



## ***Chaos, morphogénèse et auto-organisation : les rôles de l'histoire et de la mémoire***

par **Yves COUDER**, Membre élu dans discipline « Sciences mécaniques et informatique »

Le titre que j'ai donné à cet exposé ne permet pas de savoir si je vais parler de ma vie, ou s'il va s'agir de physique, de biologie, ou d'urbanisme. Je vais tenter de montrer qu'il y a des raisons à cette ambiguïté.

Comment ai-je été amené à travailler sur de tels thèmes? Mes premières tentatives en recherche concernaient la physique des solides et elles étaient fort peu fructueuses. C'est vers la fin des années 1970 que, stimulé par Albert Libchaber et accompagné courageusement par Marc Rabaud et Henry Thomé, je me suis tourné vers l'hydrodynamique et l'étude des phénomènes non-linéaires. A cette époque le développement de la théorie des systèmes dynamiques venait offrir de nouvelles perspectives pour l'étude des phénomènes hors d'équilibre.

L'aspect le plus fascinant des phénomènes de la dynamique non linéaire tient à leur caractère générique. Etant liés à des ruptures de symétrie, des effets identiques peuvent se retrouver dans des systèmes variés, à des échelles temporelles et spatiales extrêmement différentes. Cette caractéristique crée pour l'expérimentateur un vaste terrain de jeu. Elle permet aussi un dialogue entre des communautés scientifiques éloignées. En explorant le caractère universel de ces phénomènes, on a retrouvé à la fin du vingtième siècle un parfum du dix-septième siècle, l'époque où la philosophie naturelle recouvrait ce que nous appelons maintenant la biologie, la physique ou la mécanique des fluides.

Depuis cette époque lointaine on s'est trop facilement habitué à un éloignement progressif et croit-on inéluctable de ces sciences. Pourtant de grandes caractéristiques la dynamique des systèmes hors d'équilibre par exemple leur restent communes. Dans ces domaines la différenciation en communautés distinctes provient surtout de leurs différentes méthodes de travail et des buts qu'elles se fixent. Ainsi les physiciens tendent toujours à isoler un phénomène pour mieux l'étudier. C'est une méthode qui a fait ses preuves mais qui ne doit pas les empêcher de retourner de temps à autre à la source des phénomènes naturels complexes où de nouvelles questions les attendent. Pour illustrer ces propos généraux je vais discuter brièvement les rôles respectifs de l'histoire et de la mémoire dans des systèmes dynamiques simples.

Le rôle de l'histoire est évident dans tous les phénomènes de croissance. La croissance dendritique des cristaux et celle des arbres ont ceci en commun de produire des structures branchées. A l'évidence dans ces systèmes les nouvelles branches croissent à partir des anciennes. Le passé fixe donc les conditions à l'origine du développement présent. Ce simple fait peut générer des comportements non triviaux que je vais illustrer ici en vous parlant des tournesols et de l'organisation de leurs fleurs. Depuis près de deux siècles l'étude de cette organisation, un cas particulier de ce qu'on appelle la phyllotaxie, est un point de rencontre entre botanistes, mathématiciens et physiciens.

Le cœur des inflorescences de tournesol présente une organisation remarquable avec un ordre quasi cristallin des fleurons qui s'alignent sur des spirales entrecroisées. Si on compte combien de spirales forment l'ensemble du motif on trouve par exemple 55 spirales d'un sens et 89 dans l'autre. Ces deux nombres ont la particularité d'être deux termes consécutifs de la suite de Fibonacci, la suite



mathématique, connue depuis le moyen-âge, où chaque élément est la somme des deux termes précédents. De telles spirales sont omniprésentes dans le monde végétal : on les retrouve dans les pommes de pin, les ananas les artichauts etc. Un point intrigant est que ces structures n'ont pas d'équivalent dans le monde minéral. Pour cette raison la tentation était grande d'attribuer cette organisation à une détermination génétique directe.

Stéphane Douady et moi-même pensions plutôt qu'elle résultait d'un phénomène dynamique et nous avons entrepris de concevoir une expérience, sans rapport avec la biologie, mais reproduisant les symétries de la croissance des plantes supérieures. Nous avons ainsi obtenu au laboratoire des organisations en spirales de Fibonacci dans une expérience de physique pure. Ces spirales y émergent par un phénomène d'auto organisation itérative dans laquelle la répulsion par les éléments antérieurs détermine la position des éléments en formation. On peut montrer que son origine géométrique tient à un évitement systématique des divisions orthoradiales rationnelles.

Naturellement nous n'avons pas oublié que dans les plantes toute l'auto organisation est mise en œuvre par la physiologie et que celle-ci est elle-même contrôlée par le système génétique. Mais ce que notre expérience a montré c'est qu'il n'y a pas besoin d'un contrôle génétique direct de la géométrie. C'est la continuité de la croissance d'un tournesol depuis les cotylédones de la plantule jusqu'aux fleurons qui permet de construire des spirales d'ordre de Fibonacci croissant progressivement jusqu'aux ordres élevés observés dans l'inflorescence. A contrario on trouve parfois des tournesols dans lesquels des accidents mécaniques ont perturbé la continuité de la croissance. Dans ces cas, bien qu'aucune modification génétique ne soit intervenue, l'organisation postérieure à l'accident a perdu tout rapport avec les nombres de Fibonacci.

La même logique d'auto-organisation historique apparaît dans la formation des réseaux que je n'aurais pas le temps de discuter en détail. On peut montrer que les nervations des feuilles végétales, la formation des fractures dans la glaçure des céramiques ou celle du réseau des rues d'une ville ancienne correspondent à un même phénomène de division itérative d'un espace à deux dimensions. Pour cette raison une même structure géométrique hiérarchisée est commune à ces trois types de réseaux.

Dans les dynamiques dont je viens de parler il n'y a pas de besoin d'une médiation dans le rôle de l'histoire. L'information qui est stockée dans la structure en formation suffit à générer les phénomènes d'auto-organisation. Mais il existe une autre classe de systèmes, infiniment vaste, où il y a couplage avec une mémoire associée.

Une des premières discussions sur de tels systèmes concerne évidemment la biologie et est due à Erwin Schrödinger. En discutant de façon abstraite la nécessité d'une stabilité de la transmission d'information entre générations successives, il a été un des premiers à proposer qu'une mémoire devait exister sous forme codée dans une structure de très petite dimension, un cristal aperiodique pensait-il. Crick et Watson ont reconnu plus tard que cette proposition avait contribué à stimuler leur recherche sur l'ADN.

A une autre échelle, le couplage à des mémoires codées est aussi une caractéristique des sociétés humaines. En parallèle avec la réalité présente produite par l'histoire, il existe des mythes, des livres religieux, des constitutions, des codes civils, une littérature... tous objets dans lesquels une information sur le passé est préservée sous forme codée.



Mais les systèmes que je viens de citer sont complexes et les physiciens aiment bien avoir des systèmes modèles simples. Une telle association avec une mémoire peut-elle exister à l'échelle d'un objet élémentaire? En travaillant avec Emmanuel Fort sur la dynamique des gouttes rebondissantes nous avons eu la chance de trouver une structure simple dans laquelle sont couplées de façon symbiotique deux entités de nature distinctes, l'une d'entre elles constituant une mémoire pour l'autre.

Nous avons à l'époque observé qu'une goutte peut rebondir à l'infini sur la surface d'un liquide si celle-ci vibre verticalement. A chaque choc avec l'interface la goutte génère une onde de surface et il existe un régime dans lequel la goutte se déplace horizontalement en surfant sur l'onde qu'elle a elle-même créée. On obtient ainsi un objet spontanément propagatif composé de deux éléments très différents étroitement associés. La goutte est un objet compact, localisé et indivisible, l'onde est spatialement étendue. De plus cette même différence d'étendue existe aussi temporellement. Les vaguelettes créées par les chocs successifs sont entretenues et se superposent pour constituer un champ d'onde global dans lequel une mémoire de la trajectoire passée de la goutte est codée et stockée. La goutte elle-même ne contient aucune mémoire mais elle vient à chaque rebond "relire" l'onde et c'est ce qui va déterminer où elle va rebondir. Le passé codé contribue donc à déterminer le mouvement présent de l'ensemble.

Quelle peut être la dynamique d'une telle association? Elle est très étrange. Bien que le système soit macroscopique on observe en particulier l'apparition de phénomènes de dualité onde-particule, surprenants à cette échelle. Ils sont corrélés à l'apparition spontanée de comportements chaotiques où seules des probabilités restent bien définies.

L'existence de ce chaos démontre que la mémoire qui peut avoir un rôle stabilisant peut aussi avoir un rôle déstabilisant. Ce dernier point n'est peut-être pas si surprenant ; il ne manque pas de situations individuelles ou sociales où la mémoire loin de stabiliser contribue au chaos.

A l'évidence, beaucoup de travail est encore nécessaire pour explorer les diverses perspectives ouvertes par ces dynamiques mémorielles.

Pour finir cet exposé je dois dire que je ressens profondément que l'honneur qui m'est fait aujourd'hui est la reconnaissance de travaux collectifs avec des collaborateurs que je n'ai pu tous citer. Ce sont eux qui ont fait l'histoire - et le plaisir- de ces entreprises.