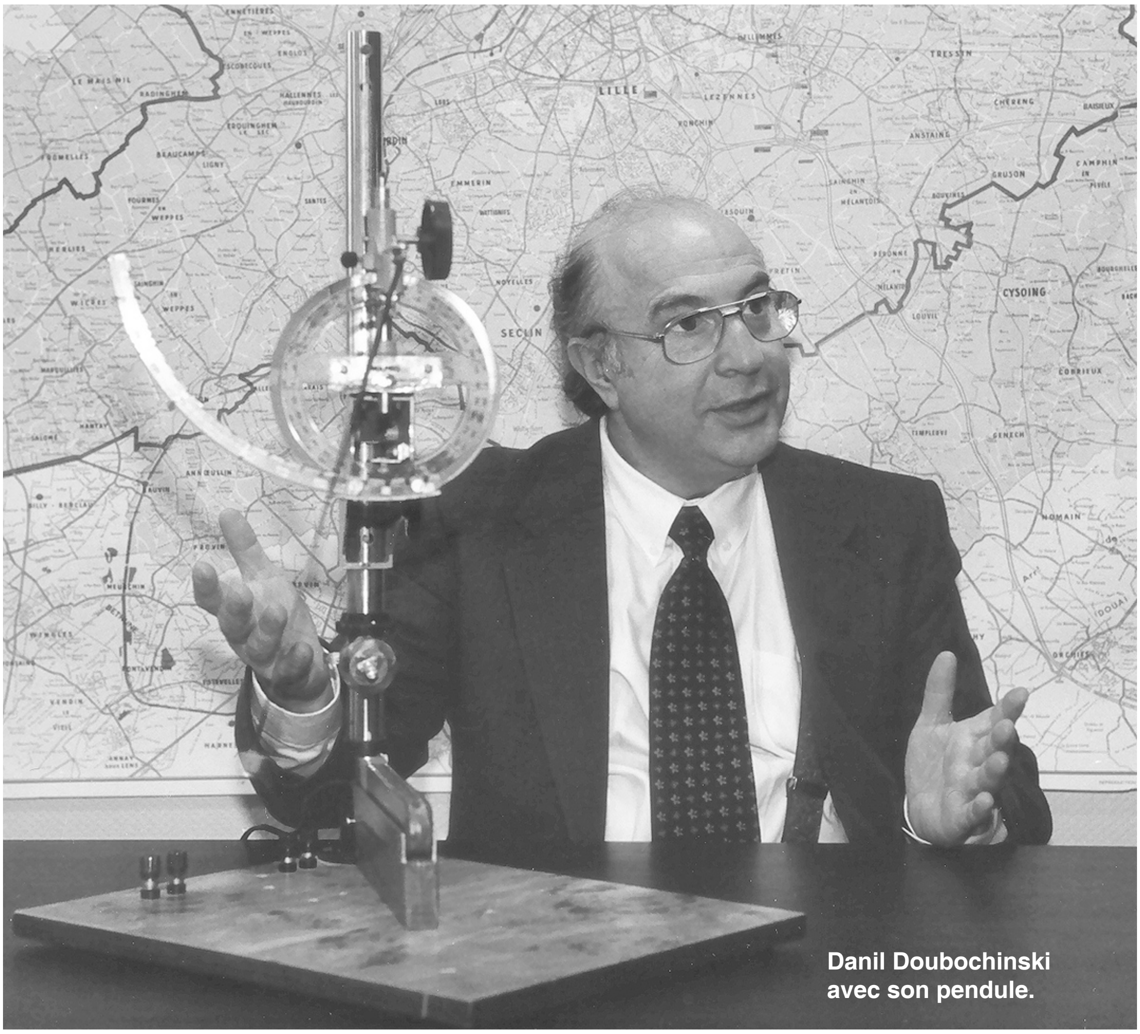
Amplitudes quantiques
une propriété élémentaire des systèmes vibratoires

JONATHAN TENNENBAUM



Danil Doubochinski avec son pendule.

L'un des points forts de la physique et de l'ingénierie en Union soviétique a été l'étude de ce que l'on appelle parfois les « oscillations non linéaires ». Un grand nombre de résultats théoriques et expérimentaux en sont issus mais, la plupart du temps, peu d'entre eux sont connus en Occident.

C'est ainsi qu'une découverte effectuée dans les années 60 et 70 est passée pratiquement inaperçue : celle du phénomène de *quantification d'amplitudes* pour une grande variété de systèmes oscillants macroscopiques. Ce phénomène, et le principe physique dont il découle, ont été découverts par Danil Doubochinski et son frère Iacov, alors qu'ils étaient étudiants à l'université de Moscou. Plusieurs équipes en Union soviétique ont mené des recherches poussées qui touchaient une grande variété de problèmes quant à la génération et la transmission d'énergie, les systèmes d'hyperfréquences, la physique atomique et nucléaire, la mécanique quantique et d'autres domaines.

Danil Doubochinski, qui travaille actuellement à Paris, a récemment attiré l'attention sur l'*importance fondamentale* de sa découverte en tant que *pont* entre les physiques dites classique et quantique. Selon lui, elle apporte une réponse à la question centrale que Planck, Einstein, Schrödinger et d'autres avaient posée au début du XXe siècle, sans pouvoir y répondre de manière satisfaisante : la question de l'origine physique et de la nature des *discontinuités* apparentes (les soi-disant « sauts quantiques ») dans les échanges d'énergie entre les atomes de la matière et le champ électromagnétique. De plus, Doubochinski insiste sur le fait que son principe présente la possibilité d'applications technologiques de grande portée, incluant de nouveaux types d'appareils électromécaniques capables de convertir avec une très grande efficacité de l'énergie oscillatoire entre des fréquences différant de deux ou plusieurs ordres de grandeur (mélangeurs, dessalement, fusion, refroidissement, convertisseur de fréquence et d'énergie, etc.).

L'auteur a eu l'occasion de rencontrer Danil Doubochinski à plusieurs reprises, de discuter sur ses travaux et d'assister à quelques très belles expériences de démonstration de l'effet de quantification. L'une d'entre elles – un pendule en interaction avec un champ magnétique alternatif – est si simple, qu'elle devrait être étudiée dans les cours de physique (**figure 1**).

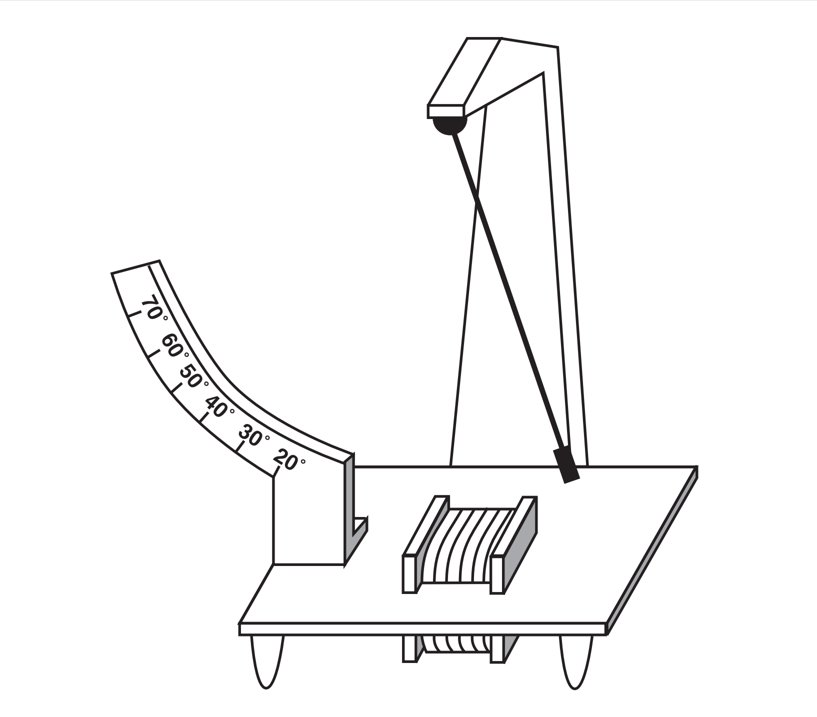


Figure 1. Schéma du pendule de Doubochinski. Sur la page de gauche, Danil Doubochinski avec son pendule.

Le pendule de Doubochinski

Le pendule consiste en un bras rigide contraint à se déplacer dans un plan vertical, à l'extrémité libre duquel est fixé un petit aimant permanent. Un électroaimant est installé juste en dessous du point le plus bas du mouvement du pendule – la position verticale du pendule – avec son axe aligné horizontalement dans le plan du mouvement du pendule. Ainsi, à chaque instant, l'électroaimant exerce une action d'accélération ou de décélération sur l'aimant se trouvant à l'extrémité du pendule, dépendant de la polarité du courant circulant dans l'électroaimant et de la direction du mouvement du pendule. La longueur de l'électroaimant est choisie petite par rapport à celle du pendule, de telle sorte que l'action de l'électroaimant sur le pendule ne devienne significative que dans une petite partie de la trajectoire du mouvement du pendule, lorsque l'extrémité libre de celui-ci se trouve dans une « zone d'interaction » relativement petite, correspondant environ à la largeur de l'électroaimant. Cette hétérogénéité spatiale du champ agissant sur le pendule joue un rôle clef dans la genèse de la « quantification d'amplitude ».

On relie alors l'électroaimant à une source de *courant alternatif sinusoïdal*, dont la fréquence f et la tension peuvent varier dans une large gamme (la période propre du pendule est de l'ordre de la demi-seconde). Lorsque la tension devient suffisamment élevée pour une interaction significative entre l'électroaimant et le pendule, on observe les phénomènes caractéristiques suivants.

Lorsqu'il est lâché depuis une position de départ arbitraire, le pendule voit son mouvement évoluer vers un mode faisant partie d'*un ensemble discret de modes oscillatoires stables* ayant des amplitudes nettement différentes mais approximativement la même période d'oscillation (proche de la période propre du pendule en l'absence de perturbation). (**Figure 2.**) Dans chacun de ces modes, l'énergie perdue par friction au cours du mouvement du pendule est compensée par l'énergie récupérée par le pendule auprès du champ magnétique oscillant, d'une manière autorégulée. Le « choix » que fait le système parmi l'ensemble de modes stables est déterminé par les conditions initiales.

De plus, le pendule de Doubochinski présente la propriété remarquable que les amplitudes « quantiques » et les modes stables correspondants du pendule *ne changent pas* de manière appréciable, lorsque l'*intensité* de la « force extérieure » (le champ alternatif) varie sur une très large gamme. Les amplitudes sont cependant très sensibles aux changements de la fréquence du champ appliqué. Plus cette fréquence est élevée, plus large est le réseau de modes stables dont le pendule est susceptible (**tableau 1**).

C'est exactement ce type de comportement – remarquablement différent de celui que présentent les résonateurs linéaires de la mécanique classique – qui est caractéristique des processus quantiques dans le domaine microscopique tels que l'effet photoélectrique et l'absorption des radiations électromagnétiques par les atomes. [1]

La « quantification » des amplitudes du pendule s'avère très solide : les modes sont stables en présence de vibrations, et le pendule répond à de faibles perturbations en effectuant de petites oscillations amorties autour de l'amplitude « quantique » en question. Cette stabilité est importante pour les applications techniques du principe de Doubochinski. Des perturbations importantes peuvent faire « sauter » le pendule d'un mode à un autre, à la manière des « sauts quantiques » de la physique atomique.

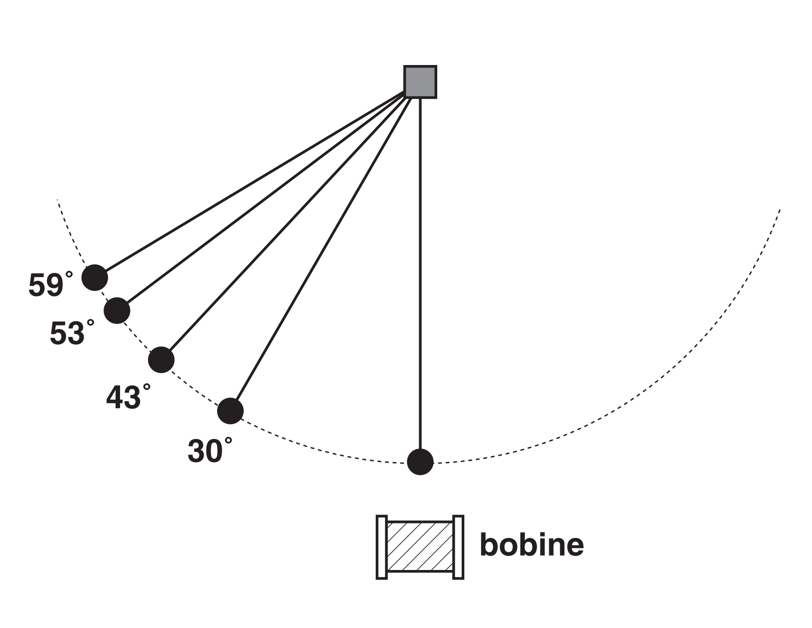


Figure 2. **Les quatre premières amplitudes quantiques du pendule de Doubochinski, pour une fréquence du champ magnétique F = 50 Hz.**

Ce pendule est un exemple parmi d'autres systèmes oscillatoires macroscopiques présentant un comportement « quantique » similaire. Certains de ces systèmes sont techniquement plus difficiles à réaliser, mais sont plus naturels d'un point de vue physique. L'un d'entre eux est extrêmement proche des « oscillateurs élémentaires » dans un champ électromagnétique, que Planck avait étudiés dans ses recherches sur la loi du rayonnement du corps noir. On est en droit de penser que le développement historique de la physique quantique aurait été différent si Planck et ses contemporains avaient connu le type de phénomène mis en évidence par le pendule de Doubochinski.

Il est remarquable qu'en dépit d'une considérable attention accordée aux systèmes dits « non linéaires », à la « théorie du chaos », à « l'auto-organisation », aux « systèmes dissipatifs », etc., dans les milieux scientifiques au cours des vingt dernières années, personne ne semble avoir remarqué un exemple aussi simple, élémentaire et en même temps si fondamental. Cette circonstance embarrassante est probablement due au fait que les « études non linéaires » avaient plus à voir avec les jeux mathématiques qu'avec la réalité physique. La

Tableau 1

Les amplitudes quantiques stables du pendule de Doubochinski en fonction de la fréquence F du champ magnétique, telles qu'observées lors d'expériences.

F (Hz)	Amplitudes du pendule							
5					68°			
20	30°			59°		74°		85°
50	30°	43°	53°	59°	68°	74°	80°	85°

Les fréquences stables ne dépendent pas de façon significative des dimensions de la zone d'interaction (largeur de la bobine), à condition que cette zone soit plus petite par rapport au rayon du pendule.

raison plus profonde est un manque de compréhension du sens véritable, ontologique, de la « non-linéarité ». Un processus véritablement non linéaire, tel que le type de découverte faite par Doubochinski, ne peut *par définition* être représenté de manière consistante dans les limites de n'importe quel système formel de mathématique.

Au-delà de la « mécanique classique »

A première vue, les processus étudiés par Doubochinski sembleraient tomber dans le domaine de la *mécanique classique (macroscopique)*. Examinant par exemple le pendule de Doubochinski, n'importe quel physicien ou ingénieur pourrait facilement écrire une équation différentielle simple décrivant son mouvement et n'utilisant rien d'autre que les lois de la mécanique classique et une loi décrivant la force externe agissant sur le pendule (**encadré 1**). Certains seraient tentés, de ce fait, de considérer que le travail de Doubochinski n'est qu'un simple exercice ne présentant pas d'intérêt fondamental.

La situation est cependant plus *subtile* qu'il n'y paraît.

D'abord, d'un point de vue purement technique, notre physicien ou ingénieur constatera que l'équation différentielle décrivant le pendule de Doubochinski selon la mécanique classique, comprend une *non-linéarité mathématique formelle* qui rend l'équation impossible à résoudre à partir de n'importe quelle méthode connue d'analyse mathématique. De plus, les amplitudes quantiques, que l'on observe dans les mouvements réels, sont remarquablement *absentes* des solutions de l'équation différentielle issues des simulations informatiques usuelles reposant sur des approximations numériques. [2]

Ensuite, mis à part les difficultés mathématiques que cela introduit, la variation spatiale du champ de force dans le pendule de Doubochinski (et les systèmes d'un type similaire) signifie que la « force externe » que subit le pendule à tout moment, dépend non seulement du *temps* mais également de la *position* momentanée du pendule elle-même. Cette dépendance de la force externe par rapport à la position, qui est remarquablement absente des discussions des manuels classiques sur les « oscillations forcées », permet au pendule, dans un certain sens, de réguler son échange d'énergie avec la source externe – une circonstance qui est clef pour le comportement mis en évidence par Doubochinski. Ce dernier utilise l'expression *« oscillations argumentaires »* pour décrire le cas général dans lequel la position ou *configuration* momentanée d'un système oscillant intervient comme variable dans l'expression fonctionnelle pour la *force oscillante externe* agissant sur celui-ci. La possibilité d'autorégulation de l'échange d'énergie est une caractéristique générale des oscillations argumentaires.

Enfin, bien que Doubochinski et ses collaborateurs aient développé des méthodes mathématiques pour l'analyse de la quantification des amplitudes et des autres propriétés des « oscillations argumentaires », ceux qui cherchent à faire une *déduction* mathématique du phénomène à partir des « lois de la mécanique classique » risquent d'être *déçus*. L'analyse théorique mathématique de Doubochinski manque de la qualité de *complétude logique*, qui est caractéristique du traitement des oscillateurs linéaires, par exemple, dans les manuels de mécanique analytique. Certains critiques considèrent que son analyse de la quantification des amplitudes n'est pas fiable, voire erronée.

En fait, si nous n'avions pas *connaissance*, par des *expérimentations directes,* que le phénomène d'amplitude quantique *existe* réellement, nous ne serions probablement pas convaincus par les arguments analytiques que Doubochinski et ses collaborateurs ont avancés. Toutefois, ces arguments – que nous examinerons rapidement plus loin dans cet article – n'ont jamais eu la *prétention* d'être une théorie mathématique autosuffisante *a priori*. Ils sont le reflet d'années de recherches expérimentales sur les systèmes oscillants du monde réel et ne prétendent que compléter – et non pas remplacer ! – ces résultats expérimentaux.

Loin de prétendre *déduire* le comportement de son pendule à partir

Encadré 1

L'équation différentielle classique pour un pendule circulaire simple est

$$ml\ddot{\varphi} = -mg \sin\varphi \qquad (1)$$

où φ est le déplacement angulaire du pendule depuis sa position verticale et l la longueur du pendule. Le terme $-mg \sin\varphi$ représente la composante de la force gravitationnelle dans la direction du mouvement du pendule.

L'équation est habituellement écrite :

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \sin\varphi = 0, \text{ où } \omega_0 = (g/l)^{1/2}$$

Pour de petites oscillations $\sin\varphi \approx \varphi$, et l'équation correspondante $\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \sin\varphi = 0$, a comme solutions les vibrations sinusoïdales simples $\varphi = a \sin(\omega_0 t + b)$, de fréquence $f_0 = \omega_0/2\pi$ (appelée la fréquence propre du pendule).

L'équation (1) ne prend pas en compte l'effet d'une dissipation frictionnelle d'énergie ; pour cela, il faut introduire un terme $-\beta\dot{\varphi}$ sur la partie droite de l'équation (1), où β est un coefficient de friction. Nous obtenons ainsi l'équation

$$\ddot{\varphi} + \beta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \sin\varphi = 0 \qquad (2)$$

De plus, dans le cas du pendule de Doubochinski, nous avons une force oscillante externe qui agit quand le pendule se trouve dans la « zone d'interaction ». La force peut être exprimée comme $A\varepsilon(\varphi) \sin(vt)$, où $\varepsilon(\varphi) = 1$ pour $|\varphi| \leq \varphi_0$, $\varepsilon(\varphi) = 0$ pour $|\varphi| > \varphi_0$. $\varphi = v/2\pi$ est la fréquence du champ externe, A est l'amplitude.

Cela nous mène à l'équation complète pour le pendule de Doubochinski :

$$\ddot{\varphi} + \beta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \sin\varphi = A\varepsilon(\varphi) \sin(vt)$$

Dans le cas de petites oscillations, quand le pendule se trouve dans la zone d'interaction, l'équation peut être réduite ainsi :

$$\ddot{\varphi} + \beta\dot{\varphi} + \omega_0 \varphi = A \sin(vt)$$

ce qui est l'équation classique d'« oscillations forcées » d'un oscillateur harmonique (amorti). (Voir encadré 3.)

des « lois de la physique classique », Doubochinski voit dans ce comportement la manifestation d'un *nouveau principe physique*, qui n'est *pas* inclus dans la physique classique telle qu'on la comprend habituellement. Ce point est à l'origine d'une grande confusion et nécessite un petit détour, avant que nous examinions de plus près les oscillations pendulaires de Doubochinski.

Kepler contre la « réalité virtuelle » de Lagrange

Au cours des deux cents dernières années, l'influence de la *Mécanique analytique* de Lagrange sur l'enseignement scientifique courant, a été à l'origine du préjugé largement répandu selon lequel la « mécanique classique » constituerait le parfait exemple d'une *théorie physique complète*. Du point de vue des principes de physique, il est supposé qu'il ne resterait rien de *fondamentalement nouveau* à découvrir dans ce domaine. Doubochinski ne partage pas ce point de vue.

A strictement parler, bien entendu, la découverte par Planck du quantum d'action et l'élaboration qui s'ensuit de la mécanique dite ondulatoire par Schrödinger, impliquaient *déjà* une correction fondamentale de la mécanique classique. On apprend cependant dans les manuels de physique habituels que cette correction, bien qu'elle ait été significative dans le domaine des objets physiques microscopiques, peut être *entièrement négligée* lorsque l'on a affaire à des systèmes de corps macroscopiques. La raison invoquée pour cela, est la valeur pratiquement *infinitésimalement petite* du quantum de Planck par rapport aux ordres de grandeur des actions mises en œuvre dans le mouvement des corps macroscopiques. Parmi ces derniers figureraient le pendule de Doubochinski et d'autres systèmes macroscopiques appartenant au domaine traditionnel de la « mécanique classique ».

Des générations de physiciens et d'ingénieurs auxquels a été inculqué le formalisme mathématique de Lagrange et de Hamilton, considèrent souvent comme évidente en soi l'idée selon laquelle un système mécanique macroscopique est, par principe, *totalement équivalent* à l'ensemble correspondant d'équations différentielles ou intégrales dérivées des méthodes de mécanique analytique lagrangienne et hamiltonienne. Beaucoup s'empresseront de rajouter que, bien entendu, certaines idéalisations, simplifications et approximations sont toujours effectuées en pratique, afin de réduire le nombre des variables et rendre les équations mathématiques plus maniables. Cependant, cette pratique est purement pragmatique et ne contredit pas le *principe* admis d'équivalence entre les systèmes physiques et mathématiques.

Au cours de la période récente, ce point de vue a été poussé à l'extrême par certains qui ont suggéré que la physique *dans son ensemble* était déjà pratiquement *complète* en ce qui concerne ses fondements. Les « forces fondamentales » étant déjà essentiellement connues, tout ce qu'il resterait à faire serait de résoudre les équations ! Cette approche trouve son expression dans la tendance croissante dans l'enseignement de la physique, et même de la physique expérimentale, à remplacer des expériences réelles par des *expériences virtuelles* sur ordinateur. La prochaine étape pourrait bien être la création de « laboratoires virtuels » dirigés par des « scientifiques virtuels » !

Dans le même ordre d'idée, cette tendance à faire davantage usage de *simulations informatiques à grande échelle,* afin de remplacer la pratique coûteuse en temps et en argent qui consiste à tester de véritables systèmes prototypes, a entraîné certaines conséquences fâcheuses. L'instabilité dynamique dangereuse de la célèbre voiture « Classe-A » conçue et testée sur ordinateur par Mercedes-Benz, a été révélée en 1997 après plusieurs tonneaux au cours d'essais de conduite indépendants alors que le véhicule était déjà sur les chaînes de production. De la même manière, les Etats-Unis on connu au cours des années 90 une longue série de pannes catastrophiques dans le lancement de systèmes de fusées qui avaient été testés sur ordinateur, ainsi que l'échec complet de deux missions Mars de la Nasa, qui avaient très bien fonctionné au cours de simulations de « réalité virtuelle ». On pourrait donner de nombreux autres exemples.

Les désastres provoqués par une confiance excessive dans les simulations informatiques n'ont pas dû surprendre les « vieux routiers » de la science, de l'industrie et de l'ingénierie – ceux-ci ont appris, à partir d'une longue et parfois pénible expérience, la différence entre le comportement réel des systèmes physiques et la « réalité virtuelle » des manuels de mécanique analytique.

Le problème n'est pas une simple question de précision numérique, il s'agit d'un problème *qualitatif* : les méthodes mathématiques de la physique, bien qu'utiles et indispensables dans les mains de physiciens et d'ingénieurs expérimentés, sont par leur nature même *incapables* de représenter la réalité physique *en tant que telle*. La mise en œuvre avec succès de la technologie dépend toujours des pouvoirs uniques de l'*esprit humain* qui peut saisir un processus physique *dans son ensemble* et corriger constamment les erreurs qui découlent inévitablement de toute représentation purement formelle de la réalité. Ce sont les mêmes pouvoirs créateurs qui permettent aux scientifiques originaux de découvrir des *anomalies* dans des domaines considérés comme « parfaitement compris » par la théorie physique reconnue et acceptée par tout le monde, et de découvrir de nouveaux principes physiques non pris en compte par la connaissance scientifique formelle existante.

C'est exactement cette question qui faisait l'objet d'une énorme bataille sur le devenir de la science française, il y a deux siècles, entre les cercles associés à Monge, Ampère, Arago et Fresnel, d'une part, et les forces oligarchiques représentées par Laplace, d'autre part. Malheureusement, Laplace et ses partisans sont arrivés à leurs fins : remplacer la géométrie physique, qui occupait une place prioritaire dans le programme originel de l'Ecole Polytechnique, par un enseignement centré sur la mécanique analytique dans sa forme la plus abstraite, incluant plus particulièrement la *Mécanique céleste* de Laplace inspirée de Newton.

La *Mécanique céleste* de Laplace a été imposée en tant que « standard » pour la physique mathématique pour des raisons politiques, et cela n'a rien à voir avec ses mérites scientifiques. Bien au contraire : la faillite complète de la *Mécanique céleste* pour rendre compte de la caractéristique la plus cruciale de notre système solaire – la *quantification* des orbites planétaires selon des principes harmoniques, démontrée par Kepler deux siècles auparavant (**encadré 2**) – démontre que la forme newtonienne-laplacienne de physique mathématique est *intrinsèquement erronée* et *ne* correspond *pas* à la réalité.

C'est ici que l'on retrouve Doubochinski. Il considère la quantification des orbites du système solaire comme une manifestation, dans l'astronomie, du même principe de « quantification d'amplitude » démontré à l'échelle du laboratoire par son pendule et par certains appareils électromécaniques du même type. Doubochinski a lui-même effectué une tentative préliminaire de rendre compte des valeurs des orbites planétaires selon l'hypothèse qu'elles représenteraient une forme d'« oscillations argumentaires ». [3]

Plus important pour notre propos, c'est la critique que Doubochinski fait de la conception de « force » de Newton. Il blâme Newton d'avoir introduit une *erreur* fondamentale dans la physique, par rapport au point de vue original et bien supérieur de Kepler.

Le concept de force de Newton comporte trois idées implicites interconnectées que Doubochinski rejette. La première est de supposer que la dépendance mathématique du mouvement d'un corps à la « force appliquée » se fait à la manière d'un « esclave ». La deuxième est de penser qu'une « force » peut agir sans être elle-même *changée* ou influencée par le système sur lequel elle agit. La « troisième loi » de Newton d'action et de réaction n'est pas suffisante pour remédier à ce problème car elle suppose toujours une forme simpliste de force d'*action vectorielle entre deux points* qui n'existe pas dans la réalité. Enfin, l'erreur essentielle se trouve dans la tentative de décomposer les interactions des systèmes physiques en une somme d'actions de point à point supposées élémentaires.

Selon notre point de vue, qui est cohérent avec celui de Kepler et de Leibniz, les « forces » telles que la gravitation que nous sentons nous tirer vers la Terre, n'existent pas en tant qu'entités isolées comme la physique de Newton les représente de manière simpliste. Ces « forces » sont simplement des *effets* dérivés de la *géométrie physique* keplérienne unifiée du système solaire. Lorsque nous soulevons un caillou de la surface de la Terre, nous exerçons implicitement un travail sur l'organisation du système solaire dans son ensemble, et pas simplement sur un champ de force gravitationnelle de la Terre supposé élémentaire.

De même, l'idée de « force externe » qui peut, suivant l'expression de Leibniz, servir de « fiction utile » pour résoudre certains problèmes de mécanique, ne devrait pas être prise pour plus que cela. Une « force externe » est une approximation simpliste pour ce qui est, dans la réalité, une *interaction* entre systèmes physiques – une interaction dont l'existence découle de la circonstance que les systèmes interagissant n'existent jamais en tant qu'entités isolées en premier lieu, mais seulement en tant que sous-systèmes de l'Univers considéré en tant qu'unité organique. En d'autres termes, l'interaction apparente des corps physiques ne peut pas être séparée de leur propre état interne qui reflète l'Univers dans son ensemble.

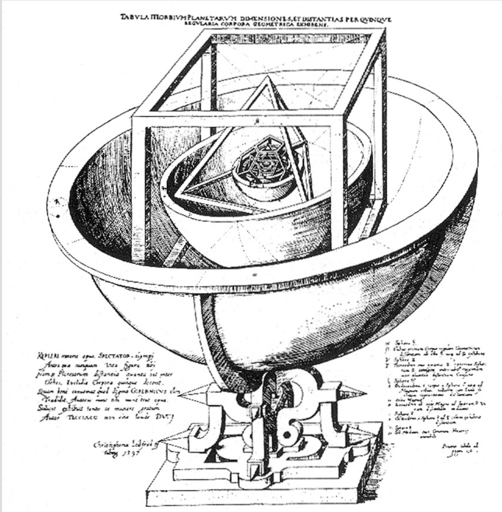
Ces remarques qui pourraient être davantage élaborées, devraient suffire pour écarter de possibles confusions provenant de la nature *paradoxale* des travaux de Doubochinski. D'une part, il utilise les outils de la mécanique classique dans son analyse des « oscillations argumentaires », d'autre part, son approche et les conséquences de la « quantification d'amplitude » impliquent un *rejet radical* de certains concepts qui sont devenus presque évidents en soi dans l'enseignement et la pratique de la physique.

Contexte historique

Doubochinski insiste lui-même sur le fait que les oscillations argumentaires avaient déjà connu de nombreuses applications dans la conception d'accélérateurs de particules et des tubes à électrons, ainsi que dans des recherches sur les accélérations Fermi de rayons cosmiques, bien avant ses propres travaux originaux dans les années 70.

Les oscillations argumentaires étaient déjà apparues autour de 1919, avec les travaux pionniers de Barkhausen et de Kurz sur la génération des micro-ondes. Ils avaient remarqué que des électrons oscillants, interagissant avec le champ électromagnétique à très haute fréquence dans les tubes qu'ils

Encadré 2 - Modèle keplérien du système solaire

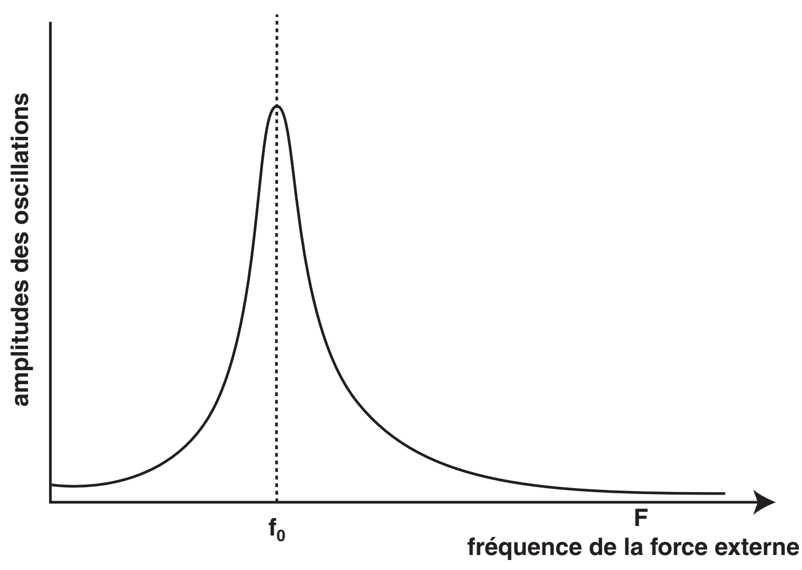


avaient construits, s'organisaient spontanément en « paquets » se déplaçant à phase égale par rapport au champ. Cet « effet paquet » est crucial pour le transfert efficace d'énergie des électrons vers le champ, et a été largement exploité dans la technologie de la génération des micro-ondes à haute puissance jusqu'à aujour-d'hui. [4]

Le fait qu'un flux d'électrons au départ continu s'auto-organise en « paquets » discrets, est essentiellement un reflet, à l'échelle microscopique, du même principe qui est à l'origine de la quantification des amplitudes pour le pendule de Doubochinski. Cependant, jusqu'aux travaux de Doubochinski et de ses collaborateurs, *personne* n'avait démontré le phénomène correspondant des oscillations argumentaires pour des *systèmes macroscopiques* à l'échelle d'un laboratoire, ni attiré l'attention sur leur nature universelle et sur leurs implications technologiques potentiellement révolutionnaires. [5]

Les expériences et les recherches approfondies sur les oscillations argumentaires dans des systèmes électromécaniques macroscopiques, ont été effectuées pour la première fois par Danil et Iacov Doubochinski au département de physique de l'Institut pédagogique Vladimir dirigé par D. Penner au début des années 70. Ces recherches ont été poursuivies au célèbre Institut Lebedev à Moscou et à d'autres endroits en Union soviétique. En dehors du pendule de Doubochinski que nous allons maintenant examiner en détail, un certain nombre d'autres dispositifs ont été construits sur le principe des oscillations argumentaires, dont notamment de nouveaux types de moteurs synchrones présentant une multiplicité discrète de vitesses du rotor pour une et même fréquence du courant fourni. Il s'est par ailleurs avéré que le phénomène de quantification d'amplitudes, bien qu'existant dans la réalité, ne pouvait *pas* être mis en évidence par les simulations informatiques habituelles des équations différentielles du mouvement. Des programmes spécialisés ont été développés « *a posteriori* » pour permettre d'étudier certains aspects des oscillations argumentaires à l'aide d'ordinateurs. Doubochinski a également développé des méthodes mathématiques pour calculer les valeurs approximatives des amplitudes quantiques.

Encadré 3



Courbe typique de résonance pour des oscillations forcées d'un oscillateur amorti. Une forte interaction résonante se produit avec la force externe de fréquence F seulement quand F est proche de f_0, la fréquence propre de l'oscillateur.

Examinons maintenant de plus près le pendule qui nous donne la plus simple et la plus étonnante démonstration expérimentale de la quantification d'amplitudes dans des oscillations argumentaires.

Les deux régimes du pendule de Doubochinski

Pour avoir un premier aperçu de la raison pour laquelle le pendule de Doubochinski se comporte si différemment par rapport à ce que l'on pourrait s'attendre en vertu des manuels de physique, il est utile de distinguer deux régimes opératoires du pendule, présentant deux caractéristiques géométrico-physiques très différentes : le premier est le cas des *petites amplitudes*, lorsque le pendule reste *dans* la zone d'interaction de l'électroaimant ; le second est le cas des grandes amplitudes, dans lequel le pendule se déplace au-delà de la zone d'interaction.

Le premier cas correspond de très près à ce que les manuels désignent par *oscillations forcées d'un oscillateur linéaire sous une force périodique externe* (**encadrés 1** et **3**). Imaginez qu'on lâche le pendule d'une position se trouvant dans la zone d'interaction, proche de la verticale. Le champ magnétique étant à peu près uniforme dans cette zone, l'action accélératrice ou décélératrice de l'électroaimant est essentiellement indépendante de la position du pendule. Pour de petites amplitudes, le pendule se comporte presque comme un oscillateur linéaire idéal, réagissant à la « force externe » de l'électroaimant.

Dans ces conditions, quand la fréquence de la source de courant fournie à l'électroaimant est *grande* en comparaison à la fréquence d'oscillation du pendule, on devrait s'attendre à ce que l'effet net du champ alternatif sur le mouvement du pendule soit *faible*, et que l'évolution de l'amplitude du pendule ne change pas de manière significative par rapport à ce qui se passerait si l'électroaimant n'était pas présent. C'est en fait le comportement que l'on observe : les effets de l'alternance rapide de l'accélération et de la décélération tendent à se *neutraliser* par rapport au mouvement

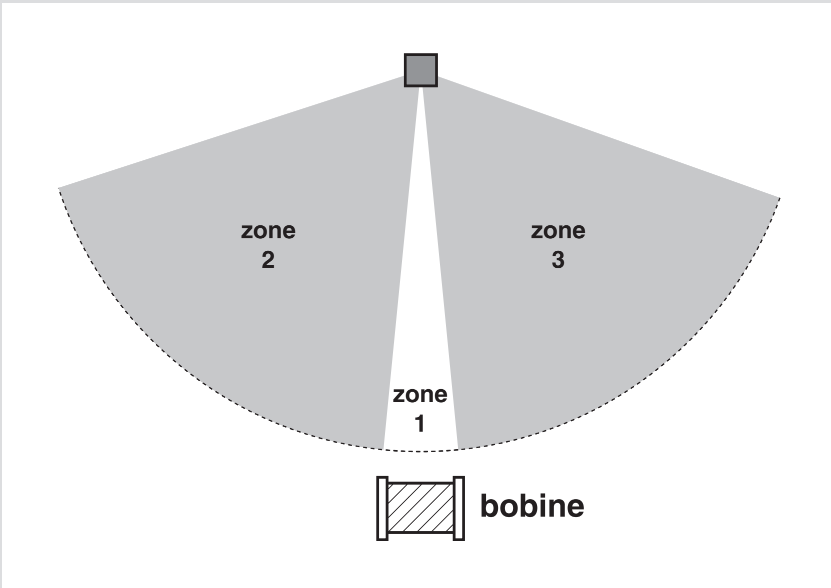


Figure 3. Les trois zones de mouvement du pendule de Doubochinski. Zone 1 : zone d'interaction ; zone 2 et 3 : zones extérieures.

général du pendule.

Le comportement du pendule, dans ce régime de faibles oscillations, confirme amplement ce que disent les manuels. Un transfert significatif d'énergie du champ alternatif vers le mouvement du pendule n'a lieu *que* si la fréquence de la source de courant est proche de la fréquence propre du pendule. C'est le cas classique des *oscillateurs résonnants*. Il est à signaler que l'amplitude du pendule augmente avec l'*amplitude* de la force extérieure – qui est proportionnelle à la tension du courant alternatif fourni à l'électroaimant –, et qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans une gamme apparemment continue. Il n'y a pas de « quantification » à l'échelle macroscopique.

Doubochinski note que dans le mode de résonance classique, l'oscillateur est « asservi » de manière rigide à la force externe.

Le comportement du pendule devient cependant *bien plus intéressant* dès que le pendule a suffisamment d'énergie pour se mouvoir en dehors de la zone d'interaction. En dehors de cette zone, l'action de l'électroaimant sur le pendule devient très rapidement nulle et le mouvement du pendule y est alors pratiquement libre, sans perturbation.

Ainsi, pour de grandes amplitudes du mouvement, on doit distinguer *trois zones* traversées par le pendule (**figure 3**) : 1) la zone d'interaction autour du point le plus bas de la trajectoire du pendule, dans laquelle le champ magnétique alternatif exerce une force significative sur le pendule ; 2) la zone extérieure à gauche de l'électroaimant ; 3) la zone extérieure à droite de l'électroaimant. Dans ces deux dernières zones, l'interaction entre le champ magnétique et le pendule est négligeable. Ainsi, lorsque l'amplitude du pendule est *plus large* que la zone d'interaction, la « force externe » agissant sur le pendule n'est plus indépendante de la position du pendule, mais dépend de la zone dans laquelle le pendule se trouve à un moment donné.

Cette modification change de manière fondamentale les modes possibles d'échange d'énergie entre le pendule et le champ magnétique alternatif. Plus important, l'effet d'« annulation » de la force dû à l'alternance des accélérations et décélérations dans la zone d'interaction, s'interrompt dès que le pendule quitte cette zone. Si le champ alternatif réalise *un nombre entier de cycles*, pendant la durée où le pendule traverse cette zone, alors les effets des demi-cycles positifs et négatifs s'annulent ; *cependant*, si le nombre de cycles *n'est pas* un nombre entier, cette annulation peut ne pas avoir lieu et il peut y avoir *un transfert net d'énergie* entre le pendule et le champ au cours du passage à travers cette zone d'interaction.

Il n'est pas difficile de voir que le signe et la valeur absolue de l'échange d'énergie *dépendent* des *phases* du champ alternatif aux moments où le pendule *entre* et *sort* de la zone d'interaction, relativement à la direction du mouvement du pendule. Si le pendule, par exemple, entre dans cette zone lorsque le champ magnétique *commence* un cycle mais quitte cette zone *au milieu* d'un cycle ultérieur, c'est-à-dire après un nombre impair de demi-cycles, alors il y aura un transfert d'énergie net non nul (**figure 4**). La raison en est qu'ici le nombre de demi-cycles *négatifs* est *inférieur d'une unité* de celui de demi-cycles *positifs ;* en conséquence, après l'annulation des paires agissant en sens opposé de demi-cycles, l'effet net est équivalent à celui de ce seul demi-cycle positif. [6] Si le pendule se déplace dans la direction du champ correspondant à ce que nous avons appelé un demi-cycle « positif », alors l'effet net sera une *accélération* et un *gain* d'énergie ; si le pendule se déplace dans le sens opposé, il va *perdre* de l'énergie.

La « durée du parcours » à travers la zone d'interaction, qui détermine le rapport entre les phases d'entrée et de sortie, dépend non seulement de la *vitesse* d'entrée mais aussi de la *phase* d'entrée, parce que la durée de parcours est modifiée par les changements de vitesse provoqués par le champ alternatif. Il en résulte que la quantité de gain ou de perte d'énergie au cours d'un simple passage dans la zone est une fonction quelque peu compliquée de la vitesse d'entrée et de la phase d'entrée. Sans vouloir entrer ici dans les détails, nous dirons qu'une étude approfondie montre qu'il existe *toujours* des phases d'entrée pour lesquelles le pendule voit une *augmentation nette* de son énergie, de même qu'il existe des phases pour lesquelles une *perte nette* a lieu. La possibilité d'un gain net en énergie signifie que le pendule – dans la mesure où il peut « choisir » les bonnes phases d'entrée dans la zone d'interaction – est en mesure de récupérer exactement la quantité d'énergie du champ alternatif dont il a besoin pour compenser ses pertes par friction.

Le comportement général du pendule va néanmoins dépendre de l'*effet cumulatif* de plusieurs passages successifs à travers la zone d'interaction. Les phases d'entrée dans la zone peuvent *changer* d'un passage au suivant. Toute tentative de prévoir ce qui va se passer, à partir d'un point de vue mécaniste *a priori*, nous conduit dans un *labyrinthe de complexités*. La seule approche fiable est de réaliser effectivement le pendule et de voir ce qu'il fait. Par ailleurs, nous pouvons identifier certaines caractéristiques du processus qui sont cruciales pour l'apparition d'un réseau discret et « quantique » d'amplitudes stables.

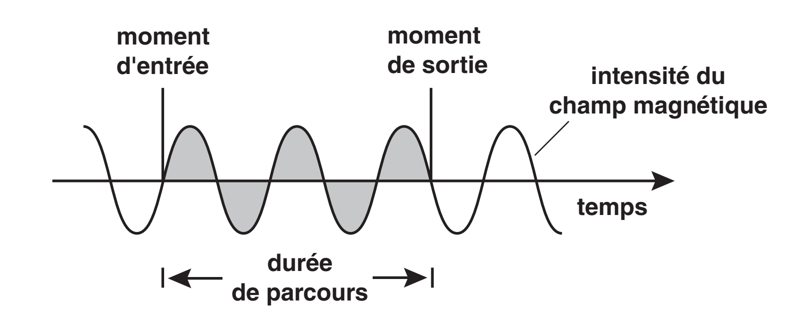


Figure 4. Fonction sinusoïdale du champ magnétique et surface incluse entre les limites définies par les temps d'entrée et de sortie de la zone d'interaction.

Corrélation de phase

Notez tout d'abord que le pendule passe à travers la zone d'interaction deux fois pour chaque période complète – une fois dans chaque direction. Entre deux passages successifs, le pendule se balance librement dans la zone extérieure, jusqu'à une hauteur maximale, puis repart vers la zone d'interaction dans la direction opposée. Ce processus prend une certaine *durée* entre le moment où le pendule sort de la zone d'interaction et celui où il y entre à nouveau. Par conséquent, la *phase* du champ alternatif au moment de chaque nouvelle entrée dans la zone d'interaction, dépend de la phase au moment de la sortie précédente de cette zone, et de la *durée* entre ces deux moments.

Il est très important maintenant de noter que la *durée* entre une sortie et une rentrée successives – et aussi la relation entre les phases d'entrées successives dans la zone – dépend de l'*amplitude* du mouvement du pendule. Pour de plus grandes amplitudes, le pendule met un peu plus de temps pour arriver de sa position maximale à la zone d'interaction près du point bas de son mouvement. Ce fait est lié à une propriété du pendule circulaire qui devrait être connue de n'importe quel étudiant de physique classique et que l'on désigne habituellement comme le *non-isochronisme* : la période de l'oscillation n'est pas fixe mais dépend de l'amplitude du mouvement du pendule. [7]

La dépendance de la *période temporelle* par rapport à l'amplitude ouvre une nouvelle possibilité pour notre système qui n'existe pas dans le cas de l'« oscillateur linéaire » classique : en l'occurrence, la possibilité d'utiliser son amplitude variable comme moyen de *réguler ses relations de phase* compte tenu du champ alternatif.

Supposons, pour être concret, que le champ alternatif ait une fréquence de F = 50 Hz, et que la fréquence propre du pendule (la fréquence pour de très petites amplitudes) soit de 0,5 Hz (une période de 2 s).

La **figure 5** illustre la dépendance de la fréquence du pendule par rapport à son amplitude. Notez que pour certaines valeurs de l'amplitude, la fréquence du champ alternatif est un *multiple entier* de la fréquence du pendule, c'est-à-dire lorsque le champ alternatif réalise un *nombre entier* d'oscillations au cours d'une période du pendule. Il en résulte que les *phases* du champ alternatif, pour lesquelles le pendule entre et sort de la zone d'interaction, vont se *reproduire* à chaque cycle du mouvement du pendule, ce qui ouvre la possibilité d'un régime « stationnaire » stable.

Le premier exemple de cela se produit pour les mouvements « infi-

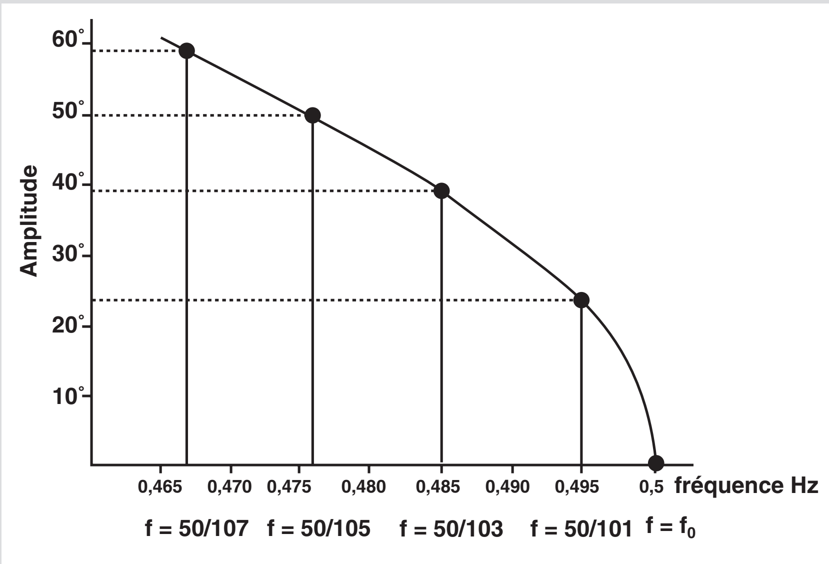


Figure 5. Dépendance de l'amplitude de la fréquence d'un pendule circulaire. Formule approximative : $a \approx 162\sqrt{1-(f/f_0)^2}$, f est la fréquence, f_0 est la fréquence propre (petites oscillations) qui est, dans notre exemple, égale à 0,5 Hz.

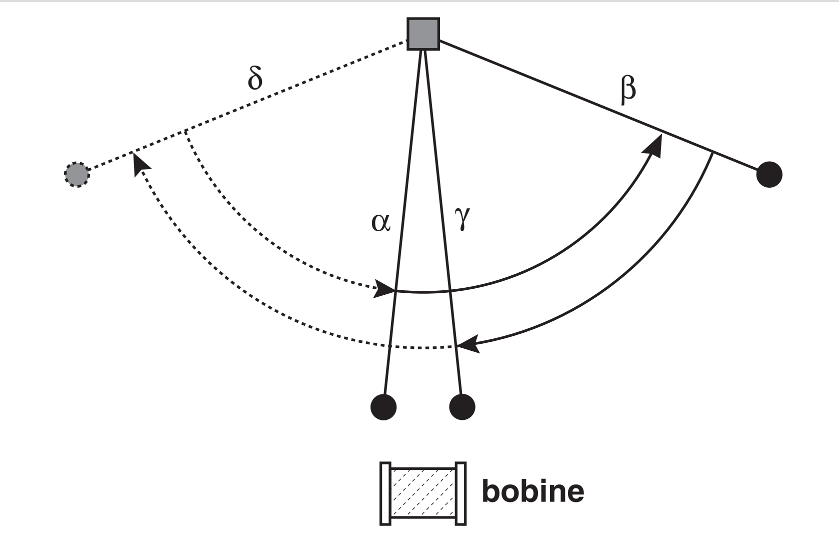
nitésimalement petits » du pendule, dont la fréquence est f = 0,5 Hz. Le rapport des fréquences est F/f = 50/0,5 = 100. Dans ce cas, cependant, le pendule reste à l'intérieur de la zone d'interaction et se comporte essentiellement comme cela est prévu par la théorie classique de la résonance : la fréquence de la « force externe » étant plusieurs fois plus grande que la fréquence propre du pendule, il n'y a pratiquement aucun effet sur le mouvement moyen, et il n'y a pas de quantification de l'amplitude.

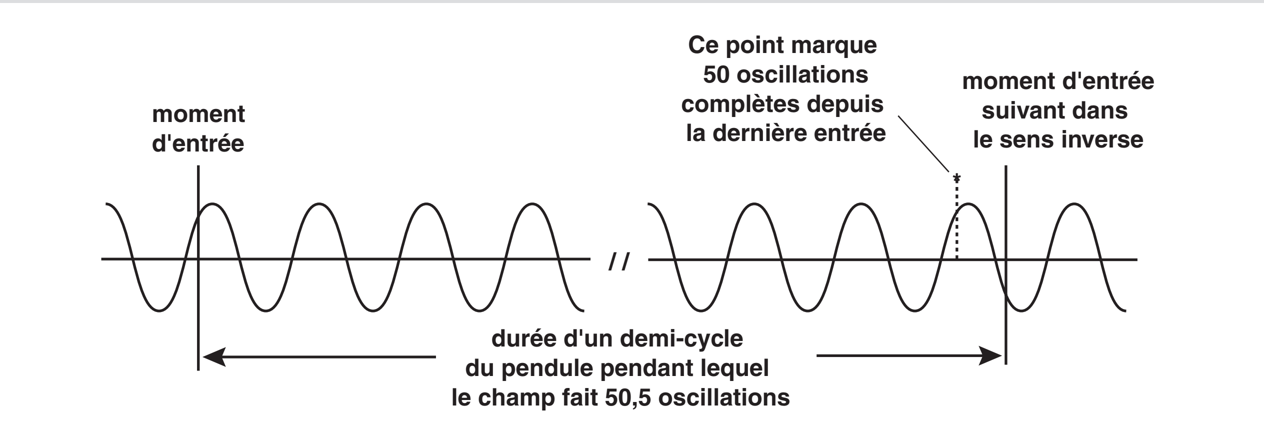
Pour de plus grandes amplitudes, la période d'oscillation du pendule va être un peu plus grande et sa fréquence plus petite, ce qui conduit à des valeurs *plus grandes* pour le rapport F/f. La valeur entière suivante de 100 est le rapport F/f = 101, ce qui a lieu si la fréquence du pendule vaut f = 50/101 Hz = environ 0,495 Hz. Si l'on se reporte à la **figure 5**, on voit que ceci correspond à une amplitude, en terme d'angle maximal de déflexion par rapport à la verticale, d'environ 23 degrés.

Dans ce cas, le pendule va au-delà des limites de la zone d'interaction ; à chaque période, il y passe deux fois – une fois dans chaque direction. Le temps entre le moment d'entrée dans une direction et le moment d'entrée dans la direction opposée, correspond à une *demi-période* du pendule, c'est-à-dire 101/2 = 50,5 oscillations du champ alternatif (**figure 6**). Ainsi, pendant la durée qui sépare deux instants successifs d'entrée dans la zone d'interaction, le champ alternatif effectue un nombre entier de cycles *plus un demi-cycle*. Cela signifie que lorsque le pendule retourne dans la zone d'interaction après un passage donné, il va rencontrer un champ alternatif dans une phase qui a augmenté de 180 degrés, c'est-à-dire la phase opposée à celle de son passage précédent. Du fait qu'il se déplace également dans le sens opposé, l'effet sera d'accélérer (ou de ralentir) le pendule exactement de la même quantité qu'au passage précédent. En d'autres termes, le gain (ou la perte) d'énergie du pendule sera exactement le même pour les deux passages successifs du pendule dans la zone d'interaction.

Comme nous l'avons noté plus haut, pour une amplitude ou période donnée, il existe toujours des phases d'entrée dans la zone pour lesquelles le pendule reçoit un surplus net (ou une perte nette) d'énergie. Si la friction du pendule n'est pas trop importante, alors il existe une phase pour laquelle le gain d'énergie au cours d'un passage à travers la zone d'interaction compense *exactement* la perte d'énergie par friction au cours d'un demi-cycle du pendule. Si nous lâchons le pendule à la bonne amplitude (les 23 degrés déterminés ci-dessus) et au bon moment (de manière à ce qu'il entre dans la zone d'interac-

Figure 6.
a) Mouvement du pendule pendant un demi-cycle entre deux entrées successives dans la zone d'interaction. Le pendule entre dans la zone en α, traverse la zone, atteint son déplacement maximum β et entre dans la zone d'interaction dans le sens inverse γ. Dans le demi-cycle suivant, le pendule va de γ à δ, et de δ à α.
b) Les oscillations de la fonction sinusoïdale du champ magnétique entre les entrées successives du pendule dans la zone d'interaction, où l'on voit que la deuxième entrée se fait dans la phase inverse (déplacée de 90° par rapport à la première entrée).





tion avec la phase appropriée), il va alors retourner dans la zone après une demi-période dans la direction opposée et avec la phase exactement opposée, prendre exactement la même quantité d'énergie et revenir une fois de plus dans la zone avec la bonne phase et au bout d'un demi-cycle de plus. Nous avons ainsi un « régime stationnaire » dans lequel le pendule maintient une amplitude constante, et prend juste assez d'énergie dont il a besoin pour compenser ses pertes par frottement.

Un certain nombre de remarques s'imposent à ce stade-ci.

Tout d'abord, notre discussion nous indique l'existence potentielle non pas d'un régime stationnaire mais d'une *série discrète* de régimes stationnaires. Le paramètre essentiel est le rapport de la fréquence du champ alternatif à la fréquence du pendule. Dans notre discussion, nous avons vu qu'un régime stationnaire est possible pour F/f = 101. Il est cependant facile de voir que le même raisonnement s'applique si ce rapport est égal à un autre nombre entier impair, c'est-à-dire 103, 105, 107, etc. Pour notre choix de fréquence F = 50 Hz, ces valeurs correspondent à f = 50/103 Hz = 0,485 Hz ; f = 50/105 Hz = 0,476Hz ; f = 50/107 Hz = 0,467 Hz ; etc. Sur la **figure 5**, on peut voir les valeurs des amplitudes du pendule qui correspondent à ces fréquences.

Notez cependant que bien que notre analyse suggère fortement l'existence de tels « régimes stationnaires », elle ne prouve en aucun cas que ces derniers puissent être obtenus dans la pratique. En particulier, comment le pendule « trouve-t-il » les amplitudes et phases appropriées ? Dans les expériences, le pendule démontre son aptitude à obtenir ce résultat mais aucune démonstration théorique complète n'a encore été fournie. Doubochinski répond par une analyse détaillée à une importante question relative à cela : les régimes en question vont-ils demeurer stables si de petits changements dans les conditions initiales ou des perturbations du système en cours de mouvement sont introduits ? La réponse, confirmée par l'expérience, est « oui ».

En fait, les amplitudes théoriques calculées ci-dessus s'avèrent raisonnablement voisines des « amplitudes quantiques » réellement observées sur le pendule de Doubochin-ski (**tableau 2**). [8] Les écarts, dus surtout aux effets de friction et à des modifications de vitesse à l'intérieur de la zone d'interaction, sont les plus importants dans le cas de la plus petite amplitude observée, qui fait 30 degrés au lieu de 23 degrés.

Tableau 2

Rapport F/f	101	103	105	107	109	111
Amplitude observée	30°	43,2°	53,2°	59,9°	68°	74,2°
Amplitude calculée	22,8°	39,1°	50°	58,6°	65,9°	72,1°

Comparaison entre les amplitudes stables observées et les amplitudes calculées d'après la recherche mathématique des régimes stationnaires, pour F = 50 Hz. En ce qui concerne la raison des écarts, voir note 8.

Par ailleurs, les mouvements « quantiques » réels observés sur le pendule de Doubochinski, ne correspondent pas *exactement* aux mouvements stationnaires idéaux décrits ci-dessus mais sont bien plus compliqués. Ils sont en accord seulement *en moyenne* avec les mouvements idéaux. Ce qui se produit, en première approximation, c'est que les phases réelles d'entrée dans la zone d'interaction « fluctuent » autour des valeurs correspondant aux mouvements stationnaires « purs ».

Ce phénomène observé expérimentalement est mieux décrit en terme de « diagramme d'espace de phase » (**figure 7**). Lorsque le système est perturbé, sa trajectoire d'espace de phase se met à « orbiter » autour du mouvement correspondant au régime stationnaire. Si la perturbation n'est pas trop importante, cette « orbite » est progressivement réduite et la trajectoire d'espace de phase du système est une spirale convergeant vers un petit mouvement « fluctuant » dans le voisinage du régime stationnaire. Cependant, une grande perturbation peut envoyer le pendule dans une région complètement différente de

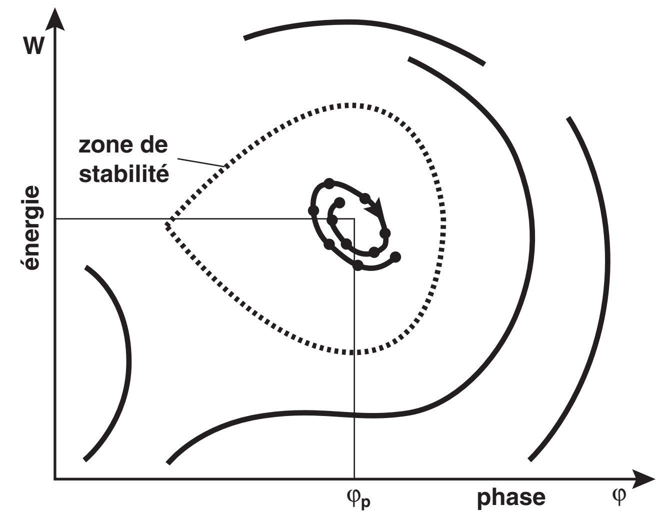


Figure 7. Trajectoire du pendule dans un diagramme de phase. φ_p est la phase correspondant à un « régime stationnaire ».

l'espace de phase. Dans certains cas, le pendule effectue un « saut quantique » vers une autre amplitude quantique.

Bien que notre discussion prévoie une série discrète d'amplitudes « quantiques » réalisées par des régimes stationnaires (ou quasi stationnaires), elle n'exclut pas des mouvements plus compliqués. En fait, compte tenu des conditions initiales, un comportement bien plus compliqué est possible, par exemple un mouvement qui saute spontanément, dans un sens et dans l'autre, entre deux amplitudes quantiques, imitant le comportement de certains systèmes atomiques de la physique quantique. Néanmoins, les amplitudes « quantiques » stables sont les modes « favoris » du pendule de Doubochinski, et sont de loin les plus faciles à mettre en évidence.

Notons enfin que l'analyse théorique des mouvements stables résumée ci-dessus, dépend presque essentiellement de deux propriétés supposées de l'oscillateur (c'est-à-dire le pendule) : a) son manque d'isochronisme qui permet au système de satisfaire à la condition « F/f est un nombre entier impair » en ajustant la valeur de f ; et b) l'existence d'une dissipation frictionnelle, qui semble essentielle à la stabilité des régimes quasi stationnaires. Toutefois, dans la réalité, des expériences minutieuses ont montré que le phénomène de quantification se produit même en l'absence de ces conditions – un fait physique dont la théorie mathématique ne rend pas compte. Ici encore, nous sommes confrontés à la réalité d'un *nouveau principe physique*.

Les oscillations argumentaires et le quantum d'action de Planck

Comme nous l'avons signalé plus haut, le pendule de Doubochinski n'est qu'un exemple pédagogique utile pour une très large gamme de systèmes oscillants dans lesquels la « force externe » dépend de la position momentanée (la configuration) du système et pas seulement du temps. Ce qui est plus difficile à réaliser dans un modèle mécanique simple mais plus naturel d'un point de vue physique, c'est le cas d'un oscillateur dans l'espace – idéalisé ici par un corps chargé fixé à un ressort – interagissant avec un champ électromagnétique à haute fréquence (**figure 8**).

A une différence importante près, cela ressemble beaucoup au modèle d'« oscillateurs élémentaires » utilisé par Planck lors de ses recherches sur le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire un champ de radiation qui résulte de l'émission et de l'absorption d'une radiation électromagnétique par un très grand nombre d'atomes, chacun considéré comme un « oscillateur élémentaire ». Planck a mis en évidence un *paradoxe fondamental* lorsqu'il a confronté les caractéristiques du rayonnement du corps noir prévues par les calculs s'appuyant sur les lois de Maxwell, à celles *complètement différentes réellement observées* dans l'expérience. Pour résoudre le paradoxe, Planck a émis l'hypothèse d'un nouveau principe physique – le « quantum d'action élémentaire » – gouvernant les échanges d'énergie entre les oscillateurs et le champ radiatif. L'hypothèse du quantum de Planck a été par la suite confirmée par une multitude d'expériences et s'est avérée être un *principe physique universel*.

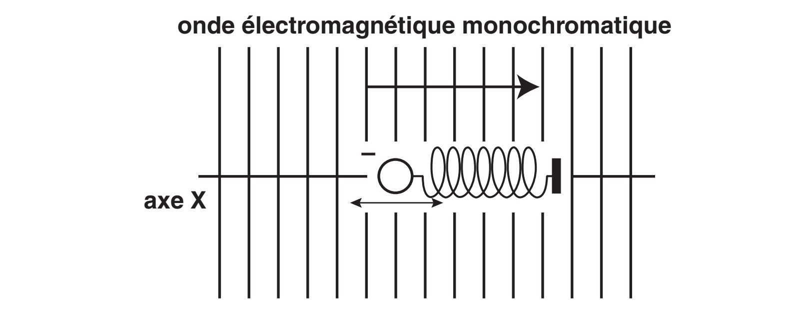


Figure 8. Schéma de l'oscillateur Doubochinski-Planck. Equation différentielle selon la physique classique : $\ddot{x} + \beta\dot{x} + \omega_0^2 x = A \sin(vt - kx)$. $v = 2\pi F$; k = nombre d'onde.

Cependant, l'hypothétique « oscillateur élémentaire » choisi par Planck comme point de départ pour son analyse initiale, était essentiellement équivalent à l'« oscillateur forcé » décrit par la physique classique. En particulier, l'étendue spatiale de l'oscillateur n'est pas prise en compte dans la caractérisation de l'interaction de ce dernier avec le champ radiatif.

Que se passe-t-il si nous rejetons cette supposition arbitraire, et que nous considérons au contraire le cas où l'amplitude du corps oscillant n'est *pas* arbitrairement petite par rapport à la longueur d'onde du champ ? Dans ce cas, le corps subit un champ qui varie en fonction de sa position aussi bien qu'en fonction du temps. Nous sommes alors en présence d'« oscillations argumentaires » d'un type quelque peu différent de celui du pendule de Doubochinski mais qui, selon le principe de Doubochinski, aura également un ensemble d'« amplitudes quantiques » dont les valeurs peuvent être calculées sur la base des méthodes qu'il a développées avec ses collaborateurs.

La chose intéressante est que l'analyse de Doubochinski ne dépend pas de manière *explicite* du quantum d'action de Planck, pas plus qu'il ne présuppose que le système soit d'une échelle *microscopique*. Des expériences de laboratoire effectuées par Doubochinski et ses collaborateurs [9] sur des systèmes macroscopiques simulant le système idéalisé en question, mettent en évidence des amplitudes quantiques dont les valeurs sont très proches de celles prévues par ses méthodes. Ceci suggère l'idée que la découverte de Doubochinski reflète un principe plus *général* que le quantum d'action de Planck tel qu'on le comprend à l'heure actuelle – un principe qui engloberait le quantum d'action microscopique, la quantification macroscopique telle qu'elle a été démontrée par le pendule de Doubochinski *et* la quantification présente dans les systèmes astronomiques, incluant non seulement les orbites planétaires mais aussi des choses telles que des bras de galaxies spirales et des taux de rotation de nombreux objets astronomiques. En fait, l'existence d'un tel principe général est déjà implicite dans l'œuvre de Johannes Kepler. Cela ouvre un vaste champ pour des recherches à venir.

Il est important d'insister sur la *différence fondamentale* entre l'approche de Doubochinski et celle de plusieurs mathématiciens et physiciens qui, pendant des années, ont tenté de déduire la « quantification » des systèmes microscopiques à partir de la mécanique classique en introduisant des termes « non linéaires » d'une manière plus ou moins arbitraire dans les équations de mouvement. Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, la quantification d'amplitude de Doubochinski est la découverte d'un effet physique confirmée expérimentalement qui ne peut être déduite mathématiquement de la mécanique classique. De plus, Doubochinski ne prétend pas déduire les lois du rayonnement du corps noir de Planck ou les lois de la mécanique quantique à partir de son principe ; il attire simplement l'attention sur la *cohérence* frappante entre le quantum microscopique et le comportement des « oscillations argumentaires » à l'échelle macroscopique.

L'essence de la méthode générale de Doubochinski pour calculer les valeurs des amplitudes quantiques mérite d'être évoquée ici, car elle donne un point de vue plus synthétique des phénomènes que nous avons examinés ci-dessus, avec quelques développements fastidieux, dans le cas du pendule. L'idée de base est la suivante. Le mouvement du corps oscillant (le pendule par exemple) a pour effet de « moduler » la fonction temporelle de la force externe subie par le corps au cours de son mouvement. Ceci donne naissance à une série discrète d'harmoniques contenue dans la représentation sous forme de série trigonométrique de cette fonction, dont certains tombent dans la gamme de fréquence proche de la fréquence caractéristique du pendule non perturbé (**figure 9**). En « ajustant » sa fréquence, ce que le pendule fait directement par des changements d'amplitude, le système peut se mettre en résonance avec l'un de ces harmoniques autogénéré, et absorber ainsi la quantité d'énergie du champ externe nécessaire dans un régime quasi stationnaire ou stationnaire.

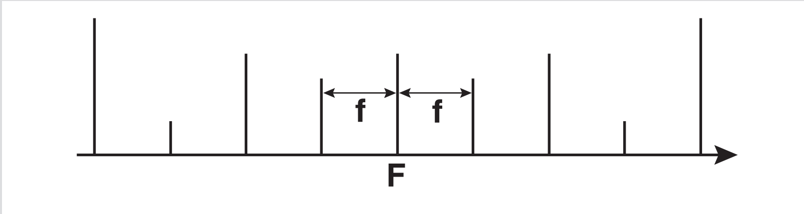


Figure 9. Spectre des harmoniques autogénérées par le mouvement du pendule dans la fonction qui détermine l'action de la force externe. Les harmoniques ont des fréquences de la forme approximative F – nf, où n est un nombre entier.

Ceux qui sont intéressés peuvent trouver une présentation détaillée de cette méthode. [10] Je me contenterai ici de signaler ce qui suit : dans le cas de l'oscillateur de Planck modifié par Doubochinski, interagissant avec une onde électromagnétique monochromatique, l'expression mathématique des harmoniques est liée à la série trigonométrique résultant de la *modulation de fréquence* d'une onde sinusoïdale par une autre onde sinusoïdale d'une fréquence différente, résultat bien connu en radioélectricité ; les coefficients de cette série sont donnés par les fonctions de Bessel. C'est de cette manière que Doubochinski arrive à une formule pour les amplitudes quantiques de l'oscillateur en terme d'extremums des fonctions de Bessel. Les détails de ces calculs sont présentés dans l'article mentionné en note 10. Dans le cas du pendule de Doubochinski, on obtient exactement les mêmes valeurs, telles qu'elles sont dérivées de notre considération plus élémentaire des « régimes stationnaires ».

L'efficacité du transfert d'énergie

Qu'en est-il des applications pratiques du principe de Doubo-chin-ski ? Certains lecteurs critiques

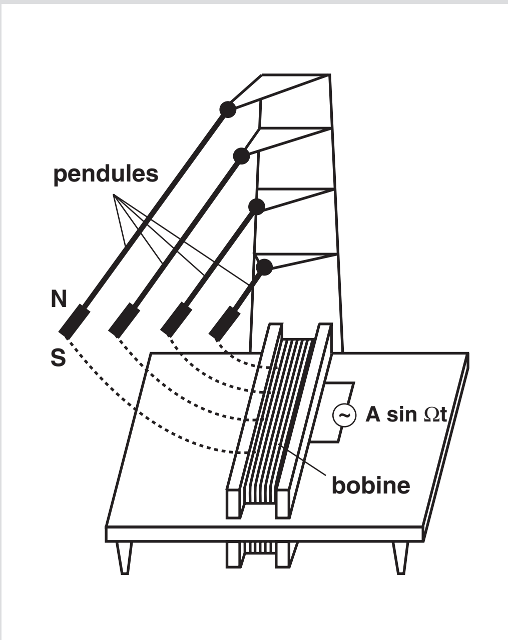


Figure 10. Pendules multiples avec différentes fréquences propres alimentés par un seul champ magnétique.

pourront objecter que le couplage entre un pendule de basse fréquence et un champ alternatif d'une plus haute fréquence, correspondant aux « amplitudes quantiques », ne peut pas être très efficace d'un point de vue énergétique du fait que l'effet de tout le champ oscillant sur le pendule est *annulé*, à l'exception d'au plus un demi-cycle, au cours de chaque passage dans la zone d'interaction. Il en résulterait que l'efficacité de la conversion de la haute fréquence en basse fréquence ne pourrait être très élevée.

Cet argument est correct dans la mesure où il n'est question que du simple pendule de Doubochinski, mais il ne s'applique pas pour une grande gamme d'autres dispositifs reposant sur le même principe. Sans rentrer dans les détails, notons simplement qu'il y a la possibilité d'« alimenter » plus d'un pendule avec le même champ magnétique alternatif. En fait, si l'on donne une forme adéquate à l'électroaimant, un nombre quelconque de longueurs d'ondes égales ou différentes peuvent être « alimentées » simultanément, oscillant indépendamment à des amplitudes quantiques différentes (**figure 10**). Un tel système ferait un meilleur usage de l'énergie du champ magnétique dans la mesure où les différents pendules entreraient et sortiraient de la zone d'interaction à des instants différents, généralement pas en phase et pas liés les uns aux autres d'une manière simple commensurable. [11]

Un ensemble de tels pendules alimentés par le même champ alternatif, mais oscillant à des amplitudes et des fréquences quantiques différentes, nous donne une *analogie miniature du système solaire* amusante et instructive. Le champ magnétique oscillant joue le rôle du « Soleil » qui, dans la conception de Kepler par opposition à celle de Newton, n'est pas un simple « centre d'attraction » mais contient l'*agent moteur* qui anime le mouvement de tout le système planétaire.

Bien entendu, d'autres systèmes à « oscillation argumentaire » que ceux, très élémentaires, présentés dans cet article, sont utilisés pour des applications pratiques. Notre but ici a été d'expliquer le principe essentiel mis en œuvre. ■

Notes

1. L'effet photoélectrique concerne l'émission d'électrons depuis un métal lorsque ce dernier est irradié par de la lumière. Il s'avère que l'énergie des électrons émis est indépendante de l'intensité (l'amplitude) de la lumière mais varie en fonction de la fréquence de celle-ci. Pour un atome (ou une molécule) irradié par la lumière, les niveaux d'énergie auxquels l'atome peut être excité dépend de la fréquence de la lumière mais – sauf si la lumière est très intense – pas de son intensité. D'une manière générale, plus la fréquence est haute, plus grande est l'étendue d'états discrets qui peuvent être excités, jusqu'au point d'ionisation.

2. De par leur nature même, les algorithmes informatiques habituels pour la résolution d'équations différentielles introduisent des artefacts qui ne sont présents ni dans les véritables fonctions mathématiques décrites par les équations en question, ni dans les processus physiques réels. Dans le cas présent, pour lequel la valeur de l'amplitude quantique est nécessairement une fonction discontinue des conditions initiales, les algorithmes habituels sont voués à l'échec. Pour développer des méthodes informatiques utiles pour ce type de problème, il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques essentielles du processus physique, telles qu'elles sont mises en évidence par les expériences réelles.

3. Doubochinski compare les rayons moyens des orbites planétaires avec la série calculée d'amplitudes quantiques d'un simple oscillateur argumentaire (essentiellement la version de Doubochinski de l'oscillateur de Planck décrit plus loin dans cet article), en prenant pour unité le rayon de l'orbite terrestre. Il constate que les valeurs des rayons orbitaux sont très proches des amplitudes quantiques de l'oscillateur argumentaire (voir note 10). Cette dernière série présente plusieurs amplitudes qui ne correspondent à aucune orbite planétaire observée ; ces amplitudes pourraient correspondre, si l'on suppose l'analogie avec le simple oscillateur correcte, à des orbites possibles qui ne seraient pas occupées dans l'état actuel du système solaire. Ces orbites supplémentaires ne sont cependant pas autorisées par les lois harmoniques de Kepler. Il faut cependant noter que ces dernières identifient les caractéristiques clef du système solaire, en particulier la zone instable de la ceinture d'astéroïdes, qui ne sont pas prises en compte par le modèle simple de Doubochinski, et qui sont un re et d'un principe supérieur. Ceci étant dit, les résultats préliminaires de Doubochinski sont d'un grand intérêt, donnant l'idée d'une théorie ondulatoire de la gravitation pour laquelle il existe déjà par ailleurs de nombreuses indications.

4. Doubochinski note que le fonctionnement de l'oscillateur de Hertz, à partir duquel Heinrich Hertz a démontré le premier, en 1888, la transmission d'ondes électromagnétiques, dépend d'un effet non linéaire de « paquets » d'électrons dans la décharge électrique excitant l'oscillateur, qui n'était pas connu ou pas compris à l'époque de Hertz.

5. Au cours des années 40 et 50, Yves Rocard a observé l'existence de régimes stables dans un pendule interagissant avec un champ magnétique oscillant, et a écrit une équation différentielle pour décrire le mouvement. Cependant, il n'est pas arrivé à une compréhension satisfaisante du phénomène, et n'a apparemment pas observé la quantification des amplitudes.

6. Selon la mécanique classique, le changement net de vitesse au cours de la traversée dans la zone d'interaction est égal à l'intégrale par rapport au temps de la force agissant pendant la durée en question, c'est-à-dire l'aire de la zone totale délimitée par la courbe sinusoïdale délimitée par les moments d'entrée et de sortie de cette zone.

7. Chose intéressante, le pendule de Doubochinski restitue l'« isochronisme perdu » du pendule circulaire, en évoluant vers un régime stable dans lequel une amplitude constante est maintenue.

8. La principale source de l'écart entre les deux est la différence entre la relation amplitude-fréquence du pendule réel et la courbe mathématique idéale décrite dans notre diagramme, et qui ne tient pas compte des effets de friction. Nous avons également négligé dans notre discussion le petit effet de changement de vitesse, sur la durée de la période, au cours du passage dans la zone d'interaction à chaque période du pendule.

9. Notons que dans ce cas, la dépendance par rapport à la force externe de la position du corps oscillant, est une fonction continue. Néanmoins, la quantification d'amplitude a lieu, comme dans le cas du pendule, mais avec une série discrète différente de valeurs d'amplitudes.

10. Voir l'article de D.B. et J.B. Doubochinski, « Amorçage argumentaire d'oscillations entretenues avec une série discrète d'amplitudes stables », *EDF Bulletin de la direction des études et recherches*, série C, Mathématiques, Informatique, n°3, 1991, pp. 11-20.

11. Il ne faut pas oublier, et ceci en accord avec la critique de Doubochinski du concept newtonien de force, que chaque pendule n'est pas seulement in uencé passivement par le champ magnétique mais qu'il agit lui-même sur le courant dans l'électroaimant, c'est-à-dire par induction, lorsque l'aimant permanent se déplace dans la zone d'interaction. Cette « contre-réaction » peut devenir significative lorsque plus d'un pendule est « alimenté » par un seul et même noyau magnétique (voir la discussion à la fin de cet article) ; dans ce cas, les pendules peuvent interagir les uns sur les autres via les variations induites par leurs mouvements sur le champ magnétique oscillant commun. Il en est de même pour des appareils plus compliqués utilisant le principe de Doubochinski.