

**Communication
de Monsieur Jean-Gérard THEOBALD**



Séance du 15 juin 2001



**Cristaux, jets moléculaires,
chronométrie et physique**

Depuis des siècles on a fait appel à des systèmes mécaniques, les horloges, pour garder le temps. Chaque perfectionnement décisif de ces dispositifs a permis des avancées dans d'autres domaines de la connaissance en général. Ainsi dès l'époque de Louis XIV, Richer, en 1672, en s'apercevant qu'une horloge battait moins vite à Cayenne qu'à Paris, permit de découvrir l'aplatissement de la terre. La mise au point des chronomètres, par l'apparition du ressort spiral (ce qui permit de les emporter commodément en mer), apporta une augmentation de la précision dans la détermination des longitudes. On peut considérer la chronométrie comme l'amélioration des systèmes de mesure du temps. On peut aussi utiliser ces systèmes pour étudier des effets sans lien apparent avec les performances, mais simplement parce que les dispositifs mis en oeuvre permettaient d'observer de nouveaux phénomènes. Certaines expériences dérivent du phénomène de piézoélectricité, les autres de systèmes à jets moléculaires, d'où le titre de cette causerie.



I

Peut-être vais-je rappeler brièvement l'histoire de la chronométrie.

Après les sabliers et les horloges à eau, les horloges mécaniques apparurent au 13^{ème} siècle, d'après Henri Belmont. La première en France fut celle de la cathédrale de Sens (1292). Le ressort, utilisé pour les ser-

rures et les armes à feu, permit de construire les premières montres, la première en France vers 1500 (Jean Coudray à Blois). Galilée proposa d'utiliser le pendule. Huygens, au 17^{ème} siècle inventa le spiral et utilisa le pendule pour régler la marche des horloges.

Le grand ancêtre à Besançon est Mégevand, venu de Genève au moment de la Révolution, qui développa l'industrie horlogère. Cette industrie prospéra au 19^{ème} siècle sur le plateau de Maîche. De nos jours Henri Belmont a rassemblé les pièces et machines datant de cette époque (Musée du temps). Si l'on parle mesure des fréquences et Besançon, il ne faut pas oublier Lissajous, dont les figures, données par deux mouvements sinusoïdaux de périodes multiples l'une de l'autre, ont servi de publicité aux usines Lip dans les années 1960.

C'est en 1910 que fut créée à Besançon une maîtrise de conférences de Chronométrie, dont le premier occupant fut Marcel Moulin. Le jury de sa thèse sur des «Recherches sur l'ionisation par les rayons» avait été présidé par A. Haller, le chimiste fondateur de l'Institut de Chimie de Nancy et, je le signale en passant, plusieurs fois nommé pour le prix Nobel. Les autres membres du jury étaient F. Perrin et Madame Curie. Moulin s'adapta à sa nouvelle mission à l'école horlogère de Besançon et se donna pour tâche de faire pénétrer les bases de la physique expérimentale qui faisait cruellement défaut dans les milieux horlogers. Il mourut au feu le 6 septembre 1914. Mais dans le peu de temps qui lui restait à vivre, il publia plusieurs articles sur les ressorts spiraux, la transmission de l'heure par radio et prépara un brevet d'horloge électrique que sa veuve déposa en 1918. Plus près de nous Jules Haag publia sa théorie de la synchronisation. Professeur de mécanique rationnelle, il était le contraire d'un laxiste aux examens. Son élève R. Chaléat continua la tradition de l'horloge mécanique. En 1940 fut nommé Pierre Mesnage dont la thèse, préparée alors qu'il était assistant d'Eugène Darmois (natif d'Eply), et traitant des spectres des gaz soumis à une décharge haute fréquence, n'avait rien à voir avec la chronométrie. Il développa l'étude des quartz piézoélectriques. Il faisait un excellent cours d'électromagnétisme et le premier enseigna les semi-conducteurs à Besançon. C'est lui qui, conjointement avec Yves Rocard (encore !) et Karolus orienta l'horlogerie vers la montre à quartz.

Il fallait un lien entre la recherche et l'industrie. Ce fut le rôle du Cétéhor, (centre technique de l'industrie horlogère) fondé en 1945 . Vers 1970, son directeur, Paul George (un lorrain) préconisa le développement de l'horlogerie électronique intégrée.

J'ouvre ici une parenthèse pour ne pas oublier d'autres physiciens fameux qui enseignèrent à Besançon. Jean-Jacques Trillat, connu pour

ses travaux sur les structures cristallines, fit fonctionner à Besançon la première lentille électronique, avec son assistant de l'époque, Rémi Fritz (originaire de Montigny-lès-Metz) qui préparait une thèse. Malheureusement pour ce dernier, la deuxième guerre mondiale éclata : devant l'avance des Allemands, le matériel fut chargé, pour être évacué en Suisse, sur un camion qui échoua dans un fossé. Rémi Fritz ne put jamais terminer sa thèse ; L'ironie du sort est que le premier microscope électronique qui fut installé après la guerre à Besançon est celui que les Allemands avaient laissé à Strasbourg en 1944. A J.-J. Trillat succéda Pierre Michel Duffieux, bien connu pour ses travaux d'optique utilisant la transformée de Fourier.

Mais c'est en 1955 qu'arriva à Besançon celui qui fut mon maître, Jean Uebersfeld. Cette venue, qu'on le veuille ou non fut une sorte d'ouragan. Uebersfeld introduisit à Besançon l'enseignement de la thermodynamique et celui de la mécanique quantique, corps de doctrine assez négligés jusqu'alors. Bien que j'aie satisfait aux exigences du certificat de physique générale, et très occupé par le certificat de chimie générale je pris le temps de suivre l'enseignement d'Uebersfeld. Il introduisit aussi la résonance magnétique (ses travaux sur l'effet solide sont encore cités aujourd'hui), ce qui permit de réaliser les premières expériences de résonance magnétique électronique impulsionnelle en champ magnétique fort. Il entreprit aussi le maser à ammoniac, ce dernier dans le cadre du Laboratoire de l'Horloge Atomique, dirigé par Alfred Kastler. C'est là que se développèrent de nouvelles techniques, en vue d'améliorer la mesure des fréquences au moyen de l'étalon primaire «maser à ammoniac». Sa précision était à l'époque de 10⁻¹⁰, et on espérait encore l'améliorer. En fait l'ammoniac fut détroné par le césium. Mais grâce au maser les bisontins avaient appris la technique des jets moléculaires et le maser restait un merveilleux outil de physique. En 1975, les recherches proprement métrologiques sur le maser furent arrêtées. Le laboratoire de l'Horloge Atomique devint un Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs, les étalons atomiques étant étudiés dans les laboratoires parisiens. Je me permets de penser que c'est moins glorieux. Il est certain aussi que l'enseignement de certains aspects de la physique moderne subit le contrecoup de cet abandon. Mais entre temps le nombre d'étudiants avait augmenté, ce qui permit d'augmenter aussi le nombre d'enseignants, de diversifier les enseignements de troisième cycle et... de développer l'esprit de chapelle.

Du côté industriel, l'horlogerie mécanique a pratiquement disparu, mis à part quelques horlogers, même encore assez jeunes capables de continuer la tradition. Comme Pierre Mesnage l'avait préconisé, le tissu industriel et scientifique s'est reconverti dans les microtechniques, par

exemple les micromanipulateurs, micropompes, ou la microchirurgie. Le laboratoire fondé par P.-M. Duffieux, à côté de la microscopie par ondes de surface, réalise pour les communications optiques des structures de plus en plus réduites, on peut dire aujourd'hui nanoscopiques, comme celles qui sont étudiées dans le centre commun de Georgiatech (Metz). D'autres en parleraient bien mieux que moi.



II

Dans la première moitié du 20^{ème} siècle se développèrent les étalons de fréquence à quartz. Les cristaux de quartz, parce qu'ils n'ont pas de centre de symétrie, s'électrisent s'ils sont déformés mécaniquement, c'est la piézoélectricité directe. Réciproquement, ils se déforment s'ils sont polarisés électriquement par l'application d'une tension électrique, c'est la piézoélectricité inverse découverte par Lippmann (d'origine luxembourgeoise). On peut dès lors les utiliser pour constituer des oscillateurs piézoélectriques qui ont été utilisés pour le sondage sous-marin, l'échographie, le sondage terrestre, etc... La stabilité des oscillateurs réalisés avec des quartz peut être telle qu'ils servent aussi d'étalons de fréquence. Leur précision permet de mettre en évidence les irrégularités de la rotation de la terre.

Pour les réaliser, il faut déposer des électrodes métalliques sur deux faces opposées d'un cristal, et le métal qui adhère le mieux est le nickel. C'est gênant pour la métrologie, tant pis, mais tant mieux pour la physique. Le nickel est ferromagnétique, dès lors la fréquence du résonateur dépend aussi du métal formant les électrodes dont la première couche est en nickel. M. Néel, expliqua par quel mécanisme. Le nickel est ferromagnétique jusqu'à une température de 356 ° Celsius, cela signifie que l'énergie magnétique et l'énergie d'agitation thermique du nickel sont du même ordre de grandeur, même à la température ambiante. Si on aimante le nickel, ses propriétés élastiques sont modifiées de façon sensible (magnétostriction). C'est l'explication du phénomène observé, par l'intermédiaire de l'élasticité du nickel (module d'Young).

Mais qui dit magnétisme dit aussi résonance magnétique. Elle s'adresse au moment magnétique de l'électron, lequel se comporte comme un petit aimant. En irradiant un matériau (placé dans un champ magnétique continu) avec une onde électromagnétique de fréquence appropriée, le champ magnétique alternatif de l'onde peut réorienter l'aimantation et diminuer sa valeur le long du champ continu. Une partie de la puissance de l'onde est alors absorbée à cette occasion, la résonance

(absorption maximale) est obtenue en faisant varier le champ magnétique continu. Le phénomène s'observe en plaçant le cristal piézoélectrique (avec ses électrodes) dans une cavité hyperfréquence (9200 MHz) et en mesurant simplement le courant d'un cristal détectant cette onde. Mais puisque l'aimantation continue est modifiée par la résonance magnétique, il n'est pas étonnant que, par l'intermédiaire de la magnétostriktion du nickel, la fréquence du résonateur piézoélectrique (voisine de 5 MHz) soit elle aussi modifiée. On peut donc prévoir que la résonance magnétique, diminuant la composante continue de l'aimantation des électrodes, va atténuer la sensibilité du résonateur à quartz à un champ magnétique continu. C'est ce qu'on a observé expérimentalement.

Si on opère sur un cristal qui soit paramagnétique, on peut observer des effets liés au cristal plutôt qu'aux électrodes, si on réalise celles-ci avec un matériau non magnétique, comme des peintures conductrices (qui ont l'inconvénient d'être fragiles). Le métavanadate de potassium $K_2V_3O_8$ (système quadratique) est lui aussi piézoélectrique (et même cent fois plus que le quartz). Il renferme des ions V^{4+} qui sont paramagnétiques. En constituant un résonateur piézoélectrique, on produit des vibrations mécaniques, qui, à l'échelle atomique se traduisent par des variations relatives de distance entre deux ions paramagnétiques. Chacun des ions V^{4+} voit alors un champ magnétique variable dû aux vibrations de ses voisins, sans qu'on ait à appliquer une onde électromagnétique. Si la fréquence des vibrations est de quelques MHz, le champ continu de résonance est de l'ordre du gauss (on parle de résonance en champ bas). On peut aussi observer la résonance en champ bas sur le nickel des résonateurs à quartz, qui seront donc sensibles à des champs magnétiques faibles. Les expériences décrites ici montrent qu'il y a des effets combinés entre piézoélectricité et résonance magnétique. Pour fixer les idées, le champ magnétique terrestre (0,2 gauss ou $2 \cdot 10^{-5}$ tesla) produit des variations relatives de fréquence de 10-12, ce qui est supérieur à la stabilité des meilleurs étalons à quartz (10-13 à 10-14), et on conçoit que les phénomènes étudiés ici aient une incidence sur les résonateurs utilisés dans le pilotage des avions et des fusées.

Le phénomène lié aux propriétés magnétomécaniques du nickel est illustré par l'expérience qui vous est présentée.

Les résonateurs piézoélectriques ne sont plus les champions de la stabilité. Ils ont été détrônés par les appareils à jets moléculaires ou atomiques. Dans ces étalons, la référence de fréquence est une transition atomique ou moléculaire. Le maser se compose essentiellement d'une source émettant des molécules d'ammoniac, d'un focaliseur triant les

molécules réparties au départ entre deux niveaux d'inversion a et b. A l'issue du focaliseur subsistent dans le jet, les molécules occupant le niveau supérieur a, l'état b étant éliminé. En traversant un résonateur électromagnétique, ces molécules perdent leur énergie en émettant une onde électromagnétique dont la fréquence est connue très précisément. Un maser est difficile à faire fonctionner sur un grand nombre de fréquences. On peut construire un spectromètre passif en plaçant un deuxième focaliseur après la zone d'irradiation, suivi d'une jauge à vide qui sert en quelque sorte à mesurer l'intensité du jet, et plus précisément le nombre de molécules dans l'état a. Si des molécules de l'état a transitent vers l'état b en traversant la zone d'irradiation, en passant dans le deuxième focaliseur, ces molécules qui sont maintenant dans l'état b sont éliminées, la transition est donc détectée par la baisse d'intensité du jet. Un tel spectromètre fonctionne avec toutes sortes de molécules, l'ammoniac, mais aussi le formol, l'acide formique... Ces expériences ont duré de 1969 jusqu'à ces temps-ci. On peut observer une quantité de nouvelles transitions ; la plus basse à 89 kilohertz (transition 10-5 de l'acide formique). Toutes ces transitions ont été observées sans le moindre pompage optique. Parmi les nombreux phénomènes curieux, citons l'élargissement dissymétrique des transitions du formol vers les fréquences supérieures à chaque résonance, à cause de l'effet Stark, dû au champ électrique produit sur une molécule par ses voisines, même lointaines.

Examinons maintenant un phénomène rejoignant aussi les préoccupations de la mesure des fréquences. Les étalons atomiques (ou moléculaires) de fréquence ont été retenus car un atome isolé dans un jet présente des fréquences de résonance qui ne dépendent que de lui même. Pourtant certains phénomènes peuvent perturber la mesure de ces fréquences. L'un d'eux est l'effet Bloch-Siegert, connu dès 1940, qui consiste en un déplacement de fréquence augmentant avec l'intensité du champ électromagnétique (effet au second ordre). Il existe une autre cause de déplacement, indépendante de l'intensité du champ et liée à la durée de l'irradiation, mais aussi aux phases relatives des oscillations de l'atome et du champ électromagnétique. Ce déplacement vers les basses fréquences se manifeste d'autant plus que la durée d'irradiation est courte (quelques périodes). La fréquence naturelle de la transition apparaît alors comme une limite vers laquelle tend la mesure lorsque sa durée augmente indéfiniment. Les écarts de fréquence varient comme $1/n^2$, n étant le nombre de demi-périodes d'irradiation. On ne peut s'empêcher de remarquer que dans l'ancienne méthode des coïncidences, utilisée pour comparer deux pendules, la précision varie suivant la même loi. Il apparaît une première ressemblance entre les méthodes anciennes de mesure de fréquence et les méthodes de la physique moderne. Mais il

existe une autre similitude : quand on règle une horloge à pendule traditionnelle ou encore un chronomètre à ressort spiral, il est bien connu que l'instant où est donnée l'impulsion qui entretient le mouvement intervient sur la marche du chronomètre. Ici se produit un phénomène semblable lié à la phase du champ électromagnétique. On voit que certains comportements sont immuables, qu'il s'agisse de chronométrie mécanique ou quantique.

Pour augmenter la précision des mesures on a réussi à ralentir des jets atomiques et même à les arrêter: le temps dont on dispose pour observer les atomes est plus long, ce qui permet des mesures plus précises. Ce sont les fameuses expériences sur les atomes piégés, réalisées au laboratoire de l'ENS et qui ont valu à C. Cohen-Tannoudji son prix Nobel. Elles dérivent de celles de Frisch (1933), qui déviait les atomes en les «poussant» avec des photons. On ralentit les particules en dirigeant en sens inverse un faisceau de photons dont l'énergie est absorbée par les particules à ralentir, puis dissipée par le rayonnement dans toutes les directions ; C'est le phénomène bien connu de la pression de radiation, qui fait entre autres que la queue des comètes est toujours dirigée à l'opposé du soleil, d'où vient le rayonnement. Des expériences semblables sont difficiles sur des jets moléculaires, mais à cause du grand nombre de niveaux d'énergie, on peut tout au plus obtenir un ralentissement de quelques mètres par seconde

Une fois les atomes ralentis, on peut les piéger dans une onde stationnaire. C'est aussi un phénomène connu depuis longtemps et même commun, dans les champs continus. Mais des effets semblables liés à la spectroscopie peuvent être obtenus dans des champs alternatifs, plus riches de possibilités, car la susceptibilité change de signe suivant que la fréquence d'irradiation est supérieure ou inférieure à une fréquence de résonance. Cette force peut s'exercer sur des objets matériels . Ainsi Bensimon (ENS) a réalisé des pinces optiques qui utilisent les gradients de champ électrique d'un seul faisceau laser pour manipuler des particules de l'ordre du micron (cellules biologiques) les forces mises en jeu sont de l'ordre du piconewton (millième de millièème de gramme). En utilisant des hyperfréquences on peut agir sur des objets de l'ordre du centimètre, par exemple des substances paramagnétiques placées dans une cavité hyperfréquence. Comme on vient de le voir, l'impulsion des photons suivant une direction permet d'exercer une force. Les photons possèdent aussi un moment de rotation, et on peut utiliser des transitions spectroscopiques pour imprimer un mouvement de rotation. Ce sont les belles expériences de Gozzini en résonance électronique, qu'on peut transposer en résonance cyclotronique: dans les deux cas, on fait tourner un objet placé dans un champ magnétique continu, en l'irra-

diant avec un champ alternatif. Mais c'est à peine avouable, on vient de réinventer le moteur à champ tournant. La résonance magnétique permet de choisir le sens de rotation du champ tournant, comme on choisit (avec un condensateur de démarrage) le sens de rotation d'une machine à laver.

Ce parcours un peu rapide aura montré, je l'espère, les interactions de deux domaines de la physique assez éloignés à priori, la mécanique et la spectroscopie. N'est-ce pas être un peu pluridisciplinaire?

Toutes les expériences relatées ici montrent aussi que les bases de la physique se ramènent à quelques idées simples connues depuis longtemps. Souvent les idées modernes sont des idées anciennes adaptées aux techniques récentes. Mais pour choisir les conditions expérimentales appropriées, il faut aussi des connaissances étendues, afin d'éviter les expériences inutiles et donc les échecs. Il n'y a plus d'expériences simples, à moins d'être génial.



Discussion

Le Président Sadoul remercie M. Théobald de sa communication : elle a incité les académiciens à rafraîchir leurs souvenirs de lycéens et a rappelé que l'académie a aussi une vocation scientifique.

M. Rivail part de la démonstration du conférencier quant à la sélection opérée par le physicien sur l'état d'un seul atome ou d'une seule molécule». Le défi consiste maintenant dans l'accession «au terme de la miniaturisation pour le stockage de l'information dans un seul atome ou une seule molécule, au lieu des milliards d'atomes réalisés aujourd'hui». A sa question: «Est-ce qu'à Besançon, on cherche dans cette direction?», M. Théobald répond affirmativement, en précisant que Marseille et la Républiques tchèque et slovaque collaborent dans cette recherche avec les Bisontins.

Mademoiselle Voilliard demande si l'on peut «établir un rapport entre les mouvements circulaires inversés des vents et le sens inversé des vents et des courants marins dans les deux hémisphères»? Notre confrère signale que la question a été posée à l'agrégation. Mademoiselle Mangin rappelle que Coriolis, hôte de Nancy, a défini ainsi la force qui porte son nom: «Tout fluide en mouvement à la surface de la terre est dévié vers sa droite dans l'hémisphère nord et vers sa gauche dans l'hémisphère sud. M. Bonnefont intervient pour dire qu'il ne s'agit en fait que d'un détournement relatif par rapport à un observateur terrestre.

M. Delivré se souvient de la «règle des trois doigts» : la champ, le courant, la force. M. Théobald lui confirme qu'elle demeure actuelle, car comme le «bonhomme d'Ampère», elle montre ce qu'est la champ magnétique.

Enfin, M. Robaux s'interroge sur l'utilisation des champs tournants dans l'industrie, le type de moteurs utilisé devant alors éviter les frottements et rester inusable. Il lui est répondu que «c'est intéressant pour désorienter un satellite, mais qu'il n'y a pas d'utilisation industrielle actuelle, ce qui est dommage».