux concepts.

Remède :

Un usage prudent des mots lorsqu’il est question de force en physique.

Sujet :

“Comme le levier, les poulies peuvent aussi multiplier la force et changer sa direction.”

“Cette poulie ne multiplie pas la force d’entrée. Par contre, elle change la direction de la force du haut vers le bas, et pour beaucoup de gens, c’est un avantage.”

“Une poulie change la direction de la force, rendant plus facile de lever des choses vers des endroits plus hauts.”

Défaut :

Une personne A tire sur une corde, qui passe dans une poulie B et sur laquelle une charge C est suspendue, Fig. 1.

1. Les citations se rapportent aux forces dans les parties R_1 et R_2 de la même corde. Si une force est mentionnée sans préciser le corps qui l’exerce et celui sur lequel elle est exercée, l’orientation de la flèche du vecteur n’est alors pas définie.

La force F_{AB} que la personne exerce sur la poulie est orientée vers le bas, la force F_{BA} que la poulie exerce sur la personne pointe vers le haut. L’état de la partie gauche de la corde, c’est-à-dire R_1 est décrit sans ambiguïté par l’une ou l’autre.

Nos citations affirment que la direction d’une force est changée. Cette affirmation sera comprise de la manière suivante : en allant de la partie R_1 à R_2 de la corde, la force change sa direction. Mais nous voyons qu’il est laissé à notre discrétion de savoir s’il en est ainsi ou non. F_{AB} a effectivement la direction opposée à F_{BC} et de la sorte une force semble changer de direction. Mais les directions de F_{AB} et F_{CB} sont les mêmes et donc la direction des forces ne semble pas être changée.

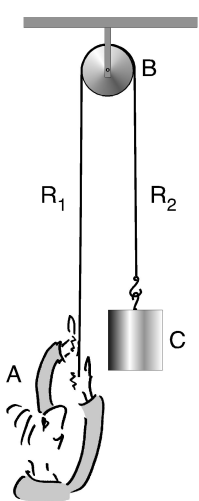


Fig. 1

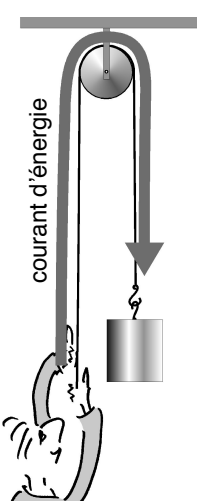


Fig. 2

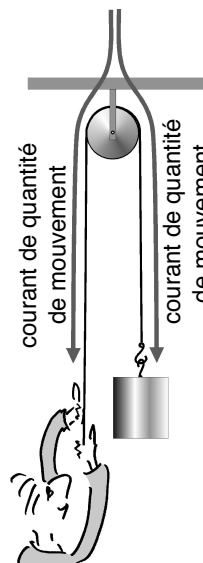


Fig. 3

2. “Changer une direction” signifie que quelque chose qui a d’abord une certaine direction en a une autre ensuite. Ainsi, les phrases suggèrent que la force va de la corde 1 (à gauche) vers la corde 2 (à droite). Mais s’il en était ainsi, qu’en est-il de la troisième force : celle que la suspension exerce sur la poulie ? Où va cette force ? En réalité la poulie change la direction de quelque chose, et même de deux choses : premièrement elle change la direction de la corde, et deuxièmement celle du courant d’énergie, Fig. 2. Quand la corde R_1 est tirée vers le bas par la personne, il y a un courant d’énergie vers le haut dans R_1 , il tourne ensuite autour de la poulie et va vers le bas dans la partie R_2 de la corde vers C.

3. Il est en effet possible de traiter la force de la façon suggérée par les citations. Une force peut être identifiée ou interprétée comme un courant de quantité de mouvement. Le courant de quantité de mouvement de notre arrangement de poulie peut facilement être donné. Cependant, la quantité de mouvement ne s’écoule pas comme on pourrait le suspecter en lisant nos citations. Il ne suit pas la corde autour de la poulie. Si nous prenons la direction dirigée vers le haut comme la direction positive pour la quantité de mouvement, alors la quantité de mouvement s’écoule de la suspension vers la poulie. Là il se sépare en deux courants d’égale grandeur, l’un s’écoulant à travers R_1 et l’autre à travers R_2 , Fig. 3.

Origine :

L’arrangement suggère une description avec quelque chose qui s’écoule autour de la poulie en plus de la corde. Mais apparemment le comportement du courant d’énergie est projeté sur celui de la force, voir aussi [1].

Remède :

L’idée d’une force qui change de direction n’est pas vraiment bonne. Les choses deviennent claires en décrivant la poulie, de même que le palan, avec les courants d’énergie et de quantité de mouvement en les distinguant l’un de l’autre avec soin, tout comme en électricité on doit absolument faire la distinction entre le courant d’énergie et le courant de la charge électrique.

[1] F. Herrmann: Force et énergie, article 5.16

Sujet :

Comment vole un avion est discuté non seulement dans la littérature spécialisée sur l'aérodynamique mais aussi dans des manuels de physique pour l'université et l'école ainsi que dans la littérature scientifique grand-public. Plusieurs explications différentes peuvent être trouvées. Une source donne une explication, une autre source une deuxième, et certains livres donnent plusieurs descriptions. Les explications les plus fréquentes sont les suivantes :

- La vitesse de l'écoulement est plus élevée sur la face supérieure de l'aile que sur la face inférieure. Par conséquent, selon l'équation de Bernoulli, la pression est plus forte sur la face inférieure que sur la face supérieure.
- Les molécules d'air rebondissent sur la surface de l'aile. Le transfert de quantité de mouvement est plus grand sur la face inférieure que sur la face supérieure.
- Un écoulement avec circulation se forme autour de l'aile. Cela génère une force résultante dirigée vers le haut.

Ces explications ne correspondent pas à des mécanismes différents qui contribuent à la portance. Elles représentent différentes descriptions du même phénomène.

Défaut :

1. Souvent les explications ne sont pas compréhensibles. Certains textes inondent le lecteur avec des détails et des termes techniques : séparation de couche limite, résistance de coque, nombre de Reynolds, angle d'attaque, coefficient de portance, circulation, vorticité, viscosité, loi de Stokes, équation de Bernoulli, turbulence...

2. Certains textes suggèrent que les processus mentionnés plus haut correspondent aux diverses contributions pour la portance. Dans un ouvrage il est indiqué que les molécules transmettent de la quantité de mouvement à la face inférieure de l'aile, et qu'en plus il y a une dépression sur la face supérieure.

3. Le problème le plus important que nous voulons discuter ici est le suivant : quand un(e) élève demande pourquoi un avion vole, quelle sorte de réponse le ou la satisfera ?

Nous croyons qu'aucune des explications susmentionnées ne représente une telle réponse. Pour illustrer notre propos, considérons une autre question qui a quelque chose en commun avec le vol de l'avion. Au lieu de : "Pourquoi l'avion ne tombe pas sur le sol ?" nous demanderons "Pourquoi le vase sur la table devant nous ne tombe pas ?"

Un physicien hypothétique, qui utilise l'équation de Bernoulli comme argument dans le cas de l'avion, pourrait en conséquence donner une réponse semblable à celle-ci : "La table est élastique. Elle se comporte comme un ressort tendu et ainsi exerce une force sur le vase." A l'évidence, cette réponse n'est pas incorrecte, mais probablement le questionneur n'est pas vraiment intéressé par ce qui exerce une force sur la base du vase et pour quelle raison. La même chose est vraie pour l'avion. Si nous savons comment l'air se débrouille pour pousser l'aile vers le haut, nous n'avons pas le sentiment d'avoir compris la raison pour laquelle l'avion ne tombe pas.

Le physicien hypothétique qui utilise l'argument des molécules d'air pour expliquer pourquoi l'avion vole, pourrait répondre, dans le cas du vase : "Le vase ne tombe pas sur le sol, parce qu'il y a une interaction répulsive entre les molécules du vase et celles de la table". Avec cette réponse le questionneur ne serait pas non plus satisfait. Et aussi la réponse correspondante dans le cas de l'avion n'apporte pas les lumières désirées. Devons-nous vraiment en appeler à la physique atomique pour comprendre pourquoi un avion vole ?

Peut-être notre physicien hypothétique n'a pas vraiment écouté la question. Apparemment il a traduit la question de l'élève en une autre qui lui permet de faire étalage de tout son savoir sur l'aérodynamique et sur la cinétique moléculaire.

Origine :

Ce que nous trouvons dans les manuels scolaires et dans d'autres livres de vulgarisation scientifique, c'est-à-dire des livres qui sont écrits pour des non-spécialistes, est du savoir d'ingénieur brut. Il est important de connaître le champ des lignes de courant lorsque le problème est d'optimiser un profil d'aile. Il est important de décomposer le champ de vitesse en composantes avec une divergence et une circulation tendant respectivement vers zéro pour pouvoir appliquer la théorie des écoulements potentiels. Mais ces sujets ne peuvent prétendre à être des thèmes d'éducation générale.

Remède :

Nous nous limitons à l'explication suivante : tout comme un oiseau, un insecte, un hélicoptère, un frisbee, un boomerang et aussi un parachute, un avion doit imprimer à l'air un mouvement vers le bas, puisqu'il doit se débarrasser de la quantité de mouvement qu'il reçoit constamment via la force de gravité. (En réalité, la force est assimilable à un courant de quantité de mouvement.) L'air qui va vers le bas emporte au loin cette quantité de mouvement et éventuellement la ramène à la terre.

Sujet :

La loi de conservation du moment cinétique est souvent introduite comme ceci :

Nous considérons une masse ponctuelle. Nous écrivons le produit vectoriel des vecteurs de part et d'autre de la deuxième loi de Newton

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$$

par le vecteur position \mathbf{r} (relatif à une origine arbitrairement choisie). Nous obtenons une relation entre le couple et le taux de changement temporel du moment cinétique :

$$\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt.$$

Nous écrivons l'expression correspondante pour deux masses ponctuelles ou plus et prenons en compte le fait que pour les forces internes d'interaction nous avons

$$\mathbf{F}_{ik} = -\mathbf{F}_{ki},$$

et que ces forces sont parallèles à $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k$. Nous trouvons alors que la dérivée temporelle du moment cinétique du système de masses ponctuelles est égale à la somme des moments des forces externes. De cela s'ensuit la loi de conservation du moment cinétique : "le moment cinétique d'un système reste constant, si aucun couple extérieur n'agit sur le système."

Défaut :

Notre dérivation précédente de la conservation du moment cinétique est quelque peu courte, car nous pensons qu'elle est connue du lecteur. Dans un manuel, elle nécessite facilement une page entière avec environ 10 lignes d'équations. Il n'est pas difficile de suivre une telle dérivation étape par étape, et à la fin, l'étudiant(e) sera probablement convaincu(e) que la loi de conservation du moment cinétique doit être valide. Cependant, si nous demandons à l'étudiant(e) ce qui a été démontré réellement sur cette page, il ou elle pourrait se trouver embarrassé(e). La dérivation débute avec la seconde loi de Newton, qui est équivalente à la loi de conservation de la quantité de mouvement, et le résultat du calcul est la loi de conservation du moment cinétique. Il est inévitable que l'étudiant(e) croie que la conservation du moment cinétique a été mathématiquement déduite de la conservation de la quantité de mouvement. Il est inutile de dire que cela n'est pas vrai. Il y aura peu d'étudiants qui comprendront l'astuce qui a été employée. Ils ne vont même pas suspecter qu'il y avait une astuce. En réalité, dans la démonstration ci-dessus, la conservation du moment cinétique n'est pas déduite de la conservation de la quantité de mouvement, mais la conservation du moment cinétique est introduite dans le calcul en disant que les forces \mathbf{F}_{ik} et \mathbf{F}_{ki} sont parallèles à $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k$.

La Fig. 1 montre quelque chose qui n'existe pas en réalité.

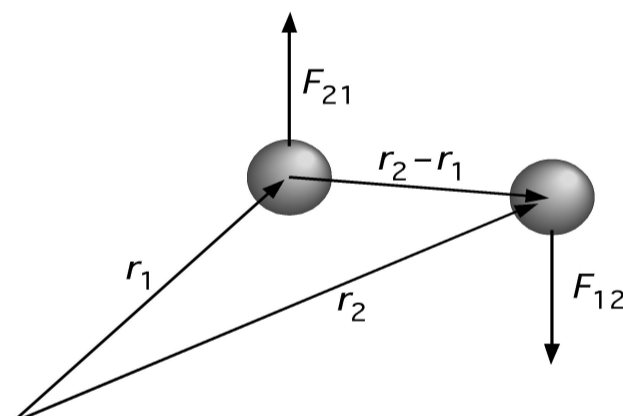


Fig. 1. Les forces sur les deux corps ne sont pas parallèles à la ligne reliant ces deux corps. Ainsi, la loi de conservation du moment cinétique n'est pas satisfaite.

Deux corps exercent des forces l'un sur l'autre, qui sont égales et de direction opposée ($\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$), mais qui ne sont pas parallèles à $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k$. Elles obéissent à la troisième loi de Newton et ainsi à la conservation de la quantité de mouvement, mais puisqu'elles sont équivalentes à un couple, le moment cinétique du système devrait augmenter, et il le ferait sans un couple externe. Mais il n'existe pas de telles forces. Elles sont interdites par la loi de conservation du moment cinétique. Ainsi l'affirmation que \mathbf{F}_{ik} et \mathbf{F}_{ki} sont parallèles à $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k$ est équivalente à l'affirmation que le moment cinétique est une grandeur conservée.

Pour résumer, un calcul assez laborieux est mené, dans lequel est injecté la conservation du moment cinétique, et à la fin, on est content que la loi de conservation du moment cinétique en sorte. Mais pourquoi alors ce calcul ?

Origine :

Les lois de Newton ne contiennent pas plus et pas moins que la conservation de la quantité de mouvement. Du fait de leur grande réussite, l'idée s'est répandue qu'elles étaient plus que seulement une simple loi de conservation. Elles semblent être l'alpha et l'oméga de la physique, la base à partir de laquelle tout le reste peut être déduit. Parfois, même la conservation de l'énergie est tirée des lois de Newton – à nouveau avec une astuce.

Remède :

Introduisez le moment cinétique comme une grandeur de plein droit, pour laquelle une loi de conservation est valable. Cela n'exclut pas de montrer comment le moment cinétique d'un système de masses ponctuelles est lié aux quantités de mouvement de ses constituants.

6

Relativité

6.1 L'équivalence masse-énergie

Sujet :

La relation masse-énergie d'Einstein $E = mc^2$.

Défaut :

Dans de nombreux manuels scolaires et magazines nous trouvons l'affirmation que la relation masse-énergie d'Einstein signifie que la masse et l'énergie sont des manifestations différentes de la même grandeur physique, et que l'énergie et la masse peuvent être transformées l'une en l'autre [1]. Si cette affirmation était vraie, nous pourrions distinguer l'énergie de la masse. Une diminution de l'énergie serait associée avec une augmentation de la masse et vice versa. Toutefois, cela n'est pas vrai, et ce n'est pas ce que la relation d'Einstein nous dit. Selon cette relation, masse et énergie sont la même grandeur physique, mesurée avec différentes unités.

Origine :

Il est possible que le coupable soit Einstein lui-même :

“Il s'ensuit de la théorie de la relativité restreinte que masse et énergie sont des manifestations doubles mais différentes d'une même chose, une conception quelque peu inhabituelle pour l'esprit commun. De plus, l'équation ... dans laquelle l'énergie est mise à égalité avec la masse, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière, montra qu'une très petite quantité de masse peut être convertie en une très grande quantité d'énergie et vice versa. La masse et l'énergie étaient en fait équivalentes, selon la formule mentionnée ci-dessus.”

Au lieu de dire “peut être convertie en”, il aurait du dire “correspond à”.

Remède :

L'enseignement devrait rendre clair ce qui suit :

1. La grandeur connue auparavant comme l'énergie a également les propriétés de la grandeur connue auparavant comme la masse, à savoir poids et inertie. Une batterie chargée est plus lourde qu'une batterie vide. De l'eau chaude est plus lourde que la même quantité d'eau froide, un corps en mouvement est plus lourd que le même corps au repos, et ainsi de suite. Les différences de poids dans ces exemples sont si petites, cependant, qu'il est impossible de les mesurer.

2. La grandeur connue auparavant comme la masse a également les propriétés de la grandeur connue auparavant comme l'énergie. A première vue, cette assertion semble incroyable. Une propriété typique de l'énergie est celle qui nous permet de faire du travail utile. Ainsi on pourrait s'attendre qu'avec 1 g de sable on devrait être capable de réaliser un travail de $E = 1 \text{ g } c^2 = 10^{14} \text{ J}$, ce qui à l'évidence n'est pas vrai. Cependant, nous ne pouvons jamais tirer profit de toute l'énergie contenue dans un système. Avec de l'air “comprimé” à 1 bar nous ne pouvons faire fonctionner un marteau-piqueur, avec de l'eau “tiède” à température ambiante nous ne pouvons faire fonctionner un moteur thermique. Avec de l'essence seule nous ne pouvons faire tourner un moteur. Nous avons aussi besoin d'oxygène. Ainsi il ne devrait pas être surprenant de ne pouvoir faire tourner ou fonctionner quelque chose avec 1 g de sable seul. Nous avons aussi besoin de 1 g d'anti-sable. Mais si nous avons l'anti-sable, cela marcherait.

[1] “...Cet anéantissement de paire est la preuve concluante de la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$ pour la transformation de masse en énergie.”

6.2 La façon d'écrire l'équation $E = mc^2$

Sujet :

La manière d'exprimer l'équivalence masse-énergie au moyen de l'équation $E = mc^2$.

Défaut :

Selon une vieille tradition en mathématique, une relation linéaire entre une variable indépendante x et une variable dépendante y est écrite sous la forme

$$y = ax + b,$$

et non

$$y = b + ax.$$

Si la relation est quadratique nous écrivons

$$y = ax^2 + bx + c,$$

plutôt que

$$y = xb + c + x^2a.$$

Cette convention nous aide à saisir rapidement le contenu de l'équation. L'usage d'écrire la constante devant la variable indépendante est également établie en physique.

En lisant l'équation

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2}v^2$$

nous comprenons immédiatement qu'il y a une relation quadratique entre vitesse et énergie cinétique. L'équation incite à penser à un processus pour lequel la vitesse peut changer, alors que la masse m est plutôt perçue comme une constante. Sinon nous écririons la relation comme

$$E_{\text{kin}} = \frac{v^2}{2}m.$$

De manière similaire nous écrivons

$$U = R \cdot I \text{ et non } U = I \cdot R, \text{ ou}$$

$$Q = C \cdot U \text{ et non } Q = U \cdot C, \text{ ou}$$

$$E = h \cdot f \text{ et non } E = f \cdot h, \text{ ou}$$

$$Q = I \cdot t \text{ et non } Q = t \cdot I.$$

Dans chacun de ces cas la grandeur qui est considérée comme une variable dans un processus est placée à droite. La grandeur qui est maintenue constante figure à sa gauche.

Selon cette convention, l'équation

$$E = mc^2$$

serait lue ainsi : l'énergie est proportionnelle au carré de la vitesse de la lumière, le coefficient de proportionnalité étant la masse. En réalité l'équation signifie quelque chose de tout à fait différent : plus grande est la masse d'une particule ou d'un corps, plus elle / il a de l'énergie, le coefficient de proportionnalité étant c^2 .

De ce point de vue il serait plus correct d'écrire l'équation ainsi :

$$E = c^2m.$$

Mais même sous cette forme l'expression a un défaut. Pourquoi devrions-nous écrire un coefficient de proportionnalité sous une telle forme camouflée ?

Origine :

Einstein a écrit l'équation sous cette forme, et personne n'a songé à la changer. On pourrait s'interroger sur ses raisons. Peut-être parce que dans

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2}v^2$$

nous écrivons aussi d'abord la masse et ensuite la vitesse.

Remède :

Ecrire l'équation comme on a l'habitude d'écrire ce type d'équations :

$$E = k m.$$

Ici k est une constante universelle.

6.3 Vitesse de la lumière et limite de vitesse

Sujet :

La constante c dans l'équation

$$E = mc^2$$

est appelée la vitesse de la lumière.

Défaut :

La théorie de la relativité restreinte peut être déduite de la mécanique newtonienne en ajoutant un seul nouvel axiome : l'équivalence masse-énergie. En procédant ainsi, il apparaît qu'il y a une limite universelle de vitesse. Lorsque de la quantité de mouvement est fournie à une particule (ou à un corps), elle (il) s'approche de cette vitesse limite c . Plus petite est la masse au repos de la particule, plus rapidement la vitesse converge vers cette limite de vitesse. Si la masse au repos est nulle, la particule peut se déplacer seulement avec la vitesse limite. La valeur de cette vitesse en peut être trouvée que de façon expérimentale.

En appelant cette vitesse limite "vitesse de la lumière" on peut avoir l'impression que la lumière joue un rôle particulier dans la théorie de la relativité restreinte. Il apparaît que toutes les autres particules doivent se conformer à la lumière. Nous croyons que cela n'est pas une vision pertinente des choses, puisque toutes les particules obéissent indépendamment aux mêmes lois. Il n'y a rien de particulier concernant la lumière, à part que sa masse au repos est nulle. Mais même à cet égard, elle n'est pas unique.

Origine :

Habituellement, en introduisant les lois de la relativité restreinte, on ne commence pas par l'équivalence masse-énergie, mais par l'observation que la vitesse de la lumière est indépendante du repère de référence. En procédant ainsi, la lumière joue dès le début un rôle particulier.

En considérant la théorie complète on peut noter que les photons ne sont pas fondamentalement différents des autres particules. Ils sont sujets aux mêmes lois que toutes les autres particules. Ils se distinguent seulement par les valeurs de ces grandeurs physiques qui les caractérisent. Pour ce qui concerne la mécanique, ces grandeurs sont la masse au repos et le moment cinétique intrinsèque.

Une autre raison au traitement préférentiel de la lumière peut être qu'en introduisant la théorie de la relativité la cinématique est le point principal d'attention. Les flashes de lumière et les horloges lumineuses dans et sur le côté des trains en mouvement jouent un rôle important. De cette manière encore, l'idée est exprimée que la lumière est une chose particulière en relativité. Ce point de vue peut être compris en considérant la situation au début du 20ème siècle. A cette époque, rien n'était connu à propos des ondes gravitationnelles qui se déplacent à la même vitesse que la lumière. On ne connaissait pas les neutrinos qui se déplacent avec presque la vitesse limite et il n'y avait pas d'accélérateurs ni de collisionneurs où beaucoup d'autres particules sont accélérées jusqu'à la vitesse limite.

Remède :

Dire qu'il y a une limite de vitesse qui contraint tous les corps et toutes les particules. Les photons et les gravitons se déplacent avec exactement cette vitesse, autant qu'on le sache. On a cru pendant un certain temps que c'était aussi vrai pour les neutrinos.

Sujet :

“L'introduction d'un 'éther luminifère' se révélera être superflue puisque la position qui sera ici développée ne fera pas appel à un 'espace absolument stationnaire' pourvu de propriétés particulières.” (Einstein [1])

“Il apparaît qu'il n'y a pas alors de base expérimentale acceptable pour l'idée d'un éther, c'est-à-dire, pour un repère de référence privilégié. Cela est vrai que l'on choisisse de considérer l'éther comme stationnaire ou entraîné.” [2]

Défaut :

Les expériences de Michelson et Morley ont montré que la vitesse de la lumière ne dépend pas du repère de référence dans laquelle elle est mesurée. Le résultat de leur expérience eut plusieurs conséquences pour la physique. L'une d'elles fut d'une importance considérable. Elle montra qu'une nouvelle théorie était nécessaire qui embrasse et modifie la mécanique classique et l'électrodynamique. L'autre a seulement indirectement à faire avec la première : il fut conclu qu'il n'y avait pas d'éther luminifère. Les deux conséquences sont souvent citées ensemble, presque comme si la non-existence de l'éther était simplement une des nombreuses nouvelles affirmations de la théorie de la relativité. En réalité, elle est parfois mentionnée seulement en passant, comme dans la publication de 1905 d'Einstein [1]. Ou bien il est supposé que la non-existence d'un repère de référence particulier est équivalent à l'affirmation de la non-existence d'un éther luminifère, voire notre seconde citation [2].

Nous allons montrer par une expérience de pensée, que les deux affirmations sont indépendantes l'un de l'autre, et que l'une ne peut être déduite de l'autre.

Une voiture roule à grande vitesse sur un tapis roulant, qui initialement est au repos. La vitesse de la voiture relativement au tapis est presque égale à c . Nous démarrons maintenant le moteur du tapis roulant, de telle sorte que le tapis se déplace dans la même direction que la voiture. Bien que la somme des vitesses de la voiture et du tapis soit plus grande que c , nous observons que la vitesse réelle de la voiture relativement à la terre ne dépasse pas c . Si nous faisons tourner le tapis roulant dans la direction opposée, la vitesse de la voiture demeure presque égale à c . Supposons maintenant que cette expérience fut faite à la place de l'expérience de Michelson-Morley. Qu'auraient conclu les expérimentateurs ? Ils auraient conclu qu'il y a une valeur limite pour la vitesse et qu'il n'est pas permis d'additionner les vitesses en changeant de repère de référence. Ces conclusions auraient mené à une nouvelle théorie, la théorie de la relativité. Cette théorie explique les résultats observés, qui initialement semblaient si étranges. Remarquez qu'en aucun cas les expérimentateurs auraient conclu que le porteur de la voiture, c'est-à-dire le tapis roulant n'existe pas. Toutefois, ce fut précisément cette conclusion qui a été tirée des résultats de l'expérience véritable de Michelson-Morley. Du fait que la vitesse de la lumière ne change pas par un changement du repère de référence, il fut conclu que le porteur de l'onde lumineuse n'existe pas.

Origine :

Tant qu'il n'y avait pas de théorie de la relativité, la conclusion qu'un éther luminifère n'existait pas semblait être la seule façon de résoudre le dilemme. Avec la théorie d'Einstein cependant, le problème obtint une solution d'une manière complètement nouvelle et inattendue. On peut considérer comme une gaffe qu'Einstein lui-même déclara que l'éther était superflu. Quelques années après sa première publication sur sa nouvelle théorie il reconnut son erreur : “...il n'y a pas d'espace vide, c'est-à-dire un espace sans un champ [gravitationnel]” [3]. Un peu plus tard il s'exprima encore plus clairement : “selon la théorie de la relativité générale l'espace sans un éther est inconcevable” [4].

Remède :

Laisser l'éther de côté tant que vous n'avez pas réellement affaire à lui. Sinon vous vous empêtrerez vite dans l'enchevêtrement des concepts éther, espace, champ gravitationnel et vide. Si vous citez Einstein en lien avec l'éther, ne citer que ses dernières déclarations.

[1] A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sur l'électrodynamique des corps en mouvement), Annalen der Physik und Chemie, Jg. 17, 1905, p. 891-921

[2] R. Resnick: Introduction to Special Relativity (Introduction à la relativité restreinte). New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968, p. 33

[3] A. Einstein: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (Sur la théorie de la relativité restreinte et générale). Berlin: Akademie-Verlag, WTB, 1973, p. 125

[4] A. Einstein: Äther und Relativitätstheorie (Ether et théorie de la relativité). Berlin: Verlag von Julius Springer, 1920, p.12

7

Oscillations et ondes

7.1 Fréquence de résonance et fréquence naturelle

Sujet :

Quand on traite des oscillations harmoniques entretenues, on met généralement l'accent sur le fait que la fréquence de résonance n'est pas exactement, mais seulement approximativement égale à la fréquence naturelle de l'oscillateur.

Défaut :

Que pouvons-nous faire avec une affirmation pareille ? Apparemment la nature n'est pas capable d'arranger les oscillations de façon convenable. D'abord nous apprenons qu'il y a résonance quand l'oscillateur est synchronisé avec le système moteur. Mais ensuite on nous dit que la fréquence de résonance et la fréquence naturelle de l'oscillateur ne coïncident pas exactement. La nature semble gâcher la partie. Devons-nous conclure que l'idée initiale n'est pas correcte ? Un malaise apparaît.

L'incohérence peut être facilement levée. La résonance signifie que l'énergie que l'oscillateur absorbe et dissipe présente un maximum en fonction de la fréquence d'excitation. Comme

$$P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}_0 ,$$

ce maximum est situé sur l'axe des fréquences à la même position que le maximum de vitesse. (Nous supposons que l'oscillateur est actionné par une force \mathbf{F}_0 d'amplitude constante. Les mêmes arguments sont valables quand l'action est effectuée avec une vitesse d'amplitude constante). Alors, la fréquence qui correspond au maximum d'amplitude de la vitesse est vraiment la fréquence naturelle. En conséquence, l'amplitude du mouvement ne peut pas avoir son maximum à la fréquence naturelle. De même la fréquence où l'accélération a son amplitude maximale ne coïncide pas avec la fréquence naturelle.

En partant de

$$x(t) = x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t)$$

on obtient

$$x'(t) = \omega \cdot x_0(\omega) \cdot \cos(\omega t) = v_0(\omega) \cdot \cos(\omega t)$$

et

$$x''(t) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) = a_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) .$$

Si l'amplitude de la vitesse $v_0(\omega) = \omega \cdot x_0(\omega)$ est maximale à la fréquence ω_{res} , alors ni l'amplitude de la position $x_0(\omega)$, ni celle de l'accélération $-\omega^2 \cdot x_0(\omega)$ n'ont leur maximum à cette fréquence. Ainsi la différence entre la fréquence naturelle et la "fréquence de résonance" est dû à un choix inapproprié de la grandeur considérée. De nombreuses autres grandeurs pourraient évidemment être représentées en fonction de la fréquence, et le maximum serait trouvé à différentes positions sur l'axe des fréquences. A partir de cette observation on ne conclura pas que la résonance se produit à des fréquences différentes selon le maximum de la grandeur à considérer.

Origine :

Sans doute notre tendance à mettre en avant ce que nous voyons avec nos propres yeux. Nous nous sommes accoutumés à considérer un problème mécanique comme résolu quand nous connaissons la trajectoire des corps, c'est-à-dire la position en fonction du temps. Mais nous devons admettre encore et encore qu'en mécanique les grandeurs quantité de mouvement et énergie sont plus fondamentales que les grandeurs cinématiques.

Remède :

Ne pas définir la résonance au moyen de l'amplitude de la position, c'est à dire la grandeur manifeste. Il y a résonance quand l'énergie absorbée est à son maximum.

Sujet :

En ce qui concerne les oscillations forcées en mécanique, les étudiants apprennent qu'à la résonance, il y a une différence de phase de $\pi/2$ entre le mécanisme moteur et l'oscillateur. Ce résultat est souvent formulé comme un point clé, par exemple :

"En cas de résonance, il existe une différence de phase $\Delta\Phi = \pi/2$."

ou :

"En cas de résonance, le pendule est en avance sur l'oscillation motrice d'un quart de période."

Défaut :

1. Une différence de phase fait toujours référence à deux grandeurs physiques qui dépendent du temps de façon sinusoïdale. Dans le cas de l'oscillateur harmonique entretenu, on ne dit pas toujours quelles sont les grandeurs concernées. Cependant, comme de toute façon on ne considère que la position, personne ne s'interroge sur les différences de phase entre les autres grandeurs. Mais on pourrait tout aussi bien avoir étudié d'autres déphasages. Ainsi l'une de ces grandeurs aurait pu être la vitesse, l'accélération, la quantité de mouvement du corps oscillant, ou la force qui agit sur lui. La deuxième grandeur aurait pu être la position, la vitesse ou l'accélération du mécanisme moteur. On pourrait choisir n'importe quelle paire de ces grandeurs et chercher la différence de phase correspondante. Cependant, la plupart de ces différences de phase ne sont pas faciles à interpréter, et cela est vrai aussi pour le déphasage dans les citations ci-dessus. Qu'apprenons-nous en sachant que le déphasage entre la position du mécanisme moteur et celle de l'oscillateur est de $\pi/2$?

2. Un oscillateur mécanique entretenu à ressort est composé des éléments suivants : un corps mobile, un ressort et un mécanisme moteur. Le fait que l'oscillation est amortie peut être pris en compte en ajoutant encore un quatrième composant, un amortisseur (dans l'analogie électrique ce serait une résistance). Ces quatre éléments peuvent être combinés de différentes façons. Le "circuit" mécanique peut avoir différentes topologies (de la même façon que le circuit électrique correspondant). De façon à définir de façon non ambiguë le comportement de l'oscillateur, nous devons aussi nous occuper des propriétés de la source d'énergie, c'est-à-dire le système moteur. Il ne suffit pas de demander que le mouvement du moteur soit sinusoïdal. Il faut décider quelle amplitude (si c'est le cas) reste constante quand on change la fréquence : celle de la position, de la vitesse, de la force, ou du courant d'énergie. La forme de la courbe de résonance dépend de ce choix. Parmi toutes ces combinaisons possibles, il y en a deux pour lesquelles le problème devient particulièrement clair :

- Les quatre éléments sont disposés en parallèle et l'amplitude de la force du mécanisme moteur est gardée constante, Fig. 1 ;
- Les quatre éléments sont disposés en série et l'amplitude de la vitesse du mécanisme moteur est gardée constante, Fig. 2.

(Dans le cas de circuits électriques, ces deux configurations de base existent également. Quand les éléments électriques sont connectés en parallèle, l'amplitude du courant doit être fixée, quand ils sont connectés en série, la tension de la source d'énergie est gardée constante).

Maintenant, les déclarations citées ci-dessus ne sont pas valides pour l'un ou l'autre de ces circuits de base, mais pour un hybride des circuits en parallèle et en série. De ce fait, l'interprétation de la déclaration sur la différence de phase est quelque peu difficile. Au contraire, dans le cas de chacun des circuits de base, l'interprétation est simple. Nous discuterons l'exemple du circuit en parallèle, Fig. 1.

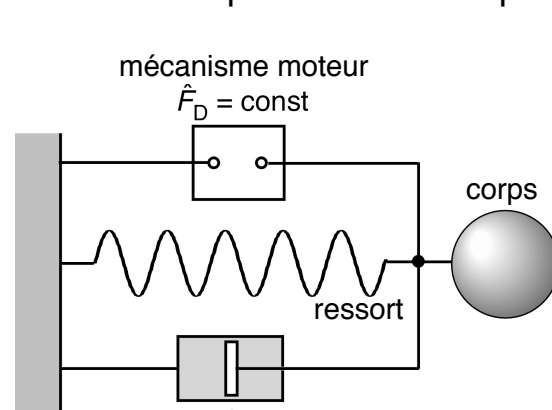


Fig. 1. : Un oscillateur parallèle avec une amplitude de force motrice constante

La résonance signifie que la moyenne en temps du courant d'énergie issu du mécanisme moteur (indice D) vers l'oscillateur

$$\bar{P} = \overline{v_D F_D}$$

a une valeur maximum. Avec

$$v_D = \hat{v}_D \sin(\omega t)$$

et

$$F_D = \hat{F}_D \sin(\omega t - \phi)$$

nous obtenons

$$\bar{P} = \frac{\hat{v}_D \hat{F}_D}{2} \cos \phi$$

Dans cette expression, les trois facteurs, à savoir \hat{v}_D , \hat{F}_D et $\cos \phi$ peuvent en principe dépendre de la fréquence. Pour "l'oscillateur en parallèle", Fig. 1, l'amplitude de la force \hat{F}_D est gardée constante, elle est indépendante de la fréquence. Chacun des deux autres facteurs a une valeur maximum à la fréquence de résonance. Ainsi pour la résonance nous avons $\cos \phi = 1$ ou $\phi = 0$. Cela signifie que la vitesse du mécanisme moteur et la force qu'il exerce sur l'oscillateur sont "en phase". Cette affirmation est plausible. De façon à exciter ou actionner un oscillateur de façon plus efficace, on doit pousser ou tirer plus fort quand l'oscillateur bouge plus vite.

Pour "l'oscillateur en série", Fig. 2, l'amplitude de la vitesse est indépendante de la fréquence. L'amplitude de la force et le $\cos \phi$ ont tous les deux une valeur maximum à la fréquence de résonance et nous avons encore $\phi = 0$.

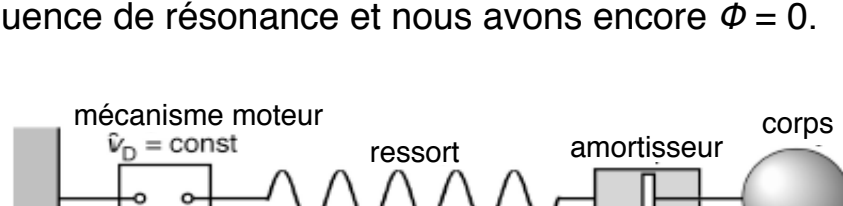


Fig.2. Un oscillateur en série a une amplitude de vitesse constante

La topologie d'oscillateur la plus fréquente en mécanique est celle de la Fig. 3. On peut montrer que cet oscillateur est mathématiquement équivalent à l'oscillateur en parallèle. Pour la force on doit écrire $D \hat{x}_D \sin(\omega t)$. Dans le cas de la résonance cette force est en phase avec la vitesse de l'oscillateur. On peut justifier ce fait de la même manière que le déphasage nul pour le circuit en parallèle. Comme le déphasage entre la position et la vitesse de l'oscillateur est $\pi/2$, les affirmations des citations du début s'ensuivent.

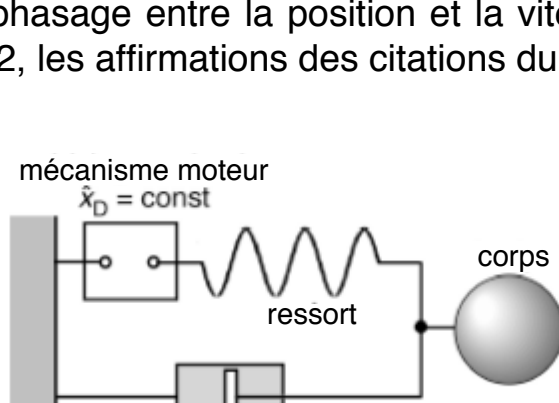


Fig.3. Forme hybride d'oscillateur en parallèle et en série

Origine :

Voir notre article précédent [1]. Mettre au centre de l'attention les amplitudes de la position du mécanisme moteur et de l'oscillateur correspond à la tradition de la mécanique de considérer un problème comme résolu quand on a déterminé la position en fonction du temps, c'est-à-dire quand nous avons calculé ce que nous voyons de nos yeux. Cependant, nous comprenons mieux la mécanique quand nous mettons en avant les grandeurs quantité de mouvement et énergie, ainsi que leurs courants respectifs.

Remède:

Considérer une différence de phase comme une fonction de la fréquence d'excitation ne vaut le coup que si la fonction correspondante est interprétée. Il est facile d'interpréter la différence de phase entre la force et la vitesse. Leur produit est le courant de l'énergie dissipée. Un déphasage nul contribue à rendre ce produit maximum pour la fréquence de résonance.

[1] F. Herrmann : Fréquence de résonance et fréquence naturelle, article 7.1

Sujet :

Dans les manuels de physique contemporains, le principe de Huygens n'est pas seulement utilisé pour expliquer la diffraction de la lumière par une fente unique, une fente double ou un réseau, mais aussi la réflexion et la réfraction d'une onde plane.

Défaut :

1. Le principe de Huygens (ou principe de Huygens-Fresnel) est un outil mathématique simple pour déterminer le motif d'interférence de deux ondes simples ou plus. Cependant, un principe particulier n'est pas nécessaire dans le cas des expériences d'interférence les plus simples et en même temps les plus importantes. Même sans le principe de Huygens on peut s'attendre à ce qu'une onde circulaire ou sphérique émerge d'une petite ouverture (petite comparée à la longueur d'onde) pratiquée dans un obstacle sur lequel vient buter une onde plane. On n'a pas non plus besoin d'un nouveau principe dans le cas où il y a deux telles ouvertures ou plus. De plus il n'y a aucune raison pour donner un nom particulier d' "ondes élémentaires" aux ondes circulaires émergentes. Le principe n'est utile que quand la fente est plus large que la longueur d'onde.

2. Le principe de Huygens n'est pas nécessaire non plus pour la description de la réflexion et de la réfraction, puisqu'il explique le comportement d'une onde plane par celui d'ondes circulaires. Une fonction peut être décomposée de bien des façons : en composantes harmoniques, en harmoniques sphériques, en fonctions de Bessel et en bien d'autres. Si l'on fait une telle décomposition, il est raisonnable de choisir un ensemble de fonctions de base qui prenne en compte la symétrie du problème. Ce n'est évidemment pas le cas quand on décompose une onde plane en "ondes élémentaires", c'est-à-dire en ondes circulaires. L'onde originale, c'est-à-dire l'onde plane, possède déjà le plus haut niveau de symétrie qu'une onde puisse avoir. La réflexion et la réfraction sont facilement comprises avec les ondes planes. Utiliser des ondes sphériques ou circulaires revient à expliquer de façon compliquée ce qui est simple.

Origine :

Le principe a été formulé par Huygens en 1690 dans son "Traité de la lumière". C'était 100 ans avant le grand âge de l'optique ondulatoire qui commença avec Fresnel et Young et 150 ans avant l'électrodynamique de Faraday et Maxwell. A l'époque de Huygens les lois de la réflexion et de la réfraction étaient connues, on savait que la vitesse de la lumière est finie, tout comme le fait que la lumière est composée de composantes colorées. Pourquoi alors ce principe a-t-il été si important à cette époque, et pourquoi a-t-il gardé son importance jusqu'à aujourd'hui ?

Une autre théorie de la lumière existait déjà à l'époque de Huygens : la théorie corpusculaire, d'abord introduite par Descartes et ensuite par Newton. Huygens opposa à cette théorie son idée de la lumière en tant qu'onde. A cette époque, le critère pour qu'une théorie soit bonne était principalement sa capacité à expliquer la réfraction et la réflexion.

Expliquer signifiait (et signifie toujours aujourd'hui) réduire un phénomène à un autre considéré comme fondamental et ainsi ne nécessitant pas d'explication. Cependant, depuis l'époque de Fresnel, la réfraction et la réflexion ne nécessitent pas d'ondes élémentaires pour être expliquées. Quand finalement Maxwell a montré que la lumière était une onde électromagnétique et l'a décrite mathématiquement, les ondes élémentaires de Huygens sont devenues assurément obsolètes, même s'il n'était pas clair pourquoi cela devrait être valide pour les ondes électromagnétiques transverses compliquées. C'est seulement Kirchhoff qui a réussi à montrer la compatibilité du principe de Huygens avec la théorie électromagnétique.

Le rôle que joue aujourd'hui le principe de Huygens à l'école et à l'université est encore marqué par son importance passée. Juste comme la loi de Lenz ou les lois de Kepler, il a survécu aux lois plus générales qui lui ont succédé. Il est vrai que cela reste encore une méthode utile pour déterminer de façon approchée des motifs d'interférence, mais nous devrions le ranger avec les nombreux autres outils de la physique et ne pas l'appeler un principe.

Remède :

On n'a besoin d'aucun principe particulier pour expliquer la diffraction par une fente simple et le motif d'interférence dû à une fente double ou un réseau. Si on ne peut pas décider de laisser le traitement de la grande fente à l'université, on peut alors introduire le principe de Huygens, mais avec une attitude plus modeste.

7.4 Diffraction par fente double et interférences lumineuses

Sujet :

Les expériences de fente simple et de fente double jouent un rôle important dans l'enseignement de la physique. Les motifs de diffraction sont largement discutés. L'expérience de fente double est présentée comme une preuve du caractère ondulatoire de la lumière. Plus tard elle est utilisée comme moyen de démontrer la nature des objets dits quantiques.

Défaut :

1. La diffraction de la lumière par une fente simple ou une fente double est traitée en détail et en profondeur, ce qui va au delà des standards d'une éducation générale. Quand Young a réalisé pour la première fois l'expérience de la fente double, celle-ci a joué le rôle d'une *experimentum crucis*. Aujourd'hui nous connaissons un si grand nombre d'autres preuves du caractère ondulatoire de la lumière que l'expérience de la fente double a perdu beaucoup de sa signification initiale. De plus nous savons que la lumière ne correspond qu'à une petite fraction du spectre électromagnétique. En ce qui concerne les autres types de rayonnement électromagnétique, nous nous préoccupons beaucoup moins de preuve de leur caractère ondulatoire. Nous tenons simplement pour acquis que ce sont des ondes – pour la bonne cause, puisque rien ne marcherait si ce n'était pas le cas.

2. Les expériences de diffraction par fente simple et fente double sont compliquées. Elles combinent deux phénomènes qui ne sont pas toujours clairement distingués : la diffraction et l'interférence. Quelquefois on a même dit qu'il n'y avait pas de différence entre eux.

3. Si l'on demandait à un(e) étudiant(e) sans parti pris de concevoir une expérience qui montre l'interférence de deux ondes lumineuses, il ou elle ne penserait certainement pas à celle de la fente double. L'idée évidente serait d'utiliser deux sources de lumière. C'est seulement quand l'étudiant(e) aura compris pourquoi une telle expérience ne marche pas, et même en utilisant deux lasers, qu'il ou elle acceptera qu'une idée plus sophistiquée est nécessaire. Une expérience bien conçue devrait donner à l'étudiant(e) le sentiment : "j'aurais pu y penser". L'expérience de la fente double ne fait sûrement pas partie de cette sorte.

4. En physique quantique l'expérience de la fente double est utilisée comme scène pour toutes sortes d'histoires contradictoires. La lumière est imaginée comme consistant en photons, c'est-à-dire de corps minuscules qui, pour se déplacer de la source de lumière au détecteur, doivent passer par l'une ou l'autre des deux fentes. Malgré tous les avertissements qui sont prononcés, l'idée de particules individuelles minuscules est indéracinable. Pour mettre l'accent sur le caractère particulier des photons, ils sont maintenant souvent appelés objets quantiques au lieu de particules. Mais même ainsi, quand on en parle, le langage reste le même que celui qui est utilisé pour parler de petites entités. En réalité, dès que se pose la question de savoir par quelle fente un photon est passé, on a déjà admis que l'on considère comme légitime l'idée de petits corps. En même temps, on a pris position sur la taille des particules : leur extension latérale doit être inférieure à la largeur de la fente.

Origine :

1. Avant les expériences de Young et la théorie de Fresnel, il y avait déjà de bons arguments en faveur des deux modèles de la lumière, le modèle ondulatoire et le modèle particulaire. Naturellement, on était convaincu que l'un seul pouvait être "vrai" : soit la lumière était une onde, soit elle consistait en particules. Avec les expériences de Young, le verdict semblait être rendu. Dans les décennies suivantes, on a trouvé bien d'autres arguments en faveur de la lumière en tant qu'onde, mais pas seulement. Avec la théorie de Maxwell 70 ans après les expériences de Young, on a compris la nature des ondes, ou au moins on a cru la comprendre. De plus, on a trouvé de plus en plus d'ondes de cette nature de part et d'autre du spectre de la lumière visible. En dépit de toutes ces nouvelles évidences de la nature ondulatoire de la lumière, dans l'enseignement on attribue encore aux expériences de Young l'importance d'être la seule preuve du caractère ondulatoire de la lumière.

2. La physique quantique a amené l'expérience de la fente double vers de nouvelles hauteurs. Nous apprenons de la mécanique quantique que nous nous sommes réjouis trop vite. La "véritable nature de la lumière" est plus complexe.

3. Il s'est développé une tradition stable dans laquelle aucun examen écrit de fin de lycée et d'entrée à l'université n'est imaginable sans un problème sur la diffraction d'une onde par une fente simple ou double.

Remède :

1. Quand on doit présenter de façon expérimentale l'interférence d'ondes lumineuses, expliquer d'abord de façon approfondie pourquoi l'expérience ne peut pas être faite avec deux rayons laser.

2. Au lieu de discuter des dispositifs de fente double ou de fente simple, utiliser un réseau depuis le début. Les résultats sont plus convaincants.

3. L'interféromètre de Michelson est plus approprié pour certaines raisons. L'avantage : pas de fonction sinusoidale, pas de diffraction.

4. Discuter du phénomène de diffraction avec des rayonnements pour lesquels l'effet est beaucoup plus important qu'avec la lumière : micro-ondes électromagnétiques, ou ondes sonores. Alors la question intéressante n'est pas de savoir pourquoi il y a diffraction de la lumière, mais au contraire, pourquoi la diffraction de la lumière visible est un effet si faible.

Sujet :

Dans les manuels le concept de cohérence est expliqué de diverses façons. Les citations suivantes sont tirées de livres différents :

- (1) "Les trains d'onde qui interfèrent les uns avec les autres sont dits cohérents, ceux qui n'interfèrent pas sont incohérents."
- (2) "Deux générateurs d'ondes, qui produisent un motif d'interférence permanent, sont dits cohérents. Pour cela, ils doivent osciller avec la même fréquence et un déphasage constant."
- (3) "Pour une source de lumière étendue, par exemple un filament incandescent, les trains d'ondes issus de différents points du filament et reçus par l'oeil, sont incohérents, c'est-à-dire qu'ils ont des phases et des directions de polarisation complètement différentes."
- (4) "Seule la lumière qui part d'un unique point d'une source lumineuse peut être amenée à interférer, après avoir été séparée et avoir suivi différents chemins."
- (5) "Comme la lumière qui est spontanément émise par un corps chaud est rayonnée depuis des atomes indépendants les uns des autres, il est exclu que deux sources différentes de lumière puissent exécuter par hasard la même oscillation, c'est à dire émettre des trains d'onde cohérents."
- (6) "Une fente de largeur d émet de la lumière cohérente tant que la relation suivante est vérifiée, 2α étant l'angle d'ouverture du cône de lumière :

$$d \cdot \sin \alpha < \lambda/2 . "$$

Défaut :

Il n'y a pas que les élèves du secondaire qui ont des problèmes avec le concept de cohérence, mais aussi les étudiants en université. Les définitions rapportées ci-dessus montrent qu'il n'y a pas de miracle. Certaines sont difficiles à comprendre par elles-mêmes. Mais les choses deviennent particulièrement difficiles quand on essaie de les réconcilier entre elles.

Dans la suite, les nombres entre parenthèses font référence aux numéros de nos citations.

Quel est l'objet auquel se réfère une affirmation sur la cohérence ? Selon les citations (1), (3) et (5), elles font référence à la relation entre deux "trains d'onde". Mais qu'est ce qu'un train d'onde ? L'onde entière ? Une partie de cette onde ? Quelle partie ?

Selon la définition (2), la cohérence exprime la relation entre deux générateurs d'onde. Il est dit que ceux-ci doivent osciller à la même fréquence et avec une différence de phase constante. Est-ce que cela veut dire qu'il existe des oscillateurs qui peuvent osciller avec la même fréquence et une phase qui n'est pas constante ?

La citation (6) attribue la cohérence uniquement à la lumière.

Maintenant la question est de savoir si ces définitions ne sont que différentes formulations du même fait, ou est-ce que certaines se contredisent ?

La définition (3) nous dit que seule la lumière issue d'un point est cohérente. La définition (4) fait une déclaration semblable. Mais qu'est-ce que veut dire deux points différents ? Y-a-t'il une distance maximum autorisée ? La définition (5) le dit plus clairement : la lumière issue d'atomes différents ne peut pas être cohérente. Cependant il est bien connu que la lumière d'une étoile lointaine est utilisée pour déterminer le diamètre de l'étoile au moyen d'un interféromètre de Michelson stellaire. Dans ce cas la lumière qui interfère provient de sources qui peuvent être éloignées l'une de l'autre d'un million de kilomètres.

Origine :

Toutes les phrases, de (1) à (6), consistent en déclarations pour dire soit comment créer de la lumière cohérente, soit comment démontrer la cohérence. Aucune ne nous dit quelle est la nature de la lumière cohérente. Mais si nous ne connaissons que la propriété ou la nature de la source, comment pouvons-nous juger de la cohérence d'un champ lumineux dont les sources sont inconnues ou non-spécifiées, comme par exemple les vagues à la surface de l'océan ?

Ici nous notons la tendance à décrire les processus de génération ou de détection d'un phénomène au lieu du phénomène lui-même. Généralement ces processus sont plus compliqués que le phénomène réel. Pour comprendre comment fonctionne une bicyclette, nous n'avons pas besoin de connaître le processus de fabrication en usine de ces bicyclettes. Pour comprendre ce qu'est une onde sonore, nous n'avons pas besoin de connaître le principe de fonctionnement d'un tuyau d'orgue ou de l'audition humaine.

Une autre source de quelques incongruités est la tendance à ne considérer un phénomène comme compris que quand il est réduit à une affirmation sur le comportement de quelques particules. La cohérence est un phénomène qui peut parfaitement être décrit au moyen de la théorie classique des ondes. Quand on cherche une interprétation dans le contexte des phénomènes quantiques, on s'empêtre facilement dans la jungle des modèles et des interprétations.

Remède :

Commençons avec deux remarques générales concernant le concept de cohérence :

1. La cohérence, qui peut être plus ou moins prononcée, est une propriété de la lumière. On comprend que la lumière doit ses propriétés à la source de lumière. Mais cela ne signifie pas que la cohérence ou l'incohérence soient des propriétés de la source.
2. La cohérence est une propriété locale de la lumière. Cela signifie qu'une distribution de lumière donnée peut être plus cohérente à un endroit qu'à un autre. Ainsi la cohérence spatiale de la lumière émise par une étoile est minimale à la surface de l'étoile et elle est presque parfaite (maximale) ici sur la Terre, c'est-à-dire à une grande distance de l'étoile.

Quand nous disons que la cohérence est une propriété locale, nous ne voulons pas dire que la cohérence peut être attribuée à un point au sens des mathématiques (dans ce sens aucune grandeur physique n'est locale).

La cohérence peut être expliquée ou définie de différentes façons. Elle se manifeste dans chaque théorie utilisée pour décrire la lumière : optique géométrique, optique ondulatoire classique, thermodynamique de la lumière et électrodynamique quantique. Comme c'est notre but d'expliquer le concept à un débutant, nous choisirons la plus simple de ces théories, c'est-à-dire l'optique géométrique. Après cela nous évoquerons comment cette explication se traduit en optique ondulatoire. Nous conseillons de ne pas tenter une explication à l'échelle atomique à l'école. C'est un sujet pour l'université.

Nous nous limitons à l'évaluation qualitative du degré de cohérence. Essayons de décrire la lumière dans un petit domaine de l'espace situé juste devant nous. Quelle sorte de rayons lumineux traversent cet espace ? Nous considérons quatre situations particulièrement simples.

Nous nous situons au milieu d'un brouillard dense. Notre domaine d'espace est traversé par des rayons lumineux dans toutes les directions. La lumière est un mélange de lumières de toutes les couleurs du spectre, schématisées sur la Fig. 1 par des lignes avec différents pointillés.

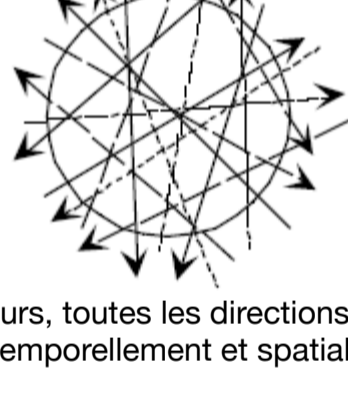


Fig. 1. Toutes les couleurs, toutes les directions. La lumière est incohérente temporellement et spatialement.

Ensuite nous supposons qu'il fait nuit, avec encore un brouillard épais, et qu'il y a un lampadaire émettant une lumière monochromatique. Là encore, la lumière dans notre domaine provient de toutes les directions, Fig. 2.

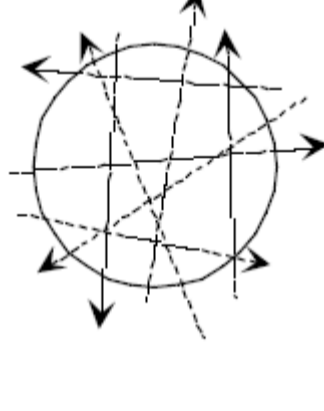


Fig. 2. Une seule couleur, toutes les directions. La lumière est cohérente temporellement.

Dans la troisième situation, il fait nuit, il n'y a pas de brouillard, pas de lune, pas d'étoiles visibles. A grande distance, une source de lumière incandescente. Tous les rayons lumineux qui traversent notre domaine ont alors la même direction, mais il s'agit de lumière avec un spectre composé de beaucoup de couleurs, Fig. 3.

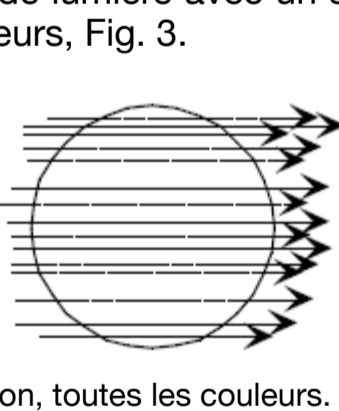


Fig. 3. Une seule direction, toutes les couleurs. La lumière est cohérente spatialement.

La dernière situation est semblable à la précédente, mais avec une lampe qui émet une lumière monochromatique, Fig. 4. Alors tous les rayons ont la même direction et le spectre de la lumière ne présente qu'une seule couleur.

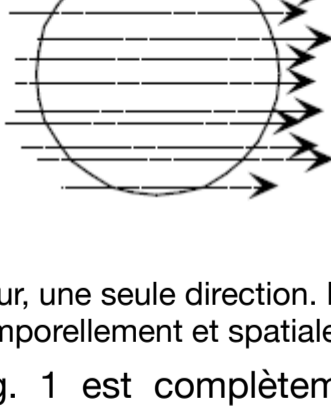


Fig. 4. Une seule couleur, une seule direction. La lumière est cohérente temporellement et spatialement.

La lumière de la Fig. 1 est complètement incohérente. Celle de la Fig. 2 est appelée "temporellement cohérente". Ainsi la lumière cohérente est monochromatique. La lumière de la Fig. 3 est spatialement cohérente. Ainsi cohérent spatialement est le contraire de diffus. Finalement, la lumière de la Fig. 4 est cohérente temporellement et spatialement.

Il y a ici encore une analogie ou une allégorie qui peut être racontée aux étudiants. Considérons un cageot de pommes. Les pommes ont une grande variété de couleurs et de tailles. Nous voulons les classer. Nous commençons par les assortir suivant la taille dans 10 boîtes différentes, chaque boîte pour un intervalle de taille donné. Dans chaque boîte les pommes sont alors uniformes vis-à-vis de l'un de nos critères, c'est-à-dire la taille. Ensuite nous assortissons les pommes de chaque boîte dans 10 boîtes plus petites suivant la couleur. En tout, nous avons maintenant 100 boîtes. Dans chacune de ces boîtes les pommes sont uniformes vis-à-vis des deux critères, la taille et la couleur.

La similitude entre les pommes et la lumière va même plus loin. Il est évident que nous pouvons obtenir des pommes uniformes à partir de l'état initial, seulement en triant celles qui ne correspondent pas à la taille et à la couleur désirées. Il n'est pas possible de transformer les pommes multi-couleur et multi-taille en pommes uni-couleur et uni-taille, de la même façon qu'il n'est pas possible de transformer de la lumière incohérente en lumière cohérente – ce qui voudrait dire destruction d'entropie et ainsi violation du deuxième principe.

On peut, au contraire, dès le départ, faire pousser des arbres qui produisent des pommes uniformes. De la même façon, nous pouvons dès le début utiliser une source de lumière qui produit de la lumière cohérente, c'est-à-dire un laser.

Pour finir, un mot sur la description de la cohérence en optique ondulatoire. La lumière est cohérente temporellement quand la dispersion de l'amplitude du vecteur k est faible, elle est cohérente spatialement quand la dispersion angulaire de k est faible. Il est facile de décrire la cohérence en regardant des vagues, par exemple les vagues à la surface d'un lac. Il peut y avoir des sections du champ de vagues qui ressemblent à des ondes sinusoïdales. Ces sections ont une certaine longueur et une certaine largeur. La longueur est une mesure de la cohérence temporelle, la largeur celle de la cohérence spatiale.

Sujet :

Au tout début du chapitre sur les ondes, les étudiants apprennent la définition des concepts d'ondes longitudinales et transverses :

“Pour une onde transverse le déplacement des sections individuelles du porteur d'onde est perpendiculaire à la direction de propagation. Pour une onde longitudinale elles oscillent en avant et en arrière dans la direction de propagation.”

Plus loin, quand le sujet est l'électrodynamique, ils apprennent :

“La lumière peut être polarisée. Ainsi, c'est une onde transverse dont les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} oscillent perpendiculairement à la direction de propagation.”

Habituellement, la distribution de l'intensité des champs électrique et magnétique dans l'espace est illustrée par un schéma comme celui de la Fig. 1.

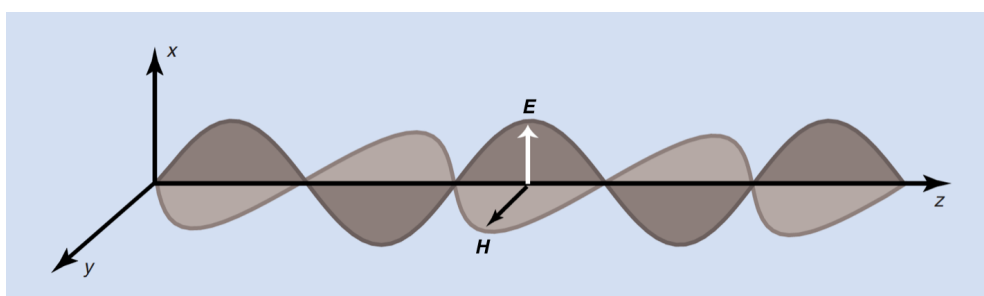


Fig.1. “Instantané” de l'intensité des champs électrique et magnétique d'une onde sinusoïdale.

Défaut :

D'après la définition qu'apprennent nos étudiants, dans une onde transverse le porteur d'onde *se déplace* perpendiculairement à la direction de propagation. Si nous prenons cette définition littéralement, alors une onde électromagnétique n'est pas une onde transverse, puisque dans une telle onde rien ne bouge. Bien sûr on pourrait soutenir que la phrase n'est pas à prendre littéralement mais seulement de la façon dont nous parlons en temps normal quand nous disons que la température ou le cours de la bourse “évolue”.

Cependant, le “mouvement” semble être pris trop au sérieux par les étudiants. Nous soupçonnons que ce défaut est dû en partie à l'image de la Fig. 1 qui est reproduite systématiquement dans les livres de cours : un instantané du mouvement de l'extrémité du vecteur de l'intensité des champs électrique et magnétique.

Vous pouvez facilement trouver que quelque chose n'est pas compris, en faisant passer un examen de physique à l'université. Si vous demandez une figure sur les lignes de champ à l'intérieur de la salle où se passe l'examen pour les ondes radio provenant d'une station voisine, les étudiants répondent d'habitude en faisant le schéma de la Fig. 1. Quand vous faites remarquer que ce n'est pas une représentation de lignes de champ, les étudiants sont généralement perplexes. Apparemment ils interprètent le schéma de la Fig. 1 dans le sens de notre citation : un mouvement. Ce qui rend l'interprétation de la figure quelque peu difficile, est le fait que d'abord un système de coordonnées spatiales est dessiné, et ensuite que deux autres grandeurs physiques \mathbf{E} et \mathbf{H} sont représentées. Nous connaissons cela pour la mécanique, où sont souvent dessinés des vecteurs force dans une scène qui représente un objet dans l'espace normal. Dans notre cas, il y a la difficulté supplémentaire que les valeurs de \mathbf{E} et \mathbf{H} changent en tout point, et que leur dépendance fonctionnelle n'est montrée que pour une seule coordonnée de l'espace. Cela semble suggérer fortement une oscillation dans le sens d'un mouvement.

Origine :

Une transcription quelque peu irréfléchie de la mécanique vers l'électrodynamique, de la définition des concepts d'onde longitudinale et transverse. Il peut y avoir une raison historique pour que la métaphore de l'oscillation soit si largement utilisée en électrodynamique. Dans des temps plus anciens, les étudiants apprenaient : “la lumière est une onde transverse de l'éther.” Et cela était compris dans le sens de la définition mécanique du concept d'onde transverse.

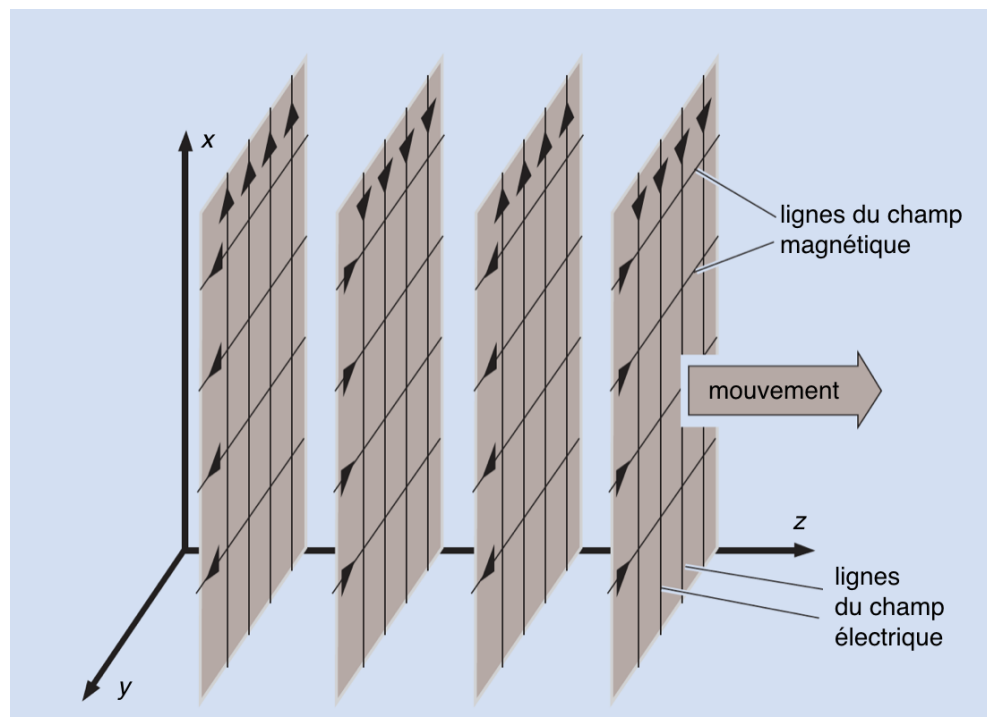


Fig.2. Image des lignes de champ d'une onde électromagnétique périodique

Remède:

Expliquer la distribution de l'intensité du champ dans une onde (périodique) avec un schéma comme celui de la figure 2, au lieu de celui de la figure 1.

Sujet :

Que signifie la dénomination “lumière non polarisée” ? Les citations suivantes essaient d’apporter une réponse.

“Les vecteurs de champ \mathbf{E} de l’onde lumineuse n’oscillent dans aucune direction préférentielle. On parle de polarisation quand les vecteurs de champ \mathbf{E} se déplacent d’une manière bien déterminée. En général la lumière blanche n’est pas polarisée.”

“En général un rayonnement électromagnétique est la superposition d’un grand nombre d’ondes uniques avec différentes orientations des plans d’oscillation et avec des phases différentes.”

“En général la lumière naturelle n’est pas polarisée. Elle prend sa source dans les transitions atomiques d’un grand nombre d’atomes. Chaque atome émet une onde lumineuse, dont la direction de polarisation est distribuée dans l’espace de façon statistique, de sorte que le plan d’oscillation de la lumière émise varie continuellement.”

Quelquefois la lumière non polarisée est représentée par un schéma tel que celui de la figure 1, qui apparemment est supposé être un instantané de l’intensité du champ électrique (plus exactement de l’extrémité du vecteur la représentant) au-dessus de la coordonnée de position dans la direction de propagation de la lumière. On peut voir différentes “ondes” en même temps au même endroit.



Fig.1 “Instantané” de l’extrémité du vecteur intensité du champ électrique dans une onde électromagnétique. Est-ce-que l’onde est non polarisée ?

Défaut :

Il n’est pas difficile de comprendre le concept d’une onde électromagnétique polarisée. Il n’est pas difficile non plus de comprendre le fonctionnement d’un polariseur. La question de savoir comment nous imaginons la lumière non polarisée semble plus difficile. Cette question est quelque peu négligée dans les manuels scolaires.

Il existe plusieurs théories de la lumière : l’optique géométrique, l’électrodynamique classique, l’électrodynamique quantique et la thermodynamique. Selon laquelle de ces théories est appliquée, l’explication de ce qu’est la lumière non polarisée est sensiblement différente. Nous nous limiterons ici à l’électrodynamique classique.

L’état de polarisation d’un faisceau lumineux est mieux décrit en s’intéressant au comportement en fonction du temps du vecteur intensité du champ électrique dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation ; ou sous forme d’une représentation graphique, sur le mouvement dans ce plan de l’extrémité du vecteur. (Nous admettons que le faisceau lumineux est homogène dans son extension transversale.)

La lumière peut exister dans plusieurs états de polarisation. Les plus importants et les mieux connus sont la polarisation linéaire, la polarisation elliptique (avec comme cas particulier la polarisation circulaire) et l’absence complète de polarisation.

Dans le cas de la polarisation linéaire, l’extrémité du vecteur décrit un mouvement harmonique, dans celui de la polarisation elliptique un mouvement elliptique. Il y a beaucoup d’autres possibilités pour conditionner la lumière de telle façon que l’extrémité du vecteur suive un mouvement plus ou moins régulier, comme les courbes de Lissajous. Quand la lumière n’est pas polarisée, l’extrémité du vecteur se déplace sur des courbes irrégulières sans aucune périodicité. La vitesse moyenne de ce mouvement dépend de la température de la lumière et la longueur du vecteur de l’intensité de la lumière. A la fois la direction et le module changent de façon irrégulière. Nous pouvons aussi décrire le vecteur par ses composantes cartésiennes. Nous dirions ainsi : les deux composantes x et y du vecteur varient de façon irrégulière. Dans les deux descriptions il y a deux contributions au “désordre” de l’état de la lumière et ainsi à l’entropie qui est transportée par le faisceau lumineux.

En ce qui concerne nos citations :

1. La première citation dit que les vecteurs du champ \mathbf{E} oscillent et qu’ils n’ont pas de direction préférentielle. Nous entendons généralement par oscillation un processus périodique. Cependant dans le cas de la lumière blanche, l’extrémité du vecteur n’a pas un mouvement périodique, mais irrégulier.
2. La seconde citation dit que le rayonnement thermique est la superposition d’ondes simples. Cette affirmation va un peu trop loin. D’abord on devrait spécifier ce que l’on entend par “onde simple”. On pourrait penser que cela signifie une onde sinusoïdale. Alors les ondes simples seraient simplement les composantes harmoniques de la lumière. S’il s’agit bien de cela, il serait plus approprié de dire que le rayonnement peut être décomposé en de telles composantes, tout comme il peut être décomposé de bien d’autres façons. Mais il se peut qu’il ne s’agisse pas des composantes harmoniques. Notre troisième citation donne une indication.
3. “Chaque atome émet une onde lumineuse, dont ...”. Ici nous voyons que l’onde lumineuse ne peut pas être une onde sinusoïdale pure. Comme elle prend son origine dans un atome, elle a un début et une fin. D’après la conception qu’ont beaucoup d’étudiants, une telle “onde lumineuse” est un objet qui peut être identifié individuellement ou au moins imaginé. Ici le photon hante probablement les alentours, mais sous une forme quelque peu vulgarisée : un petit objet qui ressemble à un bout de fil à qui l’on a donné une forme ondulée. Il conserve son individualité même quand il fait partie d’un rayon lumineux. Quelques figures dans des manuels encouragent une telle idée.
4. Des manuels montrent souvent des figures qui illustrent le principe de fonctionnement d’un filtre polarisant. Quelquefois ces figures sont comme celles de la Fig. 1. Dessus, on montre trois “ondes individuelles”. Elles ont la même longueur d’onde et sont en phase. La figure ne montre pas de quelle longueur elles sont. Quand on considère seulement la partie qui est représentée, la superposition résulte simplement en une onde polarisée linéairement. L’idée que son état soit celui d’une onde avec un maximum de désordre (ou d’entropie) n’apparaît pas sur la figure.

Origine :

Il semble que les problèmes aient plusieurs causes.

1. Quand les étudiants apprennent que la lumière est une onde transverse, ils peuvent croire que l’extrémité du vecteur intensité du champ doit osciller dans une direction perpendiculaire à la propagation de l’onde.
2. Une tendance à croire qu’une onde *consiste* en composantes spectrales au lieu de voir ces composantes comme un résultat de notre décomposition arbitraire. L’onde semble consister en elles comme un livre consister en pages.
3. Une idée quelque peu naïve du photon. La lumière consiste dans ces entités, mais pas les ondes radio.
4. La terreur de considérer la lumière d’un point de vue thermodynamique.

Remède:

La lumière blanche, qui est complètement incohérente, est omniprésente. Donc, ne pas hésiter à décrire la distribution de l’intensité du champ d’une telle lumière et discuter les contributions variées de cet état au désordre.

Ne pas spéculer sur la “vraie nature” de la lumière. Rester attaché à ce que nous savons : comment décrire l’état de polarisation et d’absence de polarisation au moyen de l’électrodynamique. Un peu de thermodynamique dans les arguments n’est pas dangereux.

Eviter le mot oscillation quand on décrit la lumière non polarisée. Le vecteur intensité du champ n’oscille pas ; il est animé d’un mouvement chaotique.

8

Physique atomique et quantique

8.1 Le concept de trajectoire en mécanique quantique

Sujet :

“En mécanique quantique, du fait du principe d’incertitude de Heisenberg, la notion de trajectoire d’une particule n’a plus de sens.” Nous connaissons tous l’énoncé sous cette forme ou sous une forme similaire.

Défaut :

Que signifie cette affirmation ? Signifie-t-elle que le concept de trajectoire a un sens dans tout autre contexte ou dans chaque autre branche de la physique qui n’est pas la mécanique quantique ? Quel est alors le sens d’une trajectoire en thermodynamique ? Quel est le sens en optique géométrique ? Ou en optique ondulatoire ? Quel est le sens dans notre vie de tous les jours ? Qui ou quoi peut prétendre à avoir une trajectoire ? Quelle est la trajectoire d’un nuage ? Quelle est la trajectoire d’une somme d’argent qui est transférée ? Ou des données transmises par internet ? Que le concept de trajectoire n’ait pas de sens n’est pas une exception, c’est la règle.

Alors pourquoi est-il si remarquable que le concept n’ait pas de sens en mécanique quantique ? Parce que nous utilisons un modèle qui ne convient pas : le modèle de corps ponctuel qui peut être suivi individuellement. On se retrouve alors à réparer les dégâts alors que le problème est créé de toute pièce.

Considérons un état stationnaire, par exemple l’état fondamental de l’atome d’hydrogène. Ni la théorie, ni l’expérience ne nous disent que l’électron est ponctuel. Ni la théorie, ni l’expérience ne nous disent que quelque chose se déplace. Si nous n’avions pas amené nos étudiants à croire dans les objets minuscules tournant à toute vitesse, le démenti concernant la trajectoire n’aurait pas été nécessaire.

Origine :

Le modèle particulaire selon lequel tout ce qui se produit dans le monde physique peut être réduit au mouvement de petites “particules” individuelles et à leur interaction fut extrêmement fructueux jusqu’au tournant du 20^{ème} siècle.

Il est compréhensible qu’on rechigne à se débarrasser d’un outil aussi puissant. Pourtant, l’outil fut ensuite également appliqué pour des buts auxquels il n’était pas approprié. Il fut ajusté ou déformé jusqu’à ce qu’il perde sa force originelle. Ainsi se présenta l’interprétation probabiliste de la mécanique quantique, qui est si difficile à accepter pour le sens commun.

Bien que nous physiciens nous le connaissions mieux, nous contribuons constamment à garder vivant ce modèle inapproprié. Il n’y a pas d’examen où le modèle de Bohr n’est pas demandé. Et même l’étudiant qui ne sait pas grand chose connaît le modèle de Bohr, dont nous avons montré l’insuffisance pour nos objectifs.

Il y a bien d’autres cas où nous racontons ou suggérons à nos étudiants, ce qu’en principe nous aimerions effacer. Bien qu’il n’y ait pas de livres où cela est écrit, les étudiants l’entendent très souvent : les électrons *tournent autour du noyau*. Les étudiants entendent l’énoncé incorrect plus souvent que celui qui est correct.

Remède :

Faites confiance en ce que la mécanique quantique nous dit. Sa fiabilité est bien établie. N’utilisez pas de modèles qui eux-mêmes sont la cause de problèmes de compréhension.

8.2 Illustrations de l'atome

Sujet :

Notre sujet est une image qui est familière, pas seulement aux physiciens. Nous ne la reproduirons pas ici pour les raisons qui deviendront claires dans un moment. C'est l'image ou l'illustration de l'atome : le noyau comme une petite structure sphérique, entouré par des ellipses, les trajectoires des électrons, sur lesquelles parfois les électrons eux-mêmes sont montrés comme des petits corps sphériques.

Défaut :

“Une image vaut mieux qu'un long discours.” Une image est plus facile à mémoriser qu'une description verbale ou mathématique d'un objet. Les images sont des outils essentiels pour l'enseignant. Toutefois, puisqu'elles sont si facilement assimilées, elles peuvent parfois faire obstacle au processus d'apprentissage poursuivi. Elles le font lorsqu'elles décrivent un sujet de manière incorrecte ou d'une façon qui ne correspond pas à l'intention de l'enseignant. Ce sont des images qui ne sont pas choisies par l'enseignant, mais qui hantent le monde et se reproduisent d'elles-mêmes. Elles peuvent être si importunes que personne ne peut leur échapper. Même ceux qui connaissent leur effet nuisible succombent à leur pouvoir suggestif. Un exemple est l'image de l'atome qui vient d'être mentionnée et qui correspond au modèle de Bohr. Nous la trouvons dans des livres et des journaux de vulgarisation de la science, nous tombons sur elle fondue dans le bronze comme emblème sur le portail principal de sociétés, elle est reproduite en millions de copies sur des timbres et sur des billets de banques, et elle est également trouvée de façon étonnamment fréquente sur des journaux de physique spécialisés.

Ce qui est reproché à ces représentations est que depuis l'avènement de la mécanique quantique, elles ne correspondent simplement plus à notre idée de l'atome. Nous passons une part significative de notre temps d'enseignement pour montrer la faiblesse de cette image et pour expliquer pourquoi elle doit être remplacée par une autre représentation. Mais dans l'esprit des étudiants l'image est déjà gravée, de telle sorte que nous n'aurons qu'un succès limité. Et ce qui reste imprimé dans les esprits après une plus longue période de temps, ce sont seulement les corps tournants du modèle de Bohr.

Origine :

Les images apparurent avec l'introduction du modèle de l'atome par Rutherford et Bohr. Mais moins de 20 ans plus tard, lorsque Schrödinger (et Heisenberg, Born et Jordan) inventèrent la mécanique quantique, elles devinrent dépassées.

Cependant, le premier modèle réussi a toujours un avantage sur les modèles suivants. Le modèle plus jeune doit logiquement remplacer le plus vieux. Mais en physique un tel processus est rarement couronné de succès.

Remède :

Le modèle de Bohr de l'atome et les images correspondantes sont un sujet très intéressant pour l'histoire de la physique. Pour l'enseignement de la physique, cependant, ils sont contre productifs. Nous ne pouvons essayer de lutter contre ces corps volant sur des trajectoires elliptiques que par d'autres images qui soient plus belles et évocatrices, comme par exemple les représentations colorées de la distribution de ψ^2 .

8.3 L'atome vide

Sujet :

Puisque le noyau atomique est petit et lourd comparé à la couche électronique d'un atome, il est souvent conclu que la majeure partie de l'atome est vide. Les électrons sont supposés être ponctuels. (Parfois cela est dit explicitement, parfois insinué). Ainsi de l'espace occupé par l'atome entier, seule une infime fraction est occupée par de la matière : "un atome consiste essentiellement en de l'espace vide, peuplé seulement par un noyau minuscule et par les électrons."

Défaut :

1. L'affirmation à propos du caractère vide de l'atome dépend du modèle qui est utilisé. Elle est vraie si nous imaginons ou modélisons l'électron comme un petit individu avec la propriété remarquable de pouvoir se mouvoir sans avoir une trajectoire. Pour décrire un tel comportement, le concept de densité de probabilité fut introduit. Selon un autre modèle (le modèle « substance ») l'électron occupe l'espace entier qui est couvert par sa fonction d'onde. Le carré de la fonction d'onde est une mesure pour une sorte de matière d'électron distribuée dans l'espace. De là, la taille de l'électron est celle de son orbitale. Puisque l'orbitale n'a pas de surface frontière bien définie, le rayon de Bohr pourrait être pris comme une taille effective de l'électron.

2. Si l'on a opté pour le modèle de l'électron ponctuel, il serait conséquent d'appliquer le même modèle au noyau, c'est-à-dire aux protons et aux neutrons qui sont composés de quarks ponctuels. Dans ce cas non seulement la plus grande partie de l'atome consisterait en de l'espace vide, mais l'atome en entier, et ainsi le monde entier. A l'évidence cette affirmation est plutôt inutile.

Origine :

L'expérience de Rutherford qui a suggéré que le noyau est un petit corps compact.

Remède :

L'intention initiale était d'exprimer un simple fait : la masse du noyau est bien plus grande que celle de la couche électronique. Toutefois, cela peut être énoncé sans se référer à l'espace vide problématique. D'ailleurs, on ne devrait pas oublier que la couche électronique ne se montre à son désavantage qu'en ce qui concerne la comparaison des masses. Mais la masse est seulement l'une des grandeurs extensives qui caractérise une particule. Pour la charge électrique, le noyau et la couche électronique sont à égalité. De même pour le moment cinétique. Et quand on compare les moments magnétiques, c'est la couche électronique qui gagne.

8.4 Couches électroniques

Sujet :

Pour expliquer différentes propriétés de l'atome, comme par exemple la périodicité des rayons atomiques ou les énergies d'ionisation en fonction du nombre atomique croissant, on fait usage du modèle de la couche électronique. Pour justifier l'existence des couches, on représente souvent $r^2 \cdot \rho(r)$, c'est-à-dire la densité d'électrons d'un atome à plusieurs électrons, multipliée par r^2 comme une fonction de la distance r au noyau. La représentation graphique correspondante montre également, ainsi qu'il est dit, "que la probabilité de trouver l'électron dans la région occupée par le noyau est extrêmement faible".

Défaut :

Alors que la densité de probabilité électronique décroît de manière monotone lorsque r augmente, Fig. 1a, la fonction $r^2 \cdot \rho(r)$ est nulle au centre, c'est-à-dire dans la région du noyau et a plusieurs maxima pour r croissant. Enfin, pour de grandes valeurs de r , elle tend vers zéro à nouveau, Fig. 1b.

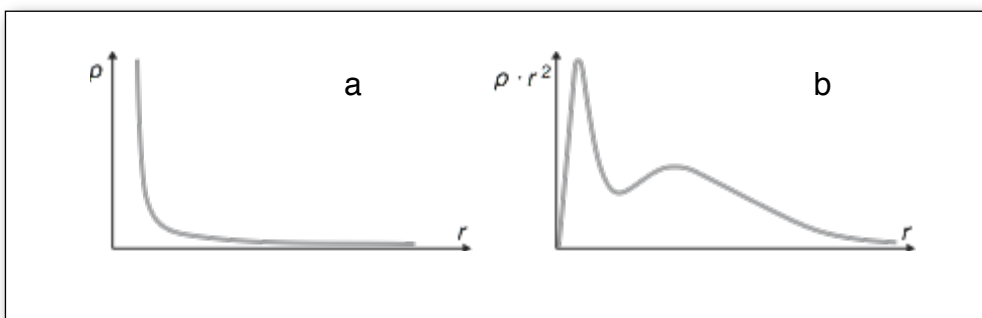


Fig. 1. (a). Densité de probabilité dans un atome. (b) Densité intégrée sur l'angle solide

La fonction de la Fig. 1b n'est pas la densité de probabilité spatiale normale, mais la probabilité par intervalle de rayon dr . Certains manuels signalent qu'une astuce est utilisée, d'autres ne le font pas. De toute manière, il est difficilement évitable que le lecteur confonde l'expression correspondant à l'axe vertical avec la densité elle-même. Notre expérience avec des étudiants en physique à l'université nous a montré que les étudiants mémorisent la forme du diagramme et que l'axe vertical représente la densité de probabilité. En particulier ils croient que la densité de probabilité est nulle au centre et qu'il existe des régions de la couche électronique où la densité est particulièrement élevée.

L'exemple qui suit va montrer qu'une représentation de $r^2 \cdot \rho(r)$ peut effectivement déconcerter quand on essaie d'avoir une idée à propos d'une distribution de densité. Nous nous intéressons à la distribution de masse d'une sphère en verre massif. Nous traçons à la fois sa densité massique $\rho(r)$, Fig. 2a, et l'expression $r^2 \cdot \rho(r)$, Fig. 2b en fonction de r (la distance au centre). Evidemment, pour avoir une idée sur la distribution de masse dans la sphère,

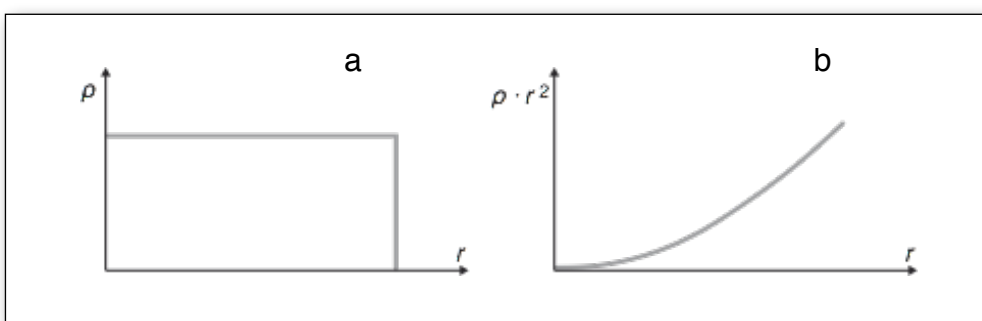


Fig. 2. (a). Densité massique dans un objet sphérique massif. (b) Densité massique intégrée sur l'angle solide

il est mieux de regarder la Fig. 2a.

L'affirmation qu'il est bien moins probable de trouver un électron à l'intérieur du noyau que plus loin à l'extérieur, est du même ordre que l'énoncé suivant : il est bien moins probable de trouver un gagnant à la loterie à Berkeley que dans le Nevada. En statistique, cette erreur est appelée biais d'échantillonnage.

Origine :

Apparemment certains physiciens ne sont pas satisfaits de disposer d'un modèle commode qui fait quelques prévisions correctes. Ils cherchent à reconnaître les couches dans la distribution de densité. De plus, ils semblent avoir des problèmes avec l'idée que la probabilité de trouver un électron à l'intérieur du noyau n'est pas nulle.

Remède :

La représentation de $r^2 \cdot \rho(r)$ ne possède pas un avantage substantiel, mais est la cause de conceptions erronées. Nous recommandons de représenter seulement la densité $\rho(r)$.

8.5 La fonction d'onde

Sujet :

“La fonction d'onde elle-même n'a pas de signification physique directe.”

“... ψ ne représente pas une grandeur qui puisse être mesurée directement comme une longueur ou l'intensité d'un champ.”

“Le fait que la fonction d'onde ne soit pas réelle, mais complexe, reflète, entre autres choses, que $\psi(\mathbf{r},t)$ n'a pas de signification physique réelle comme par exemple l'intensité du champ électrique $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ d'une onde lumineuse en optique classique ou en électrodynamique respectivement (en électrodynamique quantique aussi \mathbf{E} n'a pas de signification physique réelle).”

Défaut :

Il y a des principes en physique qui m'apparaissent comme particulièrement transcendants, quand j'étais encore un étudiant. Ils semblaient être des propositions qui avaient à voir avec les fondements mêmes de la science. Ils étaient inattendus et je ne pouvais pas vraiment les comprendre, et la raison pour laquelle on en avait besoin n'était pas claire pour moi. Parmi ces propositions figure celle énonçant que la fonction d'onde ne peut pas être mesurée directement. Bien qu'elle ne fut mentionnée qu'en passant par le professeur, cette affirmation était gravée dans mon esprit. Et elle a fait son chemin jusque dans les manuels.

Donc, pourquoi la fonction d'onde ne peut être mesurée directement ? Deux types de justifications peuvent être trouvés : 1. Le fait que c'est une grandeur complexe. Cependant, il y a d'autres grandeurs complexes. Chacun sait comment les utiliser. Il n'y a pas d'avertissement que ce sont des grandeurs qui ne sont pas mesurables. 2. L'affirmation que la valeur absolue de ψ reflète la distribution de la densité électronique, mais que la phase est arbitraire et non mesurable. Mais ce n'est pas tout à fait correct. La phase se manifeste dans la densité de courant (souvent appelée la probabilité de densité de courant) et celle-ci peut être mesurée. Ainsi (au moins pour les fonctions d'onde liées à une seule particule) la fonction d'onde est complètement déterminée par la densité et la densité de courant.

En insistant sur le fait qu'une grandeur ne peut être mesurée directement, on devrait préciser ce qu'une mesure directe signifie. Dans ce contexte on cite souvent l'intensité du champ électrique, mais la mesure de cette grandeur n'est pas vraiment ce qu'on aimerait qualifier de mesure directe. On utilise une charge test qui modifie le champ qui est à mesurer de telle manière que, à la position de la charge test, il n'y a pas la moindre ressemblance avec le champ initial.

Origine :

L'interprétation probabiliste de Max Born nous gêne pour associer une quelconque idée intuitive à la fonction d'onde.

Remède :

L'affirmation que la fonction ψ ne peut être mesurée directement n'a aucun sens tant que l'on ne précise pas ce qui est entendu par mesure “directe”. La volonté d'énoncer un tel avertissement disparaîtra probablement en utilisant un autre modèle (ou “interprétation”) du carré de la fonction d'onde, par exemple celle de Schrödinger et Madelung qui interprètent ψ au carré comme une mesure d'une distribution continue de la masse et de la charge du nuage électronique.

Sujet :

Lors du traitement des lois statistiques de la mécanique quantique, il est souligné que les particules sont identiques ou indiscernables.

“Deux particules sont dites identiques, lorsque le résultat de la mesure de toute grandeur ou caractère observable du système est invariant par interversion des particules.”

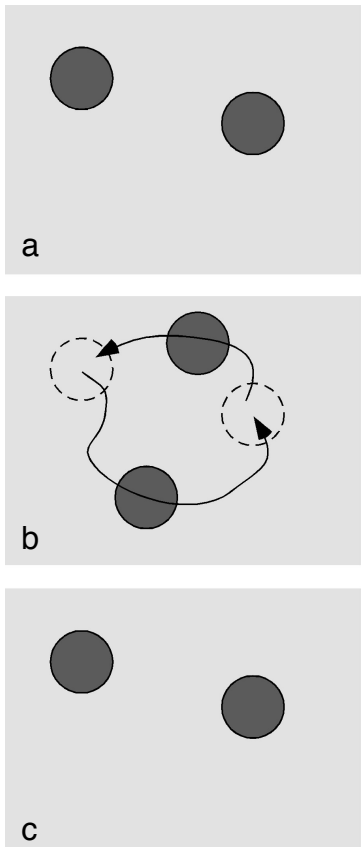
“Deux particules sont dites identiques, si elles coïncident dans toutes leurs propriétés intrinsèques (masse, spin, charge électrique etc.) : il n’y a pas d’expérience qui permettent de faire la distinction entre les particules. Ainsi, tous les électrons de l’univers sont identiques, tout comme tous les protons ou tous les atomes d’hydrogène.”

Défaut :

Quand j’étais étudiant, j’ai toujours été mal à l’aise quand l’indiscernabilité était évoquée : cet énoncé est-il trivial ou concerne-t-il l’une des étranges propriétés du monde quantique qu’il est difficile de comprendre ? Le fait que l’énoncé ne pénètre notre esprit qu’avec difficulté a probablement deux causes.

1. Les deux particules qui sont supposées indiscernables, peuvent bien être distinguées. Imaginons deux électrons : l’un à la position r_G (gauche), l’autre à la position r_D (droite). Certes ils sont similaires en bien des aspects : la même masse, la même charge électrique, le même spin, le même état d’excitation, et n’importe quelle propriété qu’ils peuvent encore posséder. (On dit qu’ils coïncident dans leurs propriétés intrinsèques.) Mais il y a un aspect pour lequel ils sont différents : la position. L’un est positionné à r_G , l’autre à r_D . Ils peuvent ainsi être distingués.

En fait, ce qui compte en physique statistique n’est pas l’indiscernabilité des particules mais celle des états. Considérons à nouveau nos deux électrons. Nous considérons un état, dans lequel l’un est positionné à r_G et l’autre à r_D . Nous amenons maintenant la particule de gauche à r_D et celle de droite à r_G . L’état que nous avons obtenu ne peut être distingué de l’état précédent. Les deux états sont identiques – même en utilisant le mot “identique” dans son sens courant. Cependant, dans chacun des deux états, avant ou après l’échange, les deux particules peuvent être discernées : l’une est à gauche, l’autre à droite.



La situation est semblable à celle de l’ “expérience” suivante : avec un logiciel de dessin, nous créons à l’écran de l’ordinateur deux cercles pleins avec le même rayon et la même couleur, Fig. 1a. Maintenant, nous faisons bouger les deux cercles sur l’écran avec la souris, Fig. 1 b, et finalement nous reconstituons l’image initiale, Fig. 1c. Ainsi, en bougeant les cercles nous avons échangé leur position. Les images de la Fig. 1a et de la Fig. 1c sont bien indiscernables. Toutefois, les deux cercles dans une image peuvent être discernés.

Fig. 1. Intercambio de dos círculos sur l’écran de l’ordinateur

2. Se peut-il qu’en intervertissant deux particules il en résulte véritablement le même état ? N’y a-t-il vraiment aucun moyen de voir que le “nouvel” état a été obtenu à partir de l’ “ancien” par une interversion ? Nous n’aurions pas ce problème si nous n’avions pas, par un long exercice de la mécanique classique, adopté la pratique d’imaginer une particule comme un petit être, qui est caractérisé, outre par la valeur de certaines grandeurs physiques, par quelque chose qui pourrait peut-être être appelée son âme. Au lieu d’essayer de se débarrasser de cette habitude pour faire de la mécanique quantique, l’idée est nourrie et chérie par le langage même de la mécanique quantique. Il est intéressant de noter que nous avons le problème pour ce qui concerne les électrons. Nous ne l’avons pas quand nous intervertissons deux trous dans un semi-conducteur. Nous n’imaginons pas un trou comme un individu dans le même sens que pour un électron. Il semble qu’ils correspondent bien mieux que les électrons aux deux cercles sur l’écran de l’ordinateur.

Origine :

La mécanique classique a à faire avec des corps individuels. Le concept d’individu est adéquat si le système correspondant possède des propriétés qu’il conserve et qui nous permettent de le reconnaître à d’autres instants et dans d’autres environnements. Dans notre expérience quotidienne les propriétés qui caractérisent un individu sont principalement la forme et la répartition des matières qui constituent le système. Si toutefois, le nombre de degrés de liberté devient très petit jusqu’à ce qu’il ne reste finalement que la masse, la quantité de mouvement, le moment cinétique et la position, le concept d’individu se dissout tout simplement. En d’autres termes : le concept devient pertinent et non ambigu de manière asymptotique pour des systèmes comportant un grand nombre de degrés de liberté. Pour cette raison, le concept d’une particule individuelle de la mécanique classique n’est pas un bon concept de base pour la mécanique quantique.

Remède :

Dans notre langage quotidien, nous n’avons pas de problème pour décrire des objets qui ne sont pas des individus au sens de la mécanique classique. Les exemples sont un nuage dans le ciel ou la flamme d’une bougie. Le nuage cinq minutes plus tard est-il le même nuage que celui d’il y a cinq minutes ? La flamme cinq secondes après est-elle encore la même flamme ? La réponse d’une personne impartiale à ces questions peut n’être pas plus qu’un haussement d’épaule. Il n’y a simplement pas de problème.

En mécanique quantique beaucoup serait fait si le langage et les modèles qui le sous-tendent étaient légèrement modifiés. Ainsi, l’électron pourrait être introduit comme une portion indivisible d’une substance avec une masse, une charge électrique et un moment cinétique bien déterminés. Si maintenant nous avons une telle portion du côté droit et une du côté gauche, et si nous les intervertissons, il n’est pas difficile de voir que l’état final est le même que l’état initial. Depuis le tout début, l’attente de quelque chose comme une âme n’a alors pas lieu d’être.

Sujet :

Les manuels de physique pour les dernières années de l'enseignement secondaire introduisent le concept du photon : soit comme une portion d'énergie qui est échangée dans le processus d'absorption ou d'émission de lumière, soit comme les particules constituantes de la lumière. Les phonons au contraire ne sont pas mentionnés dans la majorité de ces ouvrages. Cela correspond également au fait que les étudiants en physique à l'université ont une idée plutôt concrète des photons et une idée plutôt approximative des phonons.

Défaut :

Il y a une analogie d'une grande portée entre photons et phonons. Les théories classiques de la lumière et du son ont beaucoup en commun, tout comme les théories quantiques correspondantes [1, 2]. L'analogie se manifeste par plusieurs effets.

Un exemple est le transport de chaleur avec l'une ou l'autre particule. Les particules porteuses d'un transport de chaleur dans un matériau qui est conducteur de chaleur mais pas d'électricité sont des phonons. (Dans un conducteur électrique les électrons dominent le processus.) Le processus est diffusif, c'est-à-dire qu'il y a une production et une annihilation continue de phonons. Très semblable est le transport de chaleur à l'intérieur du soleil de la zone de réaction vers l'extérieur. Ici, les particules porteuses sont des photons qui sont constamment émis et absorbés.

L'analogie ressort également dans la dépendance à la température de l'énergie des systèmes de phonons et de photons en équilibre thermodynamique. Dans les deux cas l'énergie varie en puissance quatrième de la température (ce qui est connu comme la loi de Stefan-Boltzmann pour le cas des photons).

Ainsi les deux types de particules ont beaucoup en commun et ne méritent pas de jouer un rôle si différent dans l'enseignement de la physique.

Origine :

Les phonons sont entrés sur la scène de la physique via le traitement par la physique quantique des vibrations de réseau. Au contraire, les photons, en tant que particules de la lumière, ont une tradition vieille d'un siècle. De plus, les photons uniques peuvent être facilement détectés. Des détecteurs pour les photons gamma et X existent depuis longtemps, mais aujourd'hui les photons de lumière visible peuvent aussi être détectés avec du matériel qui n'est pas trop cher.

Le fait que les phonons soient souvent appelés "quasi particules" peut contribuer à la croyance que le phonon est un concept plus abstrait que le photon. Les quasi particules sont des particules qui doivent leur existence et leurs propriétés à leur environnement local. En fait il semble que la distinction entre les quasi particules et les particules qualifiées de normales devienne obsolète, puisque nous venons tout juste d'apprendre que les particules normales tirent leurs propriétés du champ de Higgs.

Remède :

1. Moins de réticence à introduire les phonons et à les traiter comme des particules. Cela n'est pas plus difficile qu'avec les photons. Nous avons trouvé des manuels scolaires qui introduisent les gluons. Alors pourquoi pas les phonons qui sont certainement plus proches des phénomènes physiques quotidiens que les gluons.

2. Un peu plus de prudence en introduisant les photons.

3. Plus de réticence pour l'utilisation des désignations comme "quasi" ou "virtuel". De tels termes créent un malaise dans l'esprit des étudiants à propos d'un concept et n'explique pas grand-chose.

[1] *Ashcroft, N. W., Mermin, N. D.*: Solid State Physics (Physique de l'état solide), Holt, Rinehart and Winston, Inc., Orlando (1976), p. 453: "Dans cette théorie [la théorie quantique du champ électromagnétique] les énergies permises d'un mode normal du champ de rayonnement dans une cavité sont données par

$$\left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$$

où ω est la fréquence angulaire du mode. Il est de pratique universelle, cependant, de parler non du nombre quantique d'excitation du mode, n , mais du nombre, n , de *photons* de ce type qui sont présents. De la même manière précisément, au lieu de dire que le mode normal [dans un cristal] de branche s avec le vecteur d'onde \mathbf{k} est dans son état excité $n_{\mathbf{k}s}$, on dit qu'il y a $n_{\mathbf{k}s}$ phonons du type avec un vecteur d'onde \mathbf{k} présents dans le cristal."

[2] *Vogel, H.*: Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik (Physique), Springer-Verlag Berlin (1977), p. 598: "Une vibration du réseau à la fréquence angulaire ω peut, tout comme l'oscillation d'une particule unique, avoir seulement des valeurs d'énergie dont les différences sont des multiples entiers de $\hbar\omega$. Pour cette raison une onde de lumière par exemple peut échanger seulement un multiple entier de cette valeur avec le réseau cristallin. Avec la même justification que pour le cas du champ d'onde électromagnétique, cela est interprété comme l'existence de *quanta acoustique* ou *phonons* d'énergie $\hbar\omega$."

9

Physique du solide

9.1 La diode à semi-conducteurs en tant que redresseur

Sujet :

Les manuels énoncent souvent que l'effet redresseur d'une jonction pn est dû à la zone de déplétion présente des deux côtés de la surface de contact entre la région p et la région n .

“Si la couche n est reliée avec le pôle plus et la couche p avec le pôle moins de la source, la zone de déplétion devient plus large. La diode se bloque. Si au contraire la couche p de la diode est reliée avec le pôle plus et la couche n avec le pôle moins, des électrons libres et des trous entrent dans la zone de déplétion. Ainsi cette zone perd son effet et la diode devient un conducteur.”

Défaut :

Il est vrai que l'épaisseur de la zone de déplétion change en fonction de la tension appliquée. Ainsi, la conclusion ci-dessus semble plausible. Cependant, déduire la résistance de la densité de porteurs de charge est correct seulement si les porteurs de charge conservent leur identité dans la section considérée de la diode. Une telle conclusion n'est pas valide si les porteurs de charge sont sujets à des réactions. Cela est pourtant le cas pour la jonction pn . Dans le sens passant, électrons et trous réagissent aux photons et aux phonons. Dans le sens bloqué, la réaction se déroule dans le sens opposé, bien qu'avec un taux de réaction bien plus faible, puisqu'à température normale seuls quelques photons et phonons sont présents. C'est cette asymétrie du taux de réaction qui est responsable de l'asymétrie de la résistance.

La région dans laquelle l'effet redresseur a lieu est donnée par la longueur de diffusion, qui, en fait, est 1 000 fois l'épaisseur de la zone de déplétion.

Origine :

La répugnance traditionnelle du physicien envers les arguments chimiques. Cela conduit à la tentative futile d'explication des processus dans une diode à semi-conducteurs seulement avec la loi d'Ohm et les lois de l'électrostatique, c'est-à-dire avec les outils de l'électricité. En réalité il est impossible d'expliquer la diode, ainsi que le transistor pnp et nnp sans recours aux lois de la chimie. L'explication est la plus élégante en utilisant le gradient du potentiel chimique comme force motrice, lequel est analogue au gradient du potentiel électrique.

Remède :

Le fonctionnement en redresseur ou en DEL de la diode à semi-conducteurs peut être expliqué de la façon suivante : dans le sens passant des électrons de la couche n et des trous de la couche p se déplacent vers la jonction pn . Là ils réagissent pour créer des photons et des phonons. La diode se comporte comme un interrupteur fermé. En tant que DEL, la diode est optimisée de telle sorte qu'aussi peu de phonons que possible et autant de photons que possible sont créés. Dans le sens bloqué, les porteurs de charge devraient s'écouler du centre, c'est-à-dire de la région de contact, vers l'extérieur. Puisqu'il n'y a pas de source de porteurs de charge à l'endroit du contact pn , aucun porteur de charge ne peut s'en écouler. Il n'y a pas de courant électrique et aucune lumière n'est émise. Seul un examen plus approfondi permet de remarquer que des électrons et des trous sont pourtant produits à un très faible taux par le rayonnement thermique ambiant. Ces porteurs de charge sont responsables du courant inverse.

9.2 La diode à semi-conducteurs en tant que cellule solaire

Sujet :

Dans les manuels scolaires aussi bien que dans les cours de l'université, on peut trouver l'assertion selon laquelle, dans une cellule solaire, le gradient du potentiel électrique dans la zone de charge d'espace de la jonction pn est la cause du courant électrique généré par la cellule :

“La séparation des électrons et des trous causée par le champ électrique interne à l'intérieur de la zone de déplétion représente l'effet générateur.”

“Du fait des forces électriques les électrons libérés sont poussés vers la couche n et les trous vers la couche p .”

Défaut :

Avec un examen superficiel, l'affirmation semble plausible. Le courant électrique généré par la cellule solaire a besoin d'une cause ou d'une sorte de force motrice. Les physiciens savent qu'un champ électrique représente une telle cause. Il y a en effet un champ électrique à l'intérieur de la diode, et sa direction est celle dont nous avons besoin. Par conséquent, le physicien conclut que ce champ ou le gradient de potentiel correspondant est responsable du courant électrique. Malheureusement le physicien a négligé un autre fait. Jamais un gradient de potentiel électrique ne peut être la cause d'un courant électrique stationnaire. Si nous suivons un porteur de charge (positive) dans sa trajectoire dans le circuit, nous observons qu'il se déplace autant vers le haut (de la colline de potentiel) que vers le bas. Puisqu'il se déplace vers le bas dans la résistance de charge, il doit nécessairement aller vers le haut dans la source d'énergie. On peut précisément reconnaître la source d'énergie par le fait que le potentiel électrique est plus haut au pôle où la charge (positive) sort qu'au pôle où elle entre dans la source.

Le fait qu'en certaines sections à l'intérieur de la source d'énergie la charge descende la colline de potentiel ne réfute pas l'argument. Dans un circuit électrique le potentiel électrique change à chaque fois que le matériau du conducteur change. Il en est ainsi dans tout conducteur, même dans un circuit sans batterie. Ces échelons de potentiel s'additionnent pour donner une somme nulle en parcourant en entier le circuit fermé. C'est pourquoi il est inutile de se préoccuper de ce phénomène.

Origine :

A nouveau la tentative désespérée d'expliquer le principe de fonctionnement avec les outils familiers de l'électricité, bien qu'avec précisément ces mêmes outils, on peut voir que l'argumentation n'est pas correcte.

Remède :

La cause ou la force motrice pour un courant de porteurs de charge électrique peut mais ne doit pas être forcément un gradient de potentiel électrique. En réalité la cause du courant électrique dans une cellule solaire est un gradient du potentiel chimique. Ainsi la cellule solaire est un proche parent de la cellule électrochimique.

Sujet :

Le gradient de potentiel électrique dans une jonction pn à courant nul est la cause d'un "courant de champ". Le courant de champ est compensé par le "courant de diffusion". Le courant de diffusion s'écoule dans la direction opposée et est une conséquence du gradient de concentration des porteurs de charge.

Défaut :

Quand dans un matériau conducteur existe un gradient de potentiel électrique et que le potentiel chimique a la même valeur partout, il y a un courant de porteurs de charge. Les porteurs de charge sont "mus" par le gradient de potentiel électrique. Un courant électrique s'écoulera également quand il y a un gradient de potentiel chimique (causé par exemple par un gradient de concentration) et que le potentiel électrique a la même valeur partout. Dans ce cas la "force motrice" des porteurs de charge est le gradient de potentiel chimique. Ainsi il y a deux possibilités pour "tirer sur les particules" : le gradient de potentiel électrique tire sur la grandeur Q , c'est-à-dire la charge électrique, tandis que le gradient de potentiel chimique tire sur la grandeur n , c'est-à-dire la quantité de matière.

En général, les deux gradients sont différents de zéro et la force motrice résultante est due aux deux gradients. Cela peut être décrit au moyen du potentiel électrochimique η . Le potentiel électrochimique est essentiellement la somme du potentiel électrique ϕ et du potentiel chimique μ :

$$\eta = \mu + z \cdot F \cdot \phi .$$

Alors pour la densité de courant électrique nous avons :

$$\vec{j} = -\frac{\sigma}{zF} \text{grad}\eta$$

σ est la conductivité électrique, z le nombre de charges élémentaires de chaque porteur de charge et F la constante de Faraday.

Il est possible que le gradient du potentiel électrochimique soit nul. Cela signifie que les deux forces motrices sont égales et opposées et qu'ainsi elles se compensent l'une l'autre. Dans ce cas il n'y a aucun courant électrique. Nous avons un "équilibre électrochimique".

Maintenant, au lieu de dire qu'un courant particulière peut être mu de deux façons ou qu'il y a deux "forces motrices", il est souvent énoncé que le gradient de potentiel électrique crée un "courant de champ" et que le gradient de potentiel chimique crée un "courant de diffusion", et que ces deux courants se superposent au courant total. Alors, dans le cas de l'équilibre électrochimique, nous aurions deux courants de même intensité s'écoulant dans des directions opposées.

Le problème avec cette interprétation est que chacun de ces courants devrait séparément produire de l'entropie (et de ce fait de la chaleur). Mais nous savons que le courant total est sans dissipation. Il n'y a pas de production d'entropie. Et comment sommes-nous supposés imaginer cette situation à l'échelle microscopique : devrions-nous croire que certains des porteurs de charge obéissent au gradient du potentiel électrique et les autres au gradient de concentration ? Si nous considérons un porteur de charge choisi arbitrairement, à quel courant appartient-il ?

Le fait que cette description soit malcommode peut aussi être vu en comparant cette situation avec une situation similaire, pour laquelle personne ne ferait une décomposition en courants opposés. Considérons l'air de l'atmosphère. Il est aussi sujet à deux forces motrices : le gradient du potentiel gravitationnel tire les molécules d'air vers le bas, le gradient de pression les tire vers le haut. Quand l'air est immobile et la température uniforme, ces deux forces motrices sont égales et opposées, elles se compensent l'une l'autre. Pourquoi ne disons-nous pas dans ce cas qu'il y a un courant de champ vers le bas et un courant de diffusion vers le haut ?

Origine :

Probablement plusieurs causes s'ajoutent : 1. L'outil simple et puissant "potentiel chimique", bien qu'introduit en physique il y a plus de cent ans, est aujourd'hui presque inconnu et à peine utilisé. 2. Le potentiel électrochimique n'est pas considéré sérieusement comme une grandeur physique.

Remède :

Il y a deux forces motrices pour des porteurs de charge : une force motrice électrique qui tire sur la charge électrique et une force motrice chimique qui tire sur la quantité de matière. Comme la charge électrique et la quantité de matière sont couplées, ces deux potentiels peuvent être combinés en un seul potentiel, le potentiel électrochimique. Le gradient de potentiel électrochimique est responsable du courant de particule.

Sujet :

La constante de Planck peut être mesurée en utilisant des diodes électroluminescentes (DEL). La tension appliquée à la DEL est augmentée jusqu'à ce que la diode commence à émettre de la lumière. La tension seuil correspondante U_0 multipliée par la charge élémentaire est, ainsi est-il dit, égale à la bande d'énergie interdite et ainsi égale à l'énergie des photons émis. L'expérience est réalisée avec plusieurs DELs émettant de la lumière à différentes fréquences.

Défaut :

Il n'y a pas de tension seuil pour la lumière émise par la diode. L'intensité lumineuse est proportionnelle au courant électrique dans la diode. Le courant électrique I en fonction de la tension appliquée U est donné avec une bonne approximation par :

$$I = I_s \cdot \exp\left(\frac{eU}{\eta kT}\right) = I_s \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right). \quad (1)$$

Ici, k est la constante de Boltzmann, T la température absolue et e la charge élémentaire. η est appelé le facteur d'idéalité dont la valeur est comprise entre un et deux. Il serait égal à un si toutes les paires électron-trou se recombinent en rayonnant. η n'a pas d'importance pour les considérations suivantes tant qu'il a la même valeur pour toutes les diodes qui sont comparées. I_s est le courant de saturation. Il dépend de la température et de la bande d'énergie interdite E_g . La proportionnalité suivante est valable :

$$I_s \sim A \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{\eta kT}\right),$$

où A est l'aire de la surface de contact pn. A part

$$U_T = \frac{\eta kT}{e}$$

il n'y a aucune tension caractéristique dans l'équation (1). Toutefois, U_T n'a rien à voir avec la bande interdite [1, 2].

Il n'y a pas de tension minimale pour laquelle la diode commence à émettre, puisqu'elle émet toujours – mais avec une intensité qui dépend de la tension appliquée. Elle émet même quand $U = 0$ V, à savoir par rayonnement thermique. Lorsque la tension augmente, l'intensité de la lumière émise augmente exponentiellement, tandis que sa distribution spectrale ne change pas. Il peut surprendre que la diode émette des photons dont l'énergie est à peu près égale à la bande d'énergie interdite, même si l'énergie eU apportée aux paires électron-trou est plus petite. En réalité la diode se refroidirait un peu en travaillant avec de faibles tensions appliquées. Elle fonctionne comme un élément Peltier. Comme cet effet est faible, il est couvert par l'inévitable chaleur dissipée.

La procédure qui est appliquée pour obtenir une "tension seuil" U_0 repose sur une illusion. La Fig. 1 montre trois fois la même caractéristique exponentielle, la différence entre les trois représentations consistant seulement dans le choix des axes des ordonnées. Chaque fois que l'échelle du courant sur l'axe vertical est multipliée d'un facteur 100, le graphe est déplacé horizontalement de

$$\frac{kT}{e} \cdot \ln 10^2 = 0,119 \text{ Volt.}$$

(Nous admettons que $\eta = 1$.)

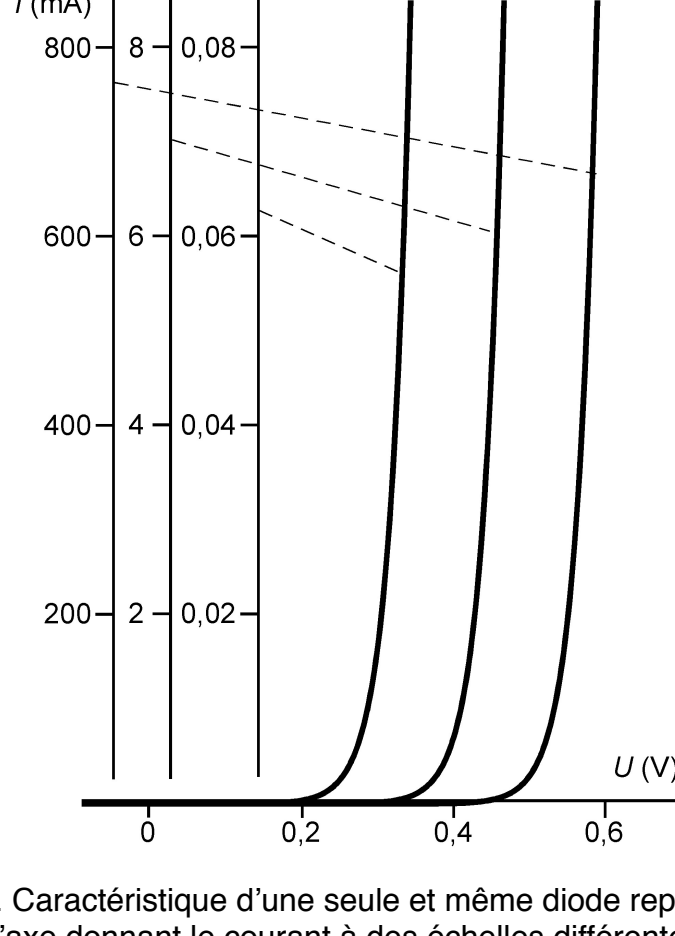


Fig. 1. Caractéristique d'une seule et même diode représentée avec l'axe donnant le courant à des échelles différentes. Les courbes ont la même forme et peuvent être superposées par un déplacement horizontal.

La "tension seuil" que l'on pourrait lire à partir du graphe change de la même quantité.

Origine :

L'expérience fut introduite comme une expérience simple et peu chère pour le laboratoire de physique au lycée et à l'université. L'interprétation incorrecte a une certaine plausibilité. Apparemment, il fut oublié qu'une tension seuil ne peut être définie par principe pour une fonction exponentielle.

Remède :

La constante de Planck peut être déterminée au moyen de plusieurs diodes avec des bandes d'énergie interdite différentes, Fig. 2.

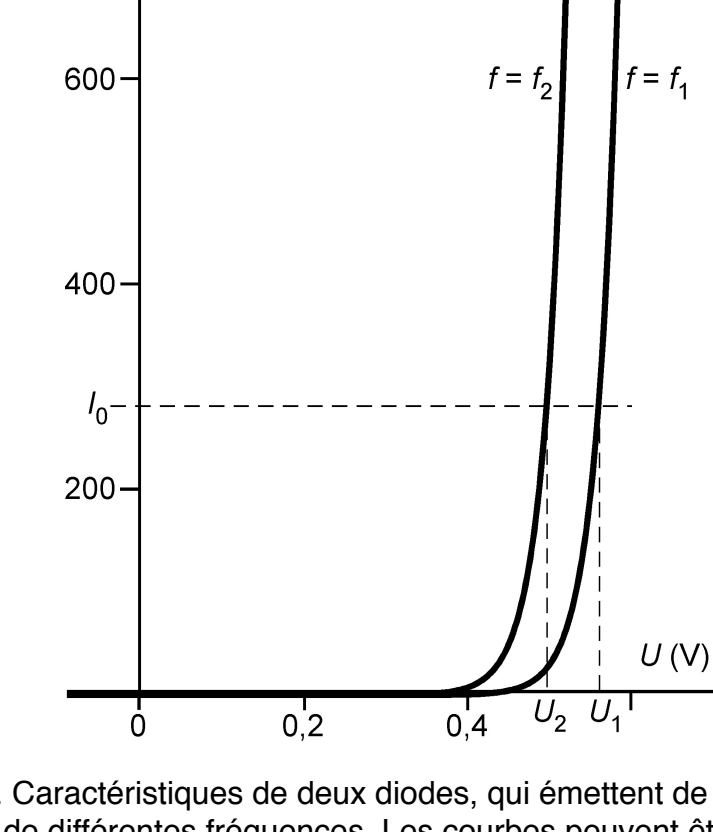


Fig. 2. Caractéristiques de deux diodes, qui émettent de la lumière de différentes fréquences. Les courbes peuvent être superposées par un déplacement horizontal.

Mais il y a une condition : l'aire de la surface de contact pn doit être la même pour toutes les diodes. Si c'est le cas, les caractéristiques correspondantes se distinguent uniquement par le facteur [3]

$$\exp\left(-\frac{E_g}{\eta kT}\right).$$

La bande d'énergie interdite E_g est liée à la fréquence moyenne de la lumière émise par

$$E_g = h \cdot f.$$

Ainsi, la distance horizontale entre les deux courbes 1 et 2 est

$$(E_{g1} - E_{g2})/e.$$

Nous choisissons maintenant une valeur arbitraire I_0 du courant et lisons la tension correspondante U_i . Nous avons

$$U_1 - U_2 = (E_{g1} - E_{g2})/e$$

ou

$$e(U_1 - U_2) = E_{g1} - E_{g2} = h(f_1 - f_2),$$

et ainsi

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{f_1 - f_2}.$$

Remarquez que ni

$$eU_1 = hf_1$$

ni

$$eU_2 = hf_2$$

ne sont valables séparément.

En traçant eU_i en fonction de la fréquence de la lumière émise, on obtient une droite dont la pente est égale à la constante de Planck, Fig. 3.

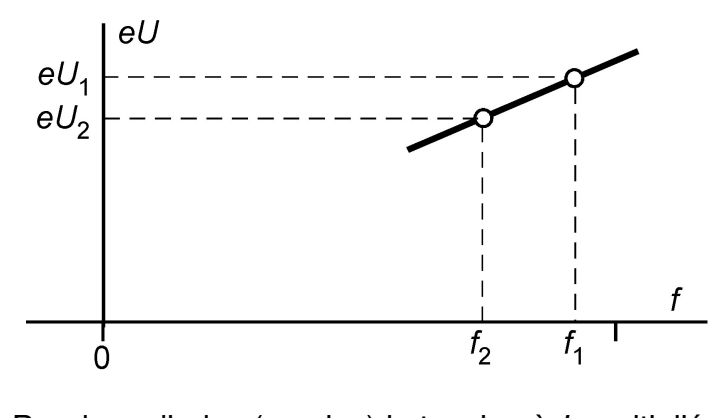


Fig. 3. Pour deux diodes (ou plus) la tension à I_0 multipliée par e est tracée en fonction de la fréquence de la lumière émise. La pente de la droite est égale à la constante de Planck.

(Parfois les tangentes aux points d'égal courant sont dessinées et la tension est lue là où elles coupent l'axe des abscisses. A l'évidence, la valeur est la même qu'en prenant la tension directement comme sur la Fig. 2, mais cela peut donner l'illusion que cette intersection représente quelque chose comme une tension seuil.)

Le fait que la droite sur la Fig. 3 passe par l'origine ou non dépend seulement du choix arbitraire de la valeur du courant I_0 .

Au lieu de lire les valeurs de la tension pour un courant donné, on utilise souvent une autre procédure : on choisit la tension pour laquelle la diode commence à émettre de la lumière de manière visible. Comme on compare automatiquement l'intensité lumineuse avec la lumière ambiante, une valeur de tension peut être déterminée de façon tout à fait fiable. Par cette procédure une valeur de courant est définie avec une précision suffisante qui est la même pour toutes les diodes. Cela explique pourquoi la procédure donne des résultats satisfaisants. Cependant, par le fait que la droite obtenue de cette manière passe souvent par l'origine est pure coïncidence.

[1] Herrmann, F. und Schätzle, D.: Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED (Question n°53 : Mesurer la constante de Planck au moyen d'une DEL), Am. J. Phys. **64**, 1996, p. 1448
 [2] Morehouse, R.: Answer to Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED (Réponse à la question n°53 : Mesurer la constante de Planck au moyen d'une DEL), Am. J. Phys. **66**, 1998, p. 12
 [3] Würfel, P.: Physics of Solar Cells (Physique des cellules solaires), Wiley-VCH, Weinheim 2009

10

Physique nucléaire

Sujet :

La description des transformations nucléaires, la discussion des processus de mesure et de détection des rayonnements nucléaires.

Les substances radioactives peuvent émettre trois types de rayonnement : des rayonnements α , β et γ . Les processus de transformation nucléaire peuvent être divisés en décroissance radioactive, fission et réaction nucléaire.

Défaut :

La physique nucléaire est un véritable gisement de concepts obsolètes. Cela devient évident lorsque l'on compare la description des transformations nucléaires avec celle des réactions chimiques. Ici, nous sommes déjà confrontés à la première insuffisance. Les similitudes entre chimie classique et chimie nucléaire, ou entre physique du nuage électronique et physique du noyau vont bien au delà de ce qu'il apparaît dans beaucoup de manuels. En tirant profit de cette analogie, la physique nucléaire pourrait être simplifiée sur le plan conceptuel, et son enseignement facilité en insistant sur cette analogie.

En physique nucléaire, des concepts qui existent déjà en chimie sont quelquefois introduits sous un nouveau nom. Ce qui en chimie est une réaction monomoléculaire, est appelé en physique nucléaire désintégration ou fission spontanée. Une réaction autocatalytique en chimie est une réaction en chaîne en physique nucléaire. La vitesse de réaction est mesurée en mol/s en chimie ; en physique nucléaire, elle a un autre nom, l'activité, et elle est mesurée en Becquerel.

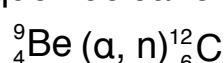
On pourrait s'attendre à ce que la relation entre les deux mesures soit :

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq} .$$

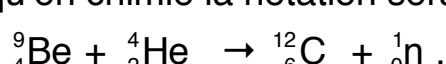
Cependant, l'usage est différent :

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq} \cdot \text{mol} .$$

Les équations de réaction sont écrites de façon différente en chimie et en physique nucléaire. Par exemple, la réaction des nucléides ${}^9_4\text{Be}$ et ${}^4_2\text{He}$ en ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}_0^1\text{n}$ s'écrit en physique nucléaire :



tandis qu'en chimie la notation serait :



De plus, la notation de la physique nucléaire a un autre inconvénient : elle met en évidence une asymétrie entre les réactifs ${}^9_4\text{Be}$ et ${}^4_2\text{He}$, de même qu'entre les produits de réaction ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}_0^1\text{n}$, qui n'est pas essentielle : la différence des masses de ${}^9_4\text{Be}$ et ${}^{12}_6\text{C}$ d'un côté et ${}^4_2\text{He}$ et ${}_0^1\text{n}$ de l'autre. De surcroît, cette notation n'est applicable que quand il y a exactement deux réactifs et deux produits de réaction.

Quelquefois le même mot est utilisé en chimie et en physique nucléaire avec une signification différente. En physique nucléaire, une réaction fait participer au moins deux réactifs, ce n'est pas le cas en chimie.

Qui veut apprendre la physique nucléaire a à faire avec des termes techniques particulièrement nombreux. Il est courant de faire des distinctions qui ne sont ni nécessaires, ni essentielles. Un exemple : l'accent est mis sur la distinction entre radioactivités naturelle et artificielle, c'est-à-dire entre processus de désintégration de nucléides trouvés dans la nature et de nucléides fabriqués par l'homme. Bien sûr, les chimistes aussi pourraient distinguer entre composés naturels et composés artificiels et leur décomposition spontanée. Heureusement, ils ne le font pas, parce que cette distinction ne reflèterait rien d'essentiel.

Il est également superflu de donner à des produits de désintégration des "noms de rayonnement" en plus de leur dénomination courante. De plus, les dénominations rayonnement α , β et γ suggèrent qu'il devrait y avoir une similitude ou une analogie entre les particules correspondantes, ce qui n'est pas le cas. En revanche, la relation entre un processus γ et une réaction photochimique n'est généralement pas montrée.

Origine :

Comment se fait-il que la description des rayonnements domine autant la physique nucléaire ? D'où vient la prolifération de termes techniques ? Pourquoi passons-nous autant de temps d'enseignement pour la description des processus de mesure des rayonnements ?

Les premières, et pendant longtemps les seules, transformations connues des noyaux étaient liées aux "rayonnements". C'était seulement grâce au rayonnement qu'il était possible d'avoir des informations sur un processus nucléaire, c'est-à-dire seulement par le fait que l'un des produits de réaction avait une masse faible et ainsi prenait presque toute l'énergie libérée lors du processus. Au début, on observait le rayonnement, mais on ne connaissait pas encore sa nature. Il était naturel de lui donner un nom spécifique. De plus à l'époque des débuts de la physique nucléaire, le rayonnement était à la mode. A plusieurs reprises la découverte d'un nouveau rayonnement a valu à son auteur un prix Nobel. Les similitudes entre les processus liés au nuage atomique et ceux du noyau n'apparurent que lentement. On n'observa ou on ne réalisa des réactions nucléaires avec des vitesses de réaction aussi élevées que celles connues en chimie, que des dizaines d'années plus tard. On ne comprit qu'en 1920 que le soleil était un réacteur nucléaire, et le premier réacteur réalisé par l'homme commença à fonctionner en 1942.

Remède :

La disposition à prendre n'est pas simple. Elle requiert une restructuration complète du contenu de la physique nucléaire. Pour réaliser cela, le mieux est de prendre la chimie comme modèle.

10.2 Défaut de masse

Sujet :

La masse du noyau atomique est plus petite que la somme des masses de ses constituants. La différence est appelée le défaut de masse.

Défaut :

1. Le terme défaut de masse est introduit dans le contexte de la physique nucléaire. Cependant le phénomène correspondant existe aussi pour la physique du nuage électronique. La masse de l'atome est plus petite que celle de ses constituants, noyau et électrons. De même, la masse d'une molécule est inférieure à la somme des masses des atomes qui la composent. La masse de deux aimants, qui sont attachés l'un à l'autre de manière que les pôles opposés soient collés ensemble, est plus faible que la masse des aimants pris séparément.

2. La désignation suggère qu'il y a un petit écart par rapport à la valeur que l'on s'attendrait à trouver. Cependant quand on considère les nucléons et les particules qui les composent, les quarks, le défaut de masse est beaucoup plus important que la masse des constituants. Finalement nous devons être préparés à découvrir que la totalité de la masse de n'importe quelle particule est un "excès de masse".

3. Le mot "défaut" exprime normalement une nuisance. Le défaut de masse ne peut être une nuisance que pour quelqu'un qui ne sait pas qu'il y a un champ qui a également une masse. Ainsi le défaut de masse n'est pas un manque. Il arrange plutôt un bilan qui autrement ne serait pas équilibré.

Origine :

Autrefois, la dénomination était raisonnable. Depuis que Lavoisier a énoncé en 1772 la loi de conservation de la masse, on sait que la masse d'une substance est égale à la somme des masses de ses constituants. La loi a été vérifiée dans la limite de la précision des moyens de mesure et a pu être considérée comme valide jusqu'aux environs de 1900.

La conservation de l'énergie a été découverte de façon indépendante une centaine d'années après la loi de conservation de la masse. Ce n'est que depuis 1905 que nous savons qu'aucune de ces deux lois n'est valide dans sa forme originale mais que la masse et l'énergie représentent la même grandeur physique et que le principe de conservation ne s'applique qu'à ce nouveau concept de masse-énergie. L'écart entre la masse du noyau et de ses constituants, protons et neutrons, aurait été considéré comme un miracle à l'époque prérelativiste. Après 1905, ce n'était pas plus qu'une preuve de la théorie d'Einstein. D'un point de vue moderne, cependant, la dénomination est trompeuse.

Remède :

Traiter l'équivalence masse-énergie comme aller de soi, car c'est l'état actuel des connaissances. En procédant ainsi, il n'y a pas de défaut de masse. Aucune masse ne manque.

11

Chimie

11.1 Processus physiques et chimiques

Sujet :

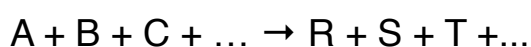
Les citations suivantes sont tirées de manuels de chimie :

“Les processus, dans lesquels des substances sont transformées en d’autres substances, sont appelés des processus chimiques. Dans un processus physique en général l’état d’une substance change, tandis que ses propriétés essentielles restent inchangées : du soufre reste du soufre, même s’il est fondu ou vaporisé.”

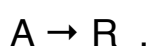
“La chimie est la science des substances et de leurs transformations. La physique au contraire examine les états et les changements d’état des substances.”

Défaut :

1. La frontière entre la physique et la chimie est tracée de manière inappropriée : entre la “réaction chimique” et la transition de phase. Pourtant, ces processus sont de proches parents. Il serait plus commode de souligner leurs similarités. Les deux classes de processus peuvent être décrites avec les mêmes méthodes et concepts. Une réaction chimique peut être symboliquement écrite comme



Une transition de phase est ce cas particulier, pour lequel il n’y a qu’une même substance unique à gauche et à droite de la flèche de réaction, soit sous forme symbolique :



Cette particularité, cependant, n’entraîne aucune différence essentielle dans le traitement mathématique du problème. L’élément moteur pour les deux types de processus est une différence des potentiels chimiques entre les réactifs et les produits. La valeur des potentiels chimiques est prise dans la même table dans les deux cas. Le bilan thermique est aussi calculé par la même procédure et avec les valeurs de la même table. Dans les deux cas, il y a des processus exothermiques ou endothermiques et les deux types de processus peuvent se dérouler de manière réversible ou de manière irréversible.

2. Si la définition est choisie comme cela est fait ici, on va vers des difficultés de toute façon. Le critère pour qu’un processus soit chimique est la formation d’une nouvelle substance. Mais qu’est-ce qu’une nouvelle substance ? Est-ce qu’une mise en solution est un processus physique ou chimique ? Est-il chimique quand une hydratation s’opère et physique dans le cas contraire ? Est-ce que le NaCl gazeux, dissout et cristallin sont des substances différentes ? Et que dire des processus se déroulant dans un matériau solide : la réaction des lacunes du réseau cristallin avec des atomes interstitiels ou des ions, la réaction des électrons avec des trous ?

Origine :

Il est normal d’expliquer de quoi il retourne quand on aborde un nouveau domaine. Il est notable cependant que les manuels de chimie sont particulièrement explicites en établissant une frontière avec la physique. Dans les manuels de physique aucun effort semblable n’est fait pour tracer la limite avec la chimie. Soit dit en passant, il n’y a aucune tendance à établir une séparation entre la physique et le génie électrique, ni d’un côté ni de l’autre.

Remède :

Au lieu de souligner les différences entre les transitions de phase et les “vraies” réactions chimiques, il est préférable de traiter ces processus comme des cas particuliers de la même classe de processus, à laquelle beaucoup d’autres appartiennent aussi : la réaction des électrons avec des trous, la réaction des substances matérielles avec la lumière, la réaction des atomes interstitiels avec les lacunes du réseau, la réaction des noyaux atomiques ...

Sujet :

“Dans un processus chimique, l'équilibre chimique est l'état pour lequel les activités chimiques ou les concentrations des réactifs et des produits n'ont pas de changements nets en fonction du temps. Habituellement, cet état est obtenu quand les réactions chimiques directes se déroulent avec la même vitesse que leurs réactions inverses. Les taux des réactions directes et inverses sont généralement non nuls, mais, étant égaux, il n'y a pas de changements nets pour chacune des concentrations des réactifs ou des produits. Ce processus est connu sous le nom d'équilibre dynamique.”

Défaut :

Considérons deux sous-systèmes A et B. Il y a plusieurs types d'équilibres, à savoir autant qu'il y a de variables extensives X , qui peuvent être échangées entre A et B. (Seule l'énergie ne définit pas son propre équilibre, puisqu'elle est échangée en même temps avec l'une quelconque des autres grandeurs extensives.) A chacune des grandeurs extensives X correspond une grandeur intensive ξ “énergie-conjuguée”. Si les systèmes A et B peuvent échanger la grandeur extensive X , cet échange s'arrête seulement lorsque la variable intensive correspondante a la même valeur pour A et B, c'est-à-dire lorsque $\xi_A = \xi_B$. Alors les deux sous-systèmes sont en équilibre au regard de l'échange de X . Les différents équilibres sont nommés d'après la grandeur échangée. Si deux systèmes peuvent échanger de l'entropie, ils sont en “équilibre thermique” quand leurs températures sont égales, c'est-à-dire quand $T_A = T_B$. Deux systèmes qui échangent des charges électriques sont dans l'état d'“équilibre électrique” quand leurs potentiels électriques sont égaux, c'est-à-dire quand $\phi_A = \phi_B$. Deux corps qui échangent de la quantité de mouvement par un processus de frottement le font jusqu'à ce que leurs vitesses sont devenues égales, c'est-à-dire jusqu'à l'“équilibre de vitesse”, ou $v_A = v_B$. Si dans une réaction chimique les quantités de matière des substances A(1), A(2), A(3), ... peuvent changer aux dépens des quantités de matière B(1), B(2), B(3), ..., les substances d'un côté de l'équation de la réaction sont en “équilibre chimique” avec celle de l'autre côté de l'équation, quand la somme des potentiels chimiques des substances A(i) est égale à la somme des potentiels des substances B(k), c'est-à-dire quand $\sum \mu_{A(i)} = \sum \mu_{B(k)}$.

En plaçant l'équilibre chimique dans une perspective plus large, comme nous venons de le faire, on constate qu'il n'est pas approprié d'insister sur le fait que l'équilibre chimique est un équilibre *dynamique*.

Considérons à nouveau, comme comparaison, l'équilibre électrique et, pour être concret, un morceau de fil de cuivre. Maintenant imaginons le fil composé de deux moitiés A et B. Il est clair qu'elles sont dans un état d'équilibre électrique. Il est commun et raisonnable de dire qu'il n'y a pas de courant électrique s'écoulant entre ces deux sous-systèmes. Si cependant nous décrivons cet état de la même façon que la chimie décrit l'équilibre chimique, nous ne serions pas autorisés à dire qu'il n'y a pas de courant, puisqu'il y a un mouvement continu d'électrons de A vers B et de B vers A, qui résulte pour un fil de cuivre ayant une section transversale de 1 mm² en un courant électrique de 10⁸ A dans une direction et en un courant de la même intensité dans l'autre direction. De même, lorsqu'aucun vent ne souffle, nous ne serions pas autorisés à dire que l'air est au repos, mais nous devrions dire que nous avons un débit massique d'environ 100 kg/(m²·s) vers la droite et un écoulement similaire vers la gauche, et aussi des courants de la même intensité en avant et en arrière et vers le haut et le bas. Des conclusions similaires seraient tirées pour l'équilibre thermique, pour lequel nous avons des courants de phonons dans toutes les directions, ou pour l'équilibre de vitesse lié à des écoulements continus de quantité de mouvement dans des directions opposées.

Bien sûr, il n'y a rien d'incorrect à considérer un phénomène au niveau microscopique. Mais, en premier lieu, il n'y a aucune différence essentielle à cet égard entre l'équilibre chimique et d'autres équilibres, pour lesquels personne ne souligne que l'équilibre est un “équilibre dynamique”. Et en second lieu, on met l'accent sur quelque chose qui peut mener facilement à une idée fautive. Si nous disons que dans un fil de cuivre dans lequel aucun courant net ne passe, “en réalité” il y a deux courants s'écoulant en sens opposés, le fil ne devrait-il pas s'échauffer ? De la même manière, on pourrait demander pourquoi les deux réactions chimiques inverses ne sont pas dissipatives ? A l'évidence, ces problèmes sont artificiels. On entremêle les arguments de deux niveaux de description différents : le microscopique et le macroscopique.

Origine :

La description des réactions chimiques au simple niveau phénoménologique au moyen du potentiel chimique n'a jamais accédé à la reconnaissance. Cela est différent pour les autres phénomènes physiques mentionnés plus haut. Pour eux, il est entendu de décrire un transport de chaleur comme causé par une différence de température ou un courant électrique par un gradient de potentiel électrique. L'interprétation microscopique de ces processus est faite plus tard dans le contexte de la physique atomique et de la physique de l'état solide. L'enseignement de la chimie commence au niveau moléculaire, pour lequel les grandeurs thermodynamiques simples et élégantes nécessitent une interprétation compliquée.

Remède :

Dîtes, lorsque l'équilibre chimique est atteint, que la réaction s'arrête. Cela ne nous empêche pas de considérer plus tard à un niveau avancé la réaction continue directe et indirecte. Tout comme nous disons qu'aucun courant électrique ne passe dans l'état d'équilibre électrique et que cela ne nous empêche pas d'expliquer plus tard cet état à l'échelle microscopique par la symétrie de la surface de Fermi.

Sujet :

Hormis les générateurs électriques, les cellules électrochimiques sont les sources les plus importantes d'énergie électrique. Historiquement elles furent les premières sources techniques d'énergie électrique. Il ne fait aucun doute qu'elles devraient être traitées dans le programme de physique du secondaire.

Défaut :

Elles ne se trouvent pas dans le programme de physique. Pourquoi ? L'opinion des enseignants de physique peut être : "Il n'y a pas grand chose à comprendre. Tout ce qu'il y a à faire est d'apprendre par cœur les diverses réactions se produisant aux électrodes. Celles-ci sont différentes selon le type de la cellule. Ainsi, c'est un sujet typique pour la classe de chimie."

L'impression qu'on retire de la consultation du manuel de chimie semble confirmer cette conclusion. On est submergé de tant de détails et de termes techniques qu'à la fin on est incapable de remarquer que la question est demeurée sans réponse – un procédé, que nous scientifiques reprochons souvent aux sciences humaines. La grandeur, qui permettrait une explication indépendamment des détails et des particularités d'une réaction donnée, c'est-à-dire le potentiel chimique, n'est même pas introduite – ni dans les leçons de physique ni dans celles de chimie.

De plus, le sujet n'appartient pas exclusivement à la chimie. Il appartient aussi à la physique, parce que la cellule électrochimique peut être expliquée par des méthodes qui sont typiques de la physique et deuxièmement, parce qu'en général les détails d'une réaction particulière importent peu.

Une comparaison avec le traitement d'une autre classe de sources d'énergie électrique est opportune. Nous traitons le générateur en montrant le principe de base au moyen d'une simple expérience modèle. De cette manière, l'effet qui est la base de tous les générateurs électriques peut être compris. Les diverses variantes techniques des générateurs réels sont au mieux évoquées. Nous devrions procéder d'une manière similaire pour traiter les cellules électrochimiques. Le principe général de fonctionnement devrait être au premier plan.

Origine :

Le fait que le potentiel chimique n'est pas utilisé.

L'équation fondamentale de Gibbs

$$dE = TdS - pdV + vdp + \mu dn + \phi dQ \dots$$

nous indique quelles grandeurs physiques sont nécessaires pour décrire les échanges d'énergie : les grandeurs thermodynamiques température T , entropie S , pression p et volume V , les grandeurs mécaniques vitesse v , et quantité de mouvement p , les grandeurs chimiques potentiel chimique μ et quantité de matière n , les grandeurs électriques potentiel électrique ϕ et charge électrique Q , etc. Il se trouve que deux de ces grandeurs ne sont quasiment pas en usage, tout comme si elles étaient interdites : l'entropie et le potentiel chimique. Pour cela le prix à payer est élevé : soit on se débrouille avec des substituts encombrants – comme par exemple l'enthalpie (à la place de l'entropie) en tant que mesure pour la chaleur, qui ne convient pas vraiment bien, ou la dégradation de l'énergie pour décrire la production d'entropie –, soit on élimine simplement du programme les sujets qui pourraient être expliqués en utilisant ces grandeurs, – comme c'est le cas des cellules électrochimiques.

Remède :

Celui qui n'a pas peur du potentiel chimique explique la cellule électrochimique de la façon suivante, Fig. 1 :

Les substances A et B peuvent réagir en donnant C :

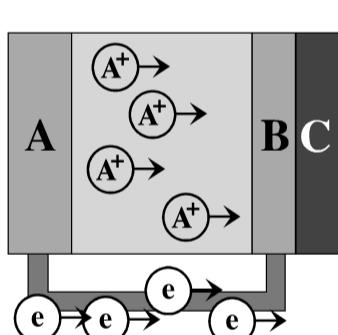
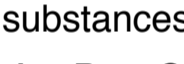


Fig. 1. La solution saline est un conducteur seulement pour les ions A^+ , le fil de cuivre seulement pour les électrons.

La réaction est gouvernée par la différence de potentiel chimique

$$\Delta\mu = (\mu_A + \mu_B) - \mu_C.$$

Les potentiels chimiques des différentes substances sont tabulés. Quand l'avancement de la réaction est ξ , l'énergie

$$E = \Delta\mu \cdot \xi$$

est cédée en tant qu'énergie électrique.

Comment fonctionne la cellule ?

Aussi longtemps que les réactifs A et B sont séparés spatialement l'un de l'autre, ils ne peuvent réagir. La réaction a une *résistance de réaction* infinie, tout comme aucun courant électrique ne passe entre deux corps ayant des potentiels électriques différents, tant qu'il n'y a pas de conducteur entre eux. Si A est un gaz et si nous relierions les récipients avec un tuyau, A peut s'écouler vers B et la réaction peut commencer. Dans ce cas, cependant, toute l'énergie qui est cédée sera utilisée, ou gâchée, pour la production de chaleur. Nous établissons maintenant une liaison d'un type particulier, voire la Figure 1.

A et B ne sont pas reliés par une liaison mais par deux. L'une d'elles – une solution saline (appelée l'électrolyte) – est perméable ou est un conducteur seulement pour les ions A^+ , mais pas pour les électrons e . L'autre liaison – un fil de cuivre – est un conducteur pour les électrons et un non-conducteur pour les ions A^+ . Maintenant, A peut passer à B seulement en se séparant en A^+ et e . A^+ circule à travers le conducteur de A^+ et e à travers le conducteur de e . Arrivés à B, ils peuvent réagir avec B et donner C. Pour le moment, toute l'énergie cédée servirait encore à produire de la chaleur. Toutefois, nous avons maintenant la possibilité d'utiliser l'un des deux courants pour actionner quelque chose. Il est plus confortable de choisir le courant d'électrons. De cette façon toute l'énergie libérée peut être captée.

L'énergie sortante peut être exprimée au moyen de la différence de potentiel électrique $\Delta\phi$ et de la charge électrique Q . Nous avons :

$$\Delta\phi Q = \Delta\mu \xi.$$

Puisque $Q = z F \xi$ (z est un entier petit, dépendant de la nature de la réaction, et F est la constante de Faraday), nous obtenons la différence de potentiel électrique de la cellule :

$$\Delta\phi = \Delta\mu z F.$$

En résumé : la charge électrique doit remonter à l'intérieur de la cellule, c'est-à-dire contre sa propre tendance naturelle. Pour ce faire, les porteurs de charge ont besoin d'une autre force motrice. C'est la différence de potentiel chimique. Ainsi les porteurs de charge vont à l'intérieur de la cellule en grimpant la montagne du potentiel électrique et en descendant la montagne du potentiel chimique.