

Titre : LP D1 Conservation de l'énergie

Présentée par : Camille MERIDJA

Rapport écrit par : Camille MERIDJA

Correcteur : Jules FILLETTE / Julien FROUSTEY

Date : 04/05/20

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Tout en un PCSI		Dunod	

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Pré-requis : Mécanique : PFD, TEC, TEM, forces conservatives ; Thermo : Premier principe ; Relativité : formalisme quadrivectoriel, $E = \gamma mc^2$, quadri-impulsion

Intro : Le but de la leçon est de revenir sur différents aspects de la conservation de l'énergie dans différents domaines de la physique.

« Définition » de l'énergie comme le nom générique de différentes grandeurs physiques de dimension $M L^2 T^{-2}$ pouvant être échangées entre systèmes n'étant ni créées ni détruites

I) Conservation de l'énergie en physique classique ...

1) En mécanique newtonienne

Exemple d'une balle chutant avec frottement : la dérivée temporelle de l'énergie mécanique est strictement négative sauf en l'absence de terme de frottement

Problème du pendule simple sans frottement à partir du TEC, résolution aux petits angles et mise en évidence de la conservation de l'énergie mécanique

2) En thermodynamique

Définition de l'énergie interne U comme une fonction d'état extensive comprenant les énergies cinétiques et potentielles microscopiques

Rappel du premier principe comme principe de d'existence de l'énergie interne et comme expression de la conservation de l'énergie

Illustration de la conservation de l'énergie via l'expérience de Joule de l'équivalence « chaleur » / travail et via le transfert d'énergie par frottements solides (compo 2006)

II) ... et en relativité restreinte

Conservation du quadrivecteur impulsion total avant et après un choc => conservation de l'énergie + conservation de l'impulsion

Illustration sur la création d'antiproton par collision proton-proton, notion d'énergie cinétique seuil et de chaleur de réaction, intérêt des collisions symétriques (ref du labo = ref du centre de masse)

Conclusion : Théorème de Noether généralise la conservation de l'énergie comme résultant de la symétrie de translation temporelle.

Questions posées par l'enseignant

Exemple de la balle qui s'arrête par frottement, que se passe-t-il d'un point de vue de l'énergie ?

Les frottements de l'air provoquent de l'échauffement

Quand est-ce que la balle perd majoritairement de l'énergie ?

Quand elle touche le sol.

Donc où va l'énergie ?

Énergie interne du sol et de la balle (surtout). (On peut discuter sur cet exemple de coefficient de restitution, collision élastique ou non.)

Peut-on toujours identifier $ML^2 T^{-2}$ à une l'énergie ?

Pas suffisant mais nécessaire.

- **Partie méca**

On va tomber sur une quantité conservée, qui est l'énergie méca. Qu'entends-tu par conservée ?

Elle est conservée dans le temps en l'absence de travaux de forces non conservatives.

Comment définis-tu l'énergie potentielle en méca ?

Une force conservative peut s'écrire $-\text{grad}(E_p)$

L'énergie est-elle définie à une constante près ?

Oui, en mécanique classique.

A-t-on oublié un détail dans le problème du pendule ?

La tension du fil qui ne travaille pas.

La tension est-elle conservative ?

Non, sinon E_p serait fonction de θ et la tension aurait une composante selon e_θ . Pour préciser le raisonnement : la tension dépend de θ (on peut calculer son expression à partir du PFD), donc si elle dérivait d'une énergie potentielle, cette énergie potentielle dépendrait aussi nécessairement de θ . Or en prenant le gradient, la tension devrait avoir une composante suivant e_θ , ce qui n'est pas le cas.

Que peux-tu tirer comme message de l'étude du pendule ?

étude énergétique plus efficace

Qu'est-ce qui fait que ça se résout trivialement ?

(la tension ne travaille pas)

Mais on est dans quelle classe de problèmes ?

Un seul DDL, donc une seule équation nécessaire

Qu'aurais-tu fait expérimentalement ?

Amortissement du pendule qualitativement. Il est probablement plus intéressant de montrer, en vrai ou sur une simulation, la conservation de l'énergie (conversion cinétique-potentielle), qui est le titre de la leçon !

- **Partie Thermo**

Redonne la définition du premier principe de la thermo.

Postulat de l'existence de U (parfois définition de Q comme $\Delta E - W$). Le 1^{er} principe « canonique » à l'agreg, c'est : il existe une *fonction d'état extensive*, appelée énergie interne, telle que $\Delta(U + E_m) = W + Q$.

U est une ?

fonction d'état

C-à-d ?

ne dépend que de l'état à l'instant t du système via des variables d'état

Contrairement à quoi ?

Travail non conservatif, transfert thermique... qui dépendent de la transformation suivie !

C'est en fait une question de pédagogie intéressante : lorsque le premier principe affirme que U est une fonction d'état l'élève lambda ne voit pas vraiment la portée de ce postulat. En effet, il est habitué aux forces conservatives et aux variables d'état de sorte qu'il a du mal à imaginer une fonction qui ne soit pas, justement, « d'état ». Prenez donc le temps, lorsque vous affirmez ce genre de résultat, d'expliquer pourquoi ça n'était pas évident a priori, et quoi c'est une information majeure pour la suite, et qu'est ce qui fait que c'est un principe et pas un théorème (cf. plus bas).

De quoi dépend le travail et dont l'énergie interne ne dépend pas ?

travail dépend du chemin suivi

Qu'est-ce que ça change pour l'énergie et sa conservation de faire des changements de

référentiels (ici le ref barycentrique) ?

l'énergie dépend du référentiel

J'écris dans un premier réf les théorèmes énergétiques, dois-je ajouter des choses pour exprimer ces théorèmes dans un second référentiel ?

si changement de référentiel entre deux réf galiléens, pas de forces d'inertie à prendre en compte

Quelles forces d'inertie ?

Force d'inertie d'entraînement (travaille), de Coriolis (ne travaille pas)

Peut-on voir que U est extensive d'après sa définition microscopique ?

ce n'est pas évident et ça peut être mis en défaut

Qu'est-ce qui t'as permis d'utiliser l'additivité de U ?

on néglige les interactions à distance : gravitationnelles, électrostatiques

Pour quels systèmes l'additivité est mise en défaut ?

systèmes massifs, ou systèmes chargés

Pourquoi le premier principe est-il un "principe" ?

car il définit l'énergie interne et suppose que les interactions microscopiques sont à courte portée et conservatives

Plus d'explication sur le principe d'équivalence chaleur/ travail ?

Dans la machine de Joule on étudie le système constitué par l'eau seule ; on chauffe l'eau par un apport de travail (avec les pâles) puis on attend que l'eau revienne à température ambiante. L'eau a alors subi un cycle thermo à $\Delta U = 0$ et on a pu transformer intégralement du travail en « chaleur », ou plutôt en transfert thermique

Comment explique-t-on à un élève ce qui va dans Q ou dans W ?

Première réponse abstraite : Q provoque une variation conjointe de U et de l'entropie, alors que W n'agit que sur U.

Réponse élève : Q prend en compte les travaux microscopiques aléatoires et W les travaux macroscopiques moyens.

C'est une question compliquée. En bref, si on décrit tous les degrés de liberté du système, on s'attend à ce que la mécanique classique s'applique : un théorème de l'énergie cinétique et c'est réglé. Le 1^{er} principe permet (et c'est terriblement puissant) de dire que ce TEC ultra compliqué se ramène à une forme macroscopique simple avec une énergie interne fonction d'état extensive. On peut conseiller la lecture de ce BUP http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=11352, mais il faut garder à l'esprit que la distinction théorique W/Q est discutée. Cet article propose la distinction « transfert d'énergie à des modes *macroscopiques* (W) ou *microscopiques* (Q) de mouvement ».

Dans la pratique, on ne se pose quasiment jamais la question, notamment parce que comme Camille le disait, on peut presque voir le 1^{er} principe comme une définition de Q : on a ΔU , on calcule W avec les forces que l'on a identifiées ; le reste... c'est Q.

Frottements. Qu'est-ce qui t'a permis d'écrire $\Delta E_c = W_{ext}$?

On n'a pas pris en compte les travaux des forces intérieures

- **Partie Relat :**

L'argument final est qu'il est intéressant de faire des collisions entre particules, autres applications que de "designer" des accélérateurs de particules ?

Possible d'étudier la collision entre un photon et un électron -> diffusion Compton

Cette collision est-elle élastique ?

En méca classique, l'énergie est conservée donc on peut dire qu'une collision comme ça est toujours élastique.

En relat, collision élastique $\Rightarrow Q$ de réaction $= 0$, donc Compton inélastique

Historiquement, quel événement important ?

Introduction du neutrino par Pauli. **Un exemple historique simple à traiter et d'une importance théorique considérable !**

Etant donné la conclusion qu'on a tiré sur l'énergie seuil, qu'est-ce qui nous raccroche à la conservation de l'énergie ?

Lors de collisions la conservation de la quadri-impulsion permet le calcul des propriétés de la collision.

Y a-t-il une différence entre écrire la conservation des composantes du quadrivecteur et celle de la norme ?

Oui l'équation en quadrinorme contient de fait moins d'information.

A quoi ça sert du coup ?

La quadrinorme ne dépend pas du référentiel inertiel, c'est un invariant relativiste.

Théorème de Noether -Principe, hypothèses ?

Toute invariance sous symétrie continue est associée à une quantité conservée

Et pour des systèmes plus compliqués, quelle forme peuvent prendre les lois de conservation ?

Par exemple, pour un barreau qu'on chauffe ?

A quoi ressemble la conservation de l'énergie locale ?

Une équation de conservation en $d()/dt + \text{div}() = 0$

Commentaires donnés par l'enseignant

C'était long au vu des circonstances (écriture sur papier sans changer de stylo quasiment et sans avoir à effacer),

De plus sacrifier la rigueur pour gagner du temps n'est jamais un bon plan

Il aurait été sans doute plus pertinent de faire :

- I) Mécanique (avec potentiellement de la relat)
- II) Thermo

Les titres de parties sont vraiment mauvais et laissent présager une leçon ennuyante, ce qu'elle n'était pourtant pas. Il faut que les titres disent quelques chose des résultats que l'on va obtenir. Il faut sortir des titres descriptifs et privilégier des titres qui interprètent ce que l'on fait

Au début de la leçon on a beaucoup parlé de l'énergie mécanique dans des cas où elle n'était pas conservée ce qui brouille le message : il faut mentionner clairement la notion de systèmes conservatifs

L'exemple de la balle aurait été plus bienvenu pour faire la transition entre méca et thermo : commencer une leçon sur la conservation de l'énergie avec un exemple où il n'y a pas conservation c'est bof.

Il faut faire attention au premier principe de la thermo : on peut effectivement le voir de différentes manières mais dans une leçon il faut vraiment s'attacher à la version axiomatique « Il existe une fonction d'état extensive U telle que ... ». Il ne faut pas laisser penser au jury même 1/10ème de seconde que l'énoncé du premier principe ne serait pas clair dans ton esprit, même si c'est à tort

Eviter de présenter le calcul du freinage par frottements solides, ça fait utiliser le premier principe d'une part et le théorème de l'énergie cinétique d'autre part de façon plus ou moins rigoureuse et justifiée

En relat, parler du neutrino prendrait moins de temps et serait bien apprécié, en tout cas il faut bien insister sur la place de la conservation de l'énergie dans ce qu'on fait

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

L'essentiel a été retranscrit plus haut et étant données les modifications apportées à l'épreuve pour cette session 2020 il n'est plus vraiment utile de discuter plus longuement de ce format.

Plus que jamais portez un soin particulier au découpage de votre leçon et à vos intitulés ! Dans la mesure où toutes les parties ne seront pas développées vos titres doivent dire un maximum de chose sur leur contenu, quitte à être un peu long.

La qualité de ce que vous développerez doit être irréprochable de rigueur ! (On ne le répètera jamais assez). Sur les quelques minutes où vous allez faire de la physique le jury ne doit vous trouver aucun reproche à formuler.

Dernier point : il me semble que la difficulté de ce genre de leçon très transverse est de faire un tout cohérent à partir d'éléments triviaux du programme de Sup (typiquement la méca) jusqu'aux notions avancées de L3 (premier pp, relat...). Votre avantage à ce niveau c'est que vous n'aurez pas à tout traiter donc ce problème se posera un peu moins mais prêtez-y quand même une attention particulière.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

On voit mal comment cette leçon pourrait se passer d'une partie méca (Energie potentielle – force conservative, énergie cinétique, conservation de l'énergie mécanique, frottement éventuellement et relat si le cœur vous en dit mais ça n'est pas essentiel) ni d'une partie de thermo (attention alors à traiter le premier principe de manière exemplaire). Vous pouvez la compléter par exemple par une partie sur les conséquences locales de la conservation de l'énergie par exemple avec une étude du champ de température etc... Tous les domaines de la physique ont leur place ici à vous de choisir ceux que vous maîtrisez le mieux et d'en faire qqch de cohérent.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Les docteurs ne sont pas concernés par ce titre, mais on peut mettre en place diverses expériences qui mettent en évidence la conservation de l'énergie, à commencer par le rebond de la bille. Le pendule peut aussi servir utilement le message « conservation de l'énergie aux temps courts [conversion E_p / E_c] et influence des frottements au temps long jusqu'à l'arrêt].

Des expériences de Thermo peuvent peut-être aussi être mises en place mais je ne les ai pas en tête et c'est probablement sortir l'artillerie lourde pour pas grand-chose.

Bibliographie conseillée

C'est selon les domaines que vous aborderez mais allez vers des références simples et rigoureuses pour le corps de votre leçon, sans négliger d'ouvrir des ouvrages plus avancés pour effleurer les concepts plus délicats que vous aborderez en question (typiquement ouvrir le Diu de Thermo peut aider à répondre correctement aux questions sur le premier pp etc...)