

Les phénomènes quantiques macroscopiques

L'expérience qui illustre les travaux de M. Danil Doubochinski risque de perturber bon nombre de physiciens et de chercheurs qui ont vécu pendant des années en compagnie de la mécanique classique. Elle montre en effet que lorsqu'un principe nouveau est découvert, des manipulations d'une simplicité extrême peuvent le mettre en évidence ; point n'est besoin d'un matériel hypersophisticé pour observer un paradoxe. Le seul outil indispensable à cette fin est un esprit humain qui sait réfléchir.

Pierre Bonnefoy

Le matériel se limite ici à un simple pendule pesant réalisé en suspendant un aimant permanent au bout d'une tige comme on peut le voir sur la figure 1. Pour entretenir le mouvement, on place une bobine à électroaimant à la verticale du point de fixation. L'électroaimant est alimenté à travers un rhéostat par un courant sinusoïdal.

Avant d'aller plus loin, il nous semble utile de rappeler quelques principes de la mécanique classique.

Nous avons tous étudié à l'école le comportement d'un objet pesant suspendu au bout d'une tige, le tout formant un pendule. Un tel objet possède ce que l'on appelle une fréquence propre ou fréquence de résonance f_0 : il s'agit d'une caractéristique *mécanique* intrinsèque au pendule et à son environnement. On peut dire pour simplifier qu'en l'absence de frottements, si on laisse le pendule sous l'action de son seul poids, il a une tendance naturelle à osciller suivant cette fréquence particulière. En cas de frottements — ce qui se produit toujours dans la réalité — il est possible d'entretenir son mouvement en lui imprimant une force périodique de fréquence F . Au bout d'un certain temps, il s'établit un régime oscillatoire stable.

L'encadré 1 donne quelques précisions sur la théorie classique, cependant, nous pouvons dire, pour résumer, les choses suivantes :

- L'amplitude des oscillations en régime dynamique stable, dépend de la fréquence d'excitation F ainsi que de l'amplitude de la source d'excitation, mais pas des conditions initiales.

- Lorsque tous les paramètres physiques du pendule ainsi que ceux de la force d'excitation sont déterminés, alors l'amplitude et la fréquence du mouvement résultant (en régime dynamique stable) sont déterminées et uniques ; en modifiant de manière *continue* les paramètres de la force d'excitation (la fréquence par exemple), on modifiera de manière *continue* l'amplitude du mouvement.

- Pour une même dépense d'énergie de la part de la source, plus la fréquence d'excitation F est voisine de la fréquence propre du pendule f_0 , plus l'amplitude résultante du mouvement du pendule est importante — ce phénomène est connu sous le nom de résonance. Inversement, si F diffère beaucoup trop de f_0 , alors le rendement de la transmission énergétique, devient très faible, et le pendule n'oscille pour ainsi dire plus de manière perceptible.

Revenons à l'expérience ; celle-ci est décrite de manière détaillée dans

l'encadré 2, mais il est important de souligner qu'ici la fréquence d'excitation F est environ 100 fois plus grande que la fréquence propre du pendule f_0 . On écarte le pendule de sa position d'équilibre et on le lâche ; d'après la théorie classique on devrait donc s'attendre à voir le mouvement s'amortir rapidement et s'arrêter, à cause de la faiblesse du rendement de transmission énergétique et de l'influence prépondérante des frottements de l'air.

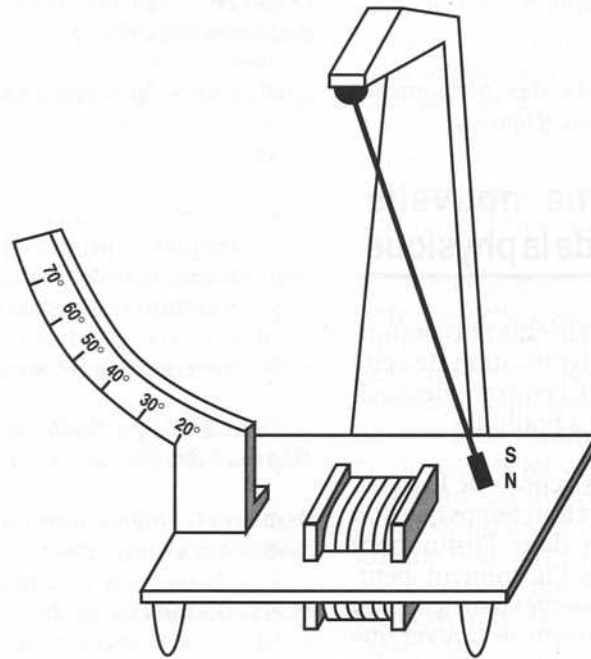
Or nous faisons les observations suivantes :

- Il s'établit un régime oscillatoire à *grande amplitude* et dont la fréquence f d'oscillation est proche de la fréquence propre f_0 du pendule. De plus cette oscillation semble relativement insensible aux variations de la fréquence d'excitation F .

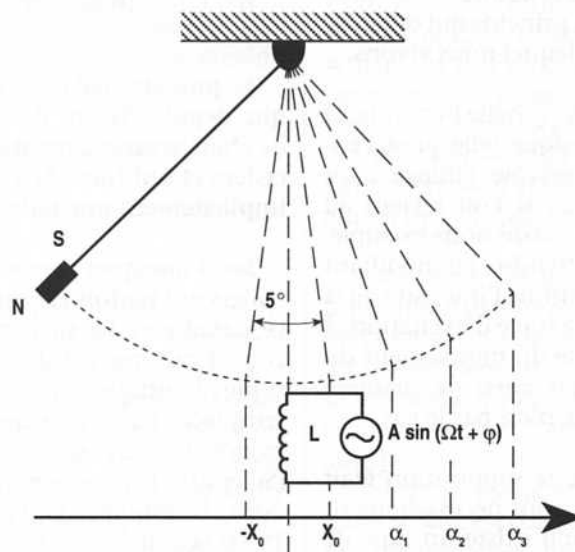
- Si l'on fait varier la tension de la source d'excitation à l'aide du rhéostat sur une grande plage, l'amplitude du mouvement oscillatoire *ne varie pratiquement pas*, ce mouvement « décroche » simplement en dessous d'un certain seuil d'excitation.

- On peut ensuite modifier les conditions initiales comme, par exemple, lâcher le pendule à une autre hauteur que précédemment, ou encore lui donner une impulsion à la main au cours du mouvement. Suivant l'intensité de cette perturbation on peut soit ne constater aucun changement dans le régime d'oscillation, soit voir le mouvement s'établir à une autre amplitude mais toujours à une fréquence proche de f_0 . Si l'on cherche à affiner cette dernière observation, l'on se rend compte qu'en fait, *le pendule n'oscille que sur un nombre parfaitement déterminé d'amplitudes discrètes privilégiées* — par exemple 9. Il est, en fait, impossible d'obtenir un régime permanent sur une amplitude intermédiaire entre deux successives de celles-là : on ne peut pas faire varier de manière *continue* le mouvement du pendule. Par contre, chacune de ces positions privilégiées est relativement insensible aux variations d'amplitude qui peuvent survenir sur la source, comme on l'a vu ci-dessus.

Figure 1



a) pendule



b) schéma équivalent

Le phénomène de quantification des états possibles était déjà connu en astronomie à propos des orbites possibles des planètes du système solaire depuis Kepler et en physique microscopique depuis Planck ; nous nous trouvons ici en présence d'effets analogues qui se produisent à notre échelle.

Appelons cela des *phénomènes quantiques macroscopiques*.

Vers une nouvelle théorie de la physique

Essayons de réfléchir plus profondément sur la signification de cette découverte avant d'en examiner quelques applications pratiques.

Comme nous venons de le signaler, il y a déjà fort longtemps que l'on sait, aussi bien dans l'infiniment grand que dans l'infiniment petit, que les objets observés (particules ou planètes) ne peuvent se trouver que dans un certain nombre d'états discrets. De même l'on savait depuis l'antiquité, qu'il n'existe que cinq solides réguliers — ou solides platoniciens — qui sont le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, l'icosaèdre et le dodécaèdre. Ce genre de constatation, que l'on peut faire dans des domaines très différents, pourrait être l'image d'un certain principe qui organise l'univers dans lequel nous vivons.

Cependant à l'échelle humaine, la mécanique classique, telle qu'on l'enseigne, nous renvoie l'image d'un monde continu ; si l'on revient au pendule présenté dans notre exemple, on pourrait s'attendre, en modifiant de manière continue l'intensité ou la fréquence, de la force d'excitation, à voir l'amplitude du mouvement du pendule évoluer aussi de manière continue ; or ce n'est pas le cas.

En fait, si cette supposition était vraie, nous devrions nécessairement en conclure qu'il existe un type de physique valable pour l'infiniment grand et l'infiniment petit d'une part, et un autre type de physique valable uniquement à l'échelle humaine d'autre part !

Encadré 1 - Modélisation mathématique

Equation de base

On rappelle qu'un système du second ordre tel que celui du pendule de l'expérience de M. Doubochinski peut être modélisé par une équation différentielle du second degré du type :

$$d^2x / dt^2 + 2\beta dx/dt + 4\pi^2 f_0^2 x + \gamma(x) = \Phi$$

où :

- x : coordonnée du mouvement (du pendule),
- f₀ : fréquence propre du pendule,
- β : coefficient de dissipation de l'énergie (frottements),
- γ : fonction traduisant la non-linéarité du pendule (si γ(x) = 0 le pendule est linéaire),
- Φ : force extérieure (entretien du mouvement).

Dans le cas particulier de notre expérience nous avons pour le pendule une fréquence de résonance f₀ = 0.5Hz et un facteur de qualité Q = πf₀/β = 30.

Φ est elle-même non linéaire :

$$\Phi = A \cdot \epsilon(x) \cdot \sin(2\pi Ft + \phi)$$

F est la fréquence de la force d'excitation,

ε(x) traduit la non-linéarité de la force, ε(x) = 1 au voisinage du solénoïde (si |x| < x₀), ε(x) = 0 sinon.

Les résultats de l'expérience figurant dans l'encadré 2 nous apprennent qu'il existe pour le mouvement une série d'amplitudes stables discrètes α_k données par l'approximation suivante :

$$\alpha_k^2 \approx 16 (1 - n/k) \text{ en radian}$$

avec

$$k = F/f \quad f \text{ étant la fréquence du mouvement résultant, } F = 50\text{Hz}$$

$$n = F/f_0 \quad (\text{pour notre expérience } n = 100)$$

Le plus étrange dans tout ceci est que depuis Platon, des générations de chercheurs et savants se sont succédées et ont travaillé en admettant implicitement une telle hypothèse.

Seuls quelques personnages particuliers ont parfois été interpellés par ce paradoxe : Einstein par exemple considérait que la théorie de la physique quantique devrait être un jour remplacée par une autre théorie qui engloberait celle-là. Il écrit ainsi dans (Scientific Papers presented to Max Born, Edimbourg, Oliver and Boyd, 1953) la conclusion suivante :

« (...) A mon avis, se fonder sur des positions théoriques de ce type, en physique, est fondamentalement insatisfaisant. D'autant qu'on ne peut renoncer à

la possibilité d'une description objective des systèmes **macroscopiques**, pris individuellement, sans voir du même coup la conception physique du monde se réduire pour ainsi dire en fumée. En fin de compte, l'idée que la physique doit s'efforcer de donner une « description réelle » d'un système individuel est bien incontournable. La nature, prise comme un tout, ne peut être pensée que comme un système individuel (existant de façon unique) et non comme un ensemble de « systèmes ».

L'expérience de M. Danil Doubochinski qui ne présente aucune difficulté technique aurait pu être réalisée depuis longtemps ; pourtant, même si certains ont pu parfois observer des curiosités expérimentales, personne n'avait semble-t-il cherché

Encadré 2 - Résultats d'expérience

Description

La figure 1 nous montre comment l'aimant au bout de la tige passe à chaque oscillation dans le voisinage du solénoïde ; ce dernier est alimenté par une source sinusoïdale de fréquence F , et il est orienté dans la direction du mouvement. Il en résulte donc une force périodique de même fréquence F , qui agit sur l'aimant du pendule dans une petite plage par rapport à l'amplitude de ses oscillations (la plage de localisation de cette force correspond à un déplacement angulaire d'environ 5°). La fréquence propre du pendule est $f_0 = 0,5\text{Hz}$, et le facteur de qualité $Q=30$.

Etats quantiques

Des oscillations entretenues sont amorcées à la fréquence propre $F=f_0$ pour une tension sur le solénoïde de 1.2V , puis la fréquence d'excitation est élevée progressivement.

Lorsque $F=5\text{Hz}$, le pendule n'oscille de manière stable que pour une seule amplitude : $\sim 68.0^\circ$.

Lorsque $F=20\text{Hz}$, il existe quatre états stables : 30.0° , 59.5° , 74.2° et 84.9° .

Lorsque $F=50\text{Hz}$, il existe 9 états stables : 30.0° , 43.1° , 53.3° , 59.5° , 68.0° , 74.2° , 79.8° , 84.9° et 89.3° .

Dans tous les cas, il est impossible de faire osciller le pendule sur une amplitude intermédiaire de deux successives de celles-là, de plus la fréquence f d'oscillation, est relativement proche de sa fréquence de résonance f_0 .

L'état stable sur lequel le pendule se place dépend essentiellement des conditions initiales : si l'on imprime avec la main une impulsion suffisante sur la tige, le pendule change d'état.

Le nombre d'états stables dépend des paramètres physiques du pendule et du rapport des fréquences de la source sur la fréquence du mouvement : F/f . Le tableau 2 donne les mesures effectuées pour $F=50\text{Hz}$.

Influence des variations de la force d'excitation

La force d'excitation du pendule est en fait mesurée par la tension aux bornes du solénoïde. Pour $F=50\text{Hz}$, le pendule étant sur « l'orbite » voisine de 43.1° , on fait varier cette tension de 1.2V à 20V — donc dans un rapport de 17. Comme on peut le voir sur le tableau 3, l'amplitude et la fréquence des oscillations varient de moins de 0.5% .

Influence des variations de la fréquence d'excitation

Les amplitudes à 30.0° , 59.5° , 74.2° et 84.9° sont obtenues pour des fréquences F de la source de 20Hz , 50Hz , 100Hz et 1000Hz .

à approfondir le problème. La seule difficulté est donc uniquement d'oser une hypothèse.

M. Danil Doubochinski pense que quantification et discontinuité sont des propriétés générales de la nature, le problème posé aux savants étant de savoir comment observer celles-ci.

Pour étayer cette opinion, nous pourrions utiliser une analogie bien connue des spécialistes de la cristal-

lographie : si nous nous promenons dans une campagne, le long d'un vignoble, la plupart du temps on a l'impression qu'il n'y a aucun espace entre les différents plants. Pourtant lorsque nous nous trouvons à un emplacement privilégié — c'est-à-dire lorsque nous sommes dans un alignement des rangées — nous voyons l'espace entre les plants. On se rend alors compte effectivement de la discontinuité de la plantation. Il y a donc bien discontinuité et cependant, l'observateur doit créer des con-

ditions expérimentales particulières (bien choisir son point d'observation) pour avoir cette image de la réalité.

Pour en revenir à l'expérience de M. Danil Doubochinski, nous pouvons dire que le problème est le même : il faut créer de bonnes conditions expérimentales pour pouvoir observer des discontinuités dans la nature. En l'occurrence, il s'agit ici d'optimiser le couplage entre plusieurs phénomènes ondulatoires qualitativement très différents.

Le modèle mathématique issu de cette nouvelle théorie a été ensuite repris pour calculer les orbites des planètes du système solaire, ainsi que celles des satellites de ces planètes. Le modèle actuel utilisé par les astrophysiciens, la loi de Titius-Bode, ne s'applique qu'aux planètes et n'est pas très satisfaisant : en effet il repose sur une fonction empirique dont la variable vaut moins l'infini pour Mercure, puis $0,1,2\dots$ pour Vénus, Terre, Mars... Le tableau 1 donne la comparaison des mesures expérimentales avec la loi de Titius-Bode d'une part, et avec le modèle issu de la conception quantique macroscopique d'autre part. On peut y voir que le modèle de Titius-Bode diverge par rapport à la réalité pour les planètes les plus lointaines (jusqu'à 50% pour Pluton !). Le modèle quantique macroscopique, quant à lui est non seulement très proche de la mesure pour toutes les planètes, mais en plus s'applique avec succès aux satellites des planètes — ceux de Saturne en particulier — il n'existait jusque là aucun modèle pour ces satellites.

Pour rester sur le même sujet, la physique classique pose — ou aurait dû poser — un problème majeur aux astrophysiciens : si nous considérons que l'énergie qui entretient l'existence de la vie sur Terre provient du Soleil, nous voyons que l'ordre de grandeur des fréquences du rayonnement solaire est colossal devant celui des phénomènes qui se produisent sur la Terre. Par exemple la lumière visible émise par le soleil présente des fréquences de l'ordre de 10^{15} Hertz tandis que les fréquences des cellules et des organismes multicellulaires de

