



*Séance solennelle de l'Académie des sciences / 11 octobre 2011
Discours des nouveaux Membres sous la coupole de l'Institut de France*

Physique hors de l'équilibre: instabilité et régulation

Stéphan Fauve

La solennité de ces lieux se prête sans doute mal à parler d'instabilités et de chaos, mais c'est néanmoins ce que je me propose de faire en essayant d'en montrer les aspects positifs.

Il n'est peut-être pas nécessaire de définir le terme d'instabilité tant ce phénomène survient dans de nombreux événements de la vie courante. On n'en retient en général que l'aspect nuisible. C'est par exemple la turbulence engendrée par instabilité dans le sillage de nos véhicules qui en est la source principale du coût énergétique. Les instabilités limitent aussi le rendement de nombreux processus industriels : le coût de la production d'aluminium par exemple implique pratiquement 50% d'électricité perdue en chaleur ; réduire ces pertes de façon substantielle s'est heurté depuis plus d'un siècle à une instabilité hydrodynamique se produisant lorsqu'on tente de le faire. Il n'est donc pas surprenant que le domaine des instabilités ait pendant longtemps été beaucoup plus connu des ingénieurs que des physiciens. Mais le pragmatisme des ingénieurs les a conduit le plus souvent à éviter les régimes instables quitte à en payer le coût, ou à les contrôler plutôt que d'en étudier le développement.

Ce sujet aurait pu se développer en physique dès le début du XX^e siècle suite aux travaux de Poincaré, mais, à quelques exceptions près, les physiciens se sont à l'époque tournés vers d'autres questions. Il existe peut-être aussi une raison plus fondamentale qui explique qu'ils n'aient que peu étudié ce problème. En effet, une approche usuelle de la physique, qui s'est même répandue dans les disciplines voisines, consiste à isoler de son environnement le système à étudier. Cela en simplifie la compréhension mais élimine des comportements dynamiques non triviaux, le système relaxant alors en général vers un état d'équilibre.

Il a fallu attendre les années 70 avec la compréhension du comportement chaotique des systèmes déterministes pour que les physiciens s'intéressent au problème d'instabilité. Une première surprise a été de constater que des systèmes dissipatifs simples, comportant un petit nombre de degrés de liberté régis par des lois déterministes, pouvaient donner lieu à des comportements aléatoires. Un autre sujet d'étonnement a été relatif aux transitions vers ces régimes chaotiques. Celles-ci se produisent par l'intermédiaire de quelques instabilités élémentaires et sont universelles, c'est à dire ne dépendent pas de la nature du système concerné. Mais la encore, il semble que seuls des résultats négatifs aient été obtenus, tout au moins en ce qui concerne les applications ; l'impossibilité de prévisions météorologiques précises au delà du court terme est par exemple une conséquence du comportement chaotique.

Pour en venir aux aspects positifs des instabilités, l'un d'entre eux tient au fait qu'elles sont indissociables du phénomène de régulation. En effet, lorsqu'une instabilité se développe et sature sous l'effet des non linéarités, différents effets antagonistes se compensent, ce qui donne lieu à un état robuste, c'est à dire peu sensible à des perturbations externes. Un bon exemple est donné par les phénomènes cycliques que l'on peut observer à des échelles diverses: la variation de la luminosité de certaines étoiles, les variations de populations d'espèces animales en compétition, les oscillateurs en électronique, etc. Il est remarquable que l'amplitude et la période de leurs oscillations soit peu sensible aux fluctuations, ce qui n'est pas le cas de l'archétype des phénomènes oscillants, le pendule simple, dont le mouvement est durablement affecté même par des fluctuations momentanées. De façon paradoxale, cette robustesse résulte en partie de l'interaction avec le milieu extérieur. Le système y puise l'énergie nécessaire à compenser les processus dissipatifs, et cette compensation n'est réalisée que pour des valeurs précises de l'amplitude et de la période d'oscillation. Une fluctuation n'affecte donc le système que de façon momentanée contrairement au cas de systèmes conservatifs. Le même type de robustesse se rencontre dans certains mécanismes de propagation du type de celui transmettant l'influx nerveux par exemple, qui peut être modélisé comme un ensemble d'instabilités en cascade s'induisant de façon successive. Des inhomogénéités locales ont beaucoup moins d'influence sur ce type de mécanisme de propagation que sur une onde linéaire usuelle. De nombreux phénomènes naturels et peut-être également les systèmes vivants, présentent un comportement robuste en raison de la coexistence d'un grand nombre de modes potentiellement instables qui s'autorégulent les uns les autres. Nous ne connaissons pas encore de principe général, tel qu'il en existe en physique statistique à l'équilibre, permettant de caractériser ces régimes de fonctionnement. Un exemple particulièrement instructif est celui de l'équilibre énergétique de notre planète. La puissance que nous recevons du soleil est transformée sous diverses formes, cycle des précipitations, vents, courants marins, en faisant intervenir diverses instabilités hydrodynamiques. Inhiber l'une d'entre elles affecterait de façon évidente la stabilité de l'ensemble.

Je voudrais terminer en insistant précisément sur le rôle des instabilités dans les processus de transformation d'énergie. L'instabilité de convection thermique, qui engendre un écoulement sous l'effet d'un gradient de température et joue un rôle important dans de nombreux processus astrophysiques et géophysiques, peut être vue comme une machine de Carnot fonctionnant entre une source chaude et une source froide. La production industrielle d'électricité initiée à la fin du XIX^e siècle, repose sur un mécanisme d'instabilité, l'effet dynamo, qui est la façon la plus efficace de transformer du travail mécanique en énergie électrique. Ce sont ces deux mécanismes en cascade, qui sont à la base de la génération du champ magnétique terrestre et qui semblent donc beaucoup plus efficaces que des processus microscopiques de transformation directe d'énergie tels que l'effet thermoélectrique, que l'on pourrait aussi envisager à l'œuvre. Nous ne pouvons qu'espérer que le besoin de nouvelle source d'énergie, ou plus exactement, de nouvelle méthode de transformation d'énergie, bénéficie de l'exploitation d'un nouveau processus d'instabilité. L'instabilité deviendrait ainsi de nouveau productive.