

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...

le développement de la bombe à hydrogène ainsi que sur la propulsion nucléaire furent décisives. Elle n'a eu en revanche que peu de contacts avec Enrico Fermi, qui était professeur à Chicago et ne visitait Los Alamos que pendant de courtes périodes durant l'été. Elle connaissait cependant beaucoup mieux la fille de Fermi, Nella, qui ne voulait pas rester en permanence avec ses parents pendant leurs visites à Los Alamos. Les deux jeunes femmes ont donc dormi dans le même dortoir, tandis qu'Enrico et Laura Fermi étaient accueillis par leurs bons amis Stan et Françoise Ulam.

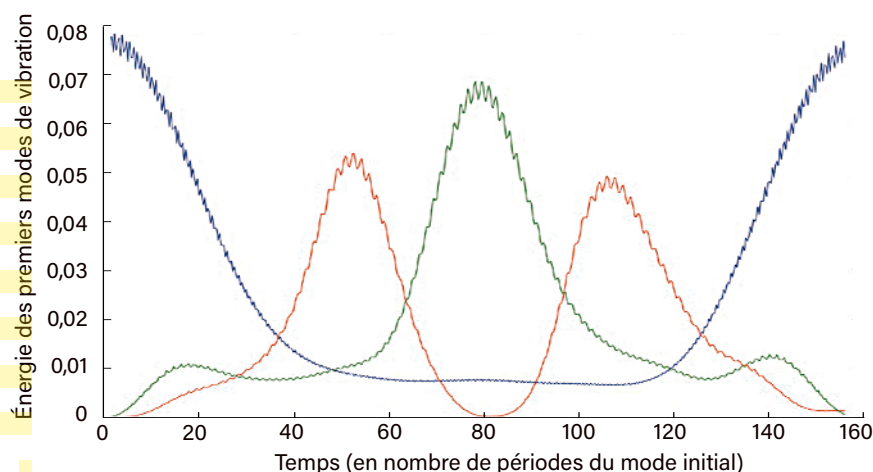
UNE IDÉE DE FERMİ

C'est Fermi qui a eu le génie de proposer qu'au lieu de simplement effectuer des calculs standard, les ordinateurs puissent être utilisés pour tester une idée physique. Après ses contributions de toute première importance, tant expérimentales que théoriques, qui lui valent un respect éternel des physiciens, Fermi inventa ainsi le concept d'expériences numériques: c'est beaucoup moins connu. Fermi proposa donc de vérifier la prédiction de la physique statistique sur la thermalisation des solides, c'est-à-dire sur la propagation de la chaleur dans les solides.

Des calculs préliminaires ont confirmé le résultat attendu, à savoir que l'énergie introduite dans un mode de vibration unique dérive vers d'autres modes. Le comportement quasi périodique n'a pas été observé au début, car l'ordinateur était trop lent pour permettre à une simulation numérique de fonctionner assez longtemps. Mais un jour, l'ordinateur ne s'est pas arrêté comme prévu et le calcul a continué de tourner. Les chercheurs ont constaté à leur grande surprise que la quasi-totalité de l'énergie était revenue au mode initial et que l'état initial était presque parfaitement retrouvé. Ce fut le début d'une recherche fructueuse.

L'algorithme utilisé par Mary Tsingou sur le Maniac en 1955 pour simuler la relaxation de l'énergie dans un cristal modèle est reproduit page 77; je l'ai retrouvé en 2007 dans sa cave lors d'une visite chez elle. Sa complexité peut être comparée aux quinze lignes de code du logiciel Matlab qui sont suffisantes pour une simulation moderne du problème de Fermi-Pasta-Ulam. Programmer les premiers ordinateurs était une tâche qui exigeait beaucoup de perspicacité et d'originalité, et, tout au long des années 1960, voire plus tard, les programmeurs étaient souvent mentionnés comme coauteurs.

Il a été souvent avancé que la raison pour laquelle Mary Tsingou était citée comme collaboratrice, mais pas comme coautrice, est qu'elle n'avait pas participé à l'écriture du rapport, bien qu'elle ait produit certains graphiques. En fait, Fermi n'était pas impliqué dans l'écriture non plus puisqu'il est mort en 1954, avant la



Dans l'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou, on suit l'énergie totale (cinétique et potentielle) des différents modes linéaires de vibration, chacun étant associé à une longueur d'onde. Initialement, seul le mode de plus grande longueur d'onde est excité (ci-dessus en bleu, unité arbitraire). Après un transfert vers les modes 2 (en vert), 3 (en rouge), etc., l'énergie revient presque complètement vers le premier mode: cette récurrence fut une surprise totale et resta longtemps inexpliquée.

rédaction du rapport. On pourrait avancer, *a minima*, que la distinction entre l'écriture et le travail accompli sur le document classé secret a probablement été mal comprise par les lecteurs ultérieurs. La très humble Mary Tsingou n'en garde aucune amertume.

En 1958, Mary Tsingou épousa Joseph Menzel, qui travaillait également à Los Alamos, pour la Force de protection de la Commission de l'énergie atomique. Elle resta dans cette petite ville alors même que ses collègues partaient: Metropolis pour Chicago, Pasta pour Washington et Ulam pour le Colorado. Elle travailla sur de nombreux problèmes différents, toujours avec des ordinateurs. Elle devint l'une des premières expertes en Fortran, inventé par IBM en 1955, et fut chargée d'aider les chercheurs du laboratoire.

Après son travail de programmation sur le Maniac, Mary Tsingou est revenue sur le problème de Fermi-Pasta-Ulam avec Tuck au début des années 1970 pour étudier les récurrences plus longues. Elle a également examiné les solutions numériques des équations de Schrödinger, en physique quantique, et a travaillé avec le brillant mathématicien et physicien d'origine hongroise John von Neumann pour étudier le mélange de deux fluides de densités différentes. Sous la présidence de Ronald Reagan, enfin, elle a été aussi profondément impliquée dans les calculs du projet *Star Wars*.

Retraitée en 1991, Mary Tsingou Menzel vit toujours aujourd'hui, à plus de 90 ans, avec son mari à Los Alamos, tout près de l'endroit où le problème de Fermi-Pasta-Ulam a été conçu et découvert. Reconnaissons sa contribution et parlons désormais du «problème de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou»! ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Dauxois, **Fermi, Pasta, Ulam, and a mysterious lady**, *Physics Today*, vol. 61, pp. 55-57, 2008.

G. Gallavotti (éd.), **The Fermi-Pasta-Ulam problem : A status report**, Springer, 2008.

T. Dauxois et M. Peyrard, **Physics of Solitons**, Cambridge University Press, 2006.

T. Dauxois et al., **The Fermi-Pasta-Ulam « numerical experiment » : History and pedagogical perspectives**, *Eur. J. Phys.*, vol. 26, pp. S3-S11, 2005.

J. L. Tuck et M. T. Menzel, **The superperiod of the nonlinear weighted string (Fermi-Pasta-Ulam) problem**, *Adv. Math.*, vol. 9, pp. 399-407, 1972.

E. Fermi et al., **Los Alamos Scientific Laboratory report LA-1940**, 1955.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
 P.86 Art & science
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

LE MONDE NUMÉRIQUE PASSE AU ZETTA

Les capacités de calcul et de stockage de l'information continuent de croître. Globalement, où en est-on aujourd'hui? Les estimations font apparaître l'ordre de grandeur de 10^{21} octets, c'est-à-dire le zettaoctet.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au
 laboratoire Cristal
 (Centre de recherche
 en informatique, signal
 et automatique de Lille)

Il y a une vingtaine d'années, plusieurs articles de cette rubrique traitaient de la quantité d'informations numériques sur Terre et de la capacité cumulée de calcul des dispositifs électroniques. Le nombre 10^{20} (100 milliards de milliards) était présenté comme un repère approximatif commode. La quantité d'informations numériques sur Terre – disques durs, mémoires des ordinateurs et téléphones, CD, DVD, etc. – était vers l'an 2000 d'environ 10^{20} octets (1 octet est égal à 8 bits d'information) et la capacité de calcul des dispositifs électroniques atteignait en ordre de grandeur 10^{20} instructions par seconde (IPS).

La loi de Moore, sous sa forme la plus générale, est l'affirmation que «les capacités des dispositifs informatiques pour un prix donné doublent tous les deux ans». Cette forme générale ne correspond pas vraiment à la loi énoncée par Gordon Moore, laquelle ne portait que sur le nombre de transistors par centimètre carré des puces électroniques dont ce cofondateur d'Intel pensait qu'il doublait environ tous les ans (énoncé de 1965), puis tous les deux ans (énoncé de 1975). Nous prendrons cependant comme repère la loi générale concernant tous

les dispositifs informatiques, en la critiquant quand c'est nécessaire. Notre question principale sera: qu'est devenu le 10^{20} proposé il y a deux décennies?

L'ÈRE DU ZETTA, VOIRE DU YOTTA

Un doublement tous les deux ans pendant vingt ans donne une multiplication par 1000 environ, car $2^{10} = 1024 \approx 10^3$, soit un ordre de grandeur gagné tous les sept ans environ. En sommes-nous alors à 10^{23} pour la mémoire numérique cumulée et pour la puissance de calcul mesurée en nombre d'instructions par seconde?

Il est difficile de répondre avec certitude. Les évaluations disponibles, nos calculs et les divers raisonnements formulés pour produire des réponses, nécessairement approximatives, ne permettent pas des affirmations certaines. Cependant, les conclusions que nous allons proposer sont justes à un ordre de grandeur près, parfois deux pour les plus délicates. Même s'il est impossible d'avoir des évaluations fines, nous pensons qu'il est utile de disposer des chiffres que nous indiquerons, plutôt que croire à tort que, par exemple, 10^{10} , 10^{15} ou 10^{30} sont des évaluations globales pour l'information ou le calcul.



Jean-Paul Delahaye a notamment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).