

statistique à l'équilibre, mais retourne périodiquement vers la situation de départ (voir la figure page 79). Ce résultat tout à fait remarquable, connu sous le nom de paradoxe de Fermi-Pasta-Ulam, montre que la non-linéarité ne suffit pas à garantir l'équipartition de l'énergie.

Dans les années 1960, à la recherche de la solution du paradoxe de Fermi-Pasta-Ulam, les physiciens américains Norman Zabusky et Martin Kruskal ont examiné le problème dans l'espace réel plutôt que dans l'espace des modes de vibration (l'espace de Fourier). Cela leur a permis de reproduire et d'expliquer le comportement périodique grâce à la dynamique d'excitations non linéaires et localisées spatialement, que l'on connaît de nos jours sous le nom de «solitons».

Ces ondes localisées, ou solitaires, auxquelles on peut associer des propriétés de particules (d'où le suffixe «-on», que les deux physiciens ont justement proposé dans leur article) ont de nombreuses applications physiques et constituent aujourd'hui un champ d'étude à part entière. Il couvre non seulement les tsunamis (un mot d'origine japonaise dont la signification, «vague dans le port», traduit très bien son aptitude à détruire) mais aussi la capacité de transmettre de l'information à très haut débit dans des fibres optiques, en passant par de nombreuses autres applications physiques.

Une autre ligne de recherche issue du paradoxe de Fermi-Pasta-Ulam, développée parallèlement aux travaux sur les solitons, s'est plus particulièrement focalisée sur la dynamique du mode de vibration de départ. En particulier,

This report is intended to be the first one of a series dealing with the behavior of certain nonlinear physical systems where the non-linearity is introduced as a perturbation to a primarily linear problem. The behavior of the systems is to be studied for times which are long compared to the characteristic periods of the corresponding linear problems.

The problems in question do not seem to admit of analytic solutions in closed form, and heuristic work was performed numerically on a fast electronic computing machine (MANIAC I at Los Alamos).^{*} The ergodic behavior of such systems was studied with the primary aim of establishing, experimentally, the rate of approach to the equipartition of energy among the various degrees of freedom of the system. Several problems will be considered in order of increasing complexity. This paper is devoted to the first one only.

We imagine a one-dimensional continuum with the ends kept fixed and with forces acting on the elements of this string. In addition to the usual linear term expressing the dependence of the force on the displacement of the element, this force contains higher order terms. For

^{*} We thank Miss Mary Tsingou for efficient coding of the problems and for running the computations on the Los Alamos MANIAC machine.

630 003

-3-

L'algorithme mis au point par Mary Tsingou pour coder la première expérience numérique et retrouvé dans sa cave (à droite). Dans le rapport de cette expérience publié en 1955, cependant, Mary Tsingou n'apparaît que dans une note de remerciement (ci-dessus).

LES PHÉNOMÈNES HORS ÉQUILIBRE, AU CŒUR DE NOTRE MONDE

L'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou peut être considérée comme l'un des points de départ d'un engouement très fort pour la physique hors équilibre, discipline toujours féconde aujourd'hui. La physique statistique s'est logiquement d'abord intéressée à l'équilibre, qui permet déjà d'expliquer de nombreux phénomènes ; mais le fait même que l'équilibre puisse être atteint n'est pas si évident, même pour des systèmes simples comme l'a montré l'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou. Il n'est pas étonnant qu'Enrico Fermi se soit posé cette question puisque, à l'âge de 17 ans, il avait lu puis prolongé certains travaux du mathématicien Henri Poincaré, avant de développer à 25 ans la statistique à l'équilibre pour les particules quantiques connues maintenant sous le nom de « fermions ».

Aujourd'hui encore, cette problématique de la relaxation vers l'équilibre est au cœur de la physique. Il est désormais bien établi que les

systèmes physiques avec des interactions à longue portée peuvent avoir des temps de relaxation gigantesques, voire ne pas relaxer vers l'équilibre sur des temps physiquement pertinents. Les systèmes gravitationnels, les fluides géophysiques, les lasers en interaction avec des particules appartiennent à cette catégorie. Cela permet de comprendre pourquoi, alors que les forces gravitationnelles et électromagnétiques sont centrales dans les cours de licence ou de classes préparatoires, elles ne sont pas traitées dans la majorité des cours et livres de mécanique statistique.

Les verres forment une deuxième catégorie de systèmes présentant des relaxations vers l'équilibre très lentes. Leur paysage énergétique est extrêmement ramifié et complexe, et explique vraisemblablement leur rigidité. Leurs descriptions dans le cadre de la physique statistique peuvent être aussi considérées comme des modèles pour l'étude des protéines où les questions

aussi fondamentales que le désordre, la réponse non linéaire et la relaxation vers l'équilibre sont cruciales.

Plus récemment, c'est le monde quantique qui se passionne pour des études tant théoriques qu'expérimentales de cette relaxation vers l'équilibre. De belles expériences consistant à exciter des modes dans des condensats de Bose-Einstein sont même très proches, dans l'esprit, de l'expérience de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou. Étudier tous ces systèmes avec les outils de la physique non linéaire ouvre de nouveaux points de vue très fructueux.

N. Navon et al., **Emergence of a turbulent cascade in a quantum gas**, *Nature*, vol. 539, pp. 72-75, 2016.

A. Campa et al., **Physics of Long-Range Interacting Systems**, Oxford University Press, 2014.

A. P. Young (éd.), **Spin glasses and random fields**, World Scientific, 1998.

de l'endroit où le problème de Fermi-Pasta-Ulam, si important dans le passé et le présent de la physique non linéaire, avait été conçu. Il est temps que son travail soit reconnu à sa juste valeur.

UNE FEMME PARMI LES PREMIERS PROGRAMMEURS

Née le 14 octobre 1928 dans une famille grecque vivant à Milwaukee, Wisconsin, Mary Tsingou a passé sa petite enfance aux États-Unis. En 1936, à cause de la Grande Dépression, sa famille s'est installée en Europe, où son père possédait une propriété en Bulgarie. Cependant, en juin 1940, suivant les conseils de l'ambassade américaine qui les incitait par précaution à retourner aux États-Unis, la famille est montée dans le dernier navire américain quittant l'Italie. Une semaine seulement après leur débarquement à New York, l'Italie déclarait la guerre à la France et au Royaume-Uni.

Mary Tsingou a obtenu sa licence en 1951 à l'université du Wisconsin et sa maîtrise en mathématiques en 1955 à l'université du Michigan. En 1952, à la suite d'une suggestion de sa professeuse d'équations différentielles, elle a posé sa candidature pour un poste au Los Alamos National Laboratory. À l'époque, les femmes n'étaient pas encouragées à poursuivre des études en mathématiques, mais la guerre de Corée avait créé une pénurie de jeunes hommes américains, de sorte que des postes étaient également offerts aux jeunes femmes. Elle a donc été embauchée, avec un

groupe de jeunes diplômées, pour faire des calculs à la main.

Elle a d'abord été affectée à la division T1 de Los Alamos (T pour théorique) qui, pendant la Seconde Guerre mondiale, avait été dirigée par le grand physicien Rudolf Peierls et à laquelle appartenait le célèbre espion Klaus Fuchs. Il y avait à l'étage du dessous la division T7, dirigée par Nicholas Metropolis, qui possédait le tout nouvel ordinateur, le Maniac I, que quasiment personne ne savait programmer. On proposa à Mary Tsingou, ainsi qu'à d'autres jeunes recrues, d'apprendre justement à l'utiliser. Réussissant au premier essai un exercice qui consistait à coder la fonction sinus, elle impressionna l'instructeur et fut invitée immédiatement à changer de division (et donc d'étage !) pour intégrer le groupe des tout premiers programmeurs. L'ordinateur servait principalement à des tâches liées à la conception des bombes, mais, de temps en temps et surtout pendant le week-end, les chercheurs pouvaient l'utiliser pour étudier des problèmes de physique fondamentale et même pour jouer aux échecs. Mary Tsingou et le physicien John Pasta ont ainsi été les premiers à créer des graphiques sur l'ordinateur, lorsqu'ils étudièrent ensemble un problème simulant une explosion qu'ils ont pu visualiser sur un oscilloscope.

Mary Tsingou a ainsi interagi avec John Pasta, qui fut nommé plus tard à la tête de la National Science Foundation, et aussi avec Stanislaw Ulam, un brillant mathématicien d'origine polonaise, dont plusieurs contributions sur

Article initialement paru dans *Reflets de la physique* : T. Dauxois, « La (dis-)simulation FPU : une femme physicienne underground », n° 67, pp. 26-30, 11. 2020.

ENSEIGNER LA PHYSIQUE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES

Les phénomènes non linéaires sont la règle en physique ! Découvrir à travers un cours introductif les systèmes dynamiques et le chaos devrait faire partie de la formation de toute physicienne ou physicien et non être réservé aux spécialistes. Cette initiation sera essentielle si elle ou il ambitionne de mener des recherches, car la prédominance du concept de déterminisme dans nos formations cache certains comportements pourtant importants. C'est aussi central dans beaucoup d'autres domaines que la physique, par exemple en écologie ou bien en économie, puisque ces deux champs disciplinaires ont mis en évidence que les notions d'instabilité et de bifurcations entre régimes radicalement différents étaient capitales !

Ces idées sont trop peu enseignées dans nos formations et trop peu assimilées par nos concitoyens, surtout dans les sphères politiques ! Comprendre que prévoir la météo pour la fin de la semaine est notoirement difficile (justement les modèles sont chaotiques), mais que cela n'empêche pas de prédire le climat dans

quelques dizaines d'années, est important. Cette idée était déjà contenue dans l'excellent article *Deterministic nonperiodic flow*, du météorologue américain Edward Lorenz, paru en 1963, et peut être présentée sans difficulté au niveau master 1, voire plus tôt à l'aide de splendides et très éducatives vidéos telles que celles du site www.chaos-math.org.

Lorenz ne s'est pas contenté d'identifier l'essence du chaos (Henri Poincaré l'avait d'ailleurs fait avant lui), en mettant en évidence qu'une description très précise du futur dépend de manière ultrasensible de notre connaissance du présent, beaucoup trop sensible en pratique pour faire des prédictions. Il a aussi, et peut-être surtout, montré qu'une approche statistique permet de prédire des comportements globaux. En effet, le chaos conduit en général à une exploration plus grande et surtout plus complète de l'espace des phases, un espace abstrait dont les coordonnées sont non pas des positions, mais des quantités de mouvement. Cela permet qu'une moyenne temporelle (de la quantité

physique qui nous intéresse) supposant que tous les états accessibles sont équiprobables conduise à une prédiction beaucoup plus proche de la réalité dans le cas chaotique que dans le cas régulier.

À cause de la sensibilité forte aux conditions initiales, le prévisionniste ne sera donc pas en mesure d'affirmer que « le soleil illuminera l'École normale supérieure de Lyon tel jour précis ». En revanche, il pourrait prédire la température moyenne à Lyon au mois de juillet dans cinquante ans. C'est donc l'alliance de la physique non linéaire et de la physique statistique, ce que l'on nomme « physique hors équilibre », qui se révèle être la bonne approche. La première expérience numérique codée par Mary Tsingou a donc aussi permis de découvrir un domaine inexploré jusqu'alors et pourtant très important. Au cours des années, la communauté française a d'ailleurs joué un rôle prépondérant dans sa compréhension. Une autre histoire qui mériterait d'être racontée...