

Forme et croissance

Stéphane Douady, Chercheur CNRS à l'Université Paris Diderot.

Enjeux environnementaux

La formation des dunes, le mouvement des avalanches, la croissance d'une feuille, d'un poumon ou encore d'une ville sont des sujets en apparence très éloignés. Pourtant, partout, cette même question apparaît : « quelles sont les contraintes externes qui influent sur la forme et la croissance ? ». À partir de là, il s'agit de construire un modèle phénoménologique qui décrit les composantes principales des mécanismes, mêlant mécanique, physique et mathématiques. S'ajoutent à cette liste, selon les sujets, de la biologie, de la botanique, ou de l'urbanisme.

Voici quelques exemples d'études :

L'interaction entre le vent et la forme des dunes permet, à l'aide de problèmes inverses, d'obtenir des informations sur les champs de vitesse des vents rien qu'en observant la surface des dunes. Cela est utile en planétologie, pour mieux comprendre ce qui se passe sur une planète lointaine.

L'étude des écoulements granulaires (avalanche, avancée du désert) a des enjeux environnementaux plus marqués dans les pays désertiques, telle que la Chine qui doit faire face à une disparition des plantes dans les zones semi-désertiques. Les financements français se font rares et nous avons plus ou moins laissé de côté ce sujet de recherche.

Maintenant, nous travaillons beaucoup sur le vivant.

Des mécanismes d'interactions sont élaborés dans le cadre d'études sur l'origine de la vie, autour d'expériences avec une dizaine de molécules. Les modèles créés sont pensés dans leur globalité et prennent en compte toutes les interactions. Ils sont plus pertinents que les modèles se contentant de relier des processus individuels entre-eux.

La morphogenèse des plantes est l'étude des liens entre croissance et forme. Nous nous intéressons à la phase de plasticité, lorsque les matières ne sont pas encore figées. Les contraintes externes ont alors une importance considérable dans la forme de la plante. L'influence génétique est presque moins importante parfois. Les modèles élaborés fonctionnent également avec des arbres. L'idée est de pouvoir paramétrer un modèle simple avec un seul paramètre, accessible en prenant une photo de l'arbre. Des travaux sont en cours avec l'INRA. Ce genre de travaux pourraient être orientés vers des questions comme l'étude de l'adaptation des plantes à l'environnement. Les modifications climatiques peuvent-elles se voir ? Quelques résultats vont dans ce sens, notamment le nombre de plis d'une feuille d'érable dépend de son implantation géographique et du climat.

Enfin, plus récemment, nous développons des modèles de croissance de ville, basés sur un réseau de rues. Le réseau de rues est un élément stable de la ville, il y a une certaine analogie avec le réseau de veines d'une feuille. Nous étudions l'implantation humaine le long de ce réseau.

Besoins mathématiques/ enjeux de modélisation

En modélisation des écoulements granulaires, il y a peut-être quelque chose à faire pour lier les formes des dunes visibles et les données de vents reçues par satellites.

En ce qui concerne les plantes, la morphogenèse et la phyllotaxie, les problèmes mathématiques sont d'ordre géométrique, à fort lien avec l'origami (art du pliage du papier) ou le kirigami (art de la découpe du papier) et avec la géométrie différentielle.

Dans les problèmes d'empaquetage géométrique, on peut citer l'étude de l'ensemble des solutions possibles, des formes possibles, sous la contrainte d'un champ de croissance. Avec un champ de croissance donné, et en partant d'une forme de plante, comment se modifie la plante ? Il y a des exemples de cas encore non compris : la croissance non homogène d'une feuille plate, par exemple.

De manière plus générale, les mathématiques sont utiles pour leur formalisme : poser une problème, trouver quelles sont les contraintes fortes, se fixer un modèle simple.

Problèmes liés à l'interdisciplinarité

Cela vaut le coup de définir ce que l'on veut dire par interdisciplinarité. En général, soit une question est ramenée dans sa thématique, soit un apport technique est fourni à une autre thématique. Il est plus rare et plus dur d'être vraiment entre les deux. C'est notre cas.

Interactions physique-biologie

Avec les plantes, nous interagissons fortement avec des biologistes et des botanistes, par exemple pour leurs connaissances en anatomie. Il a été difficile de leur expliquer l'intérêt de notre travail. En effet, ils se basent surtout sur une compréhension des détails bio-géochimiques et sur l'influence des gènes. En tant que physicien, notre approche et nos objectifs sont différents. Nous voyons la plante comme un système qui se construit à partir de la forme précédente. La dynamique est importante. Et parce que notre travail montre que le changement physiologique a autant d'impact sur la forme des plantes que le patrimoine génétique, les biologistes sont plus intéressés. De plus, ils comprennent qu'il y a de nombreux problèmes de mécanique, du fait de la présence de parois rigides.

Le professeur Arezki Boudaoud est un cas exceptionnel, il s'est fait intégré par les biologistes. Le professeur Mahadevan, à Harvard, connaît très bien la mécanique, et travaille sur des applications à des systèmes biologiques mais ce n'est pas sûr qu'il soit réellement intégré avec des biologistes.

En fait, le vivant utilise les instabilités physiques et le contrôle bio-géochimique pour créer des formes compliquées. Il y a une part de contrôle et une part d'aléa. Les physiciens pensent aux instabilités, les biologistes en terme de contrôle, regrouper les deux est un problème ouvert.

Interactions physique théorique-mathématiques

Malgré une vision abstraite qui nous réunit, le fossé est énorme.

Les mathématiciens aiment les théories élégantes, les objets compliqués : Navier-Stokes en est un. Seulement, dans la plupart des cas, utiliser ces théories dans des cas réalistes n'est pas possible, les équations étant insolubles.

Nous travaillons sur une réalité. Nous construisons des modèles phénoménologiques qui cherchent l'effet principal d'une cause. Nous décrivons une équation de la forme la plus simple, sans chercher à tout représenter, à être précis. Une loi linéaire, ou au plus un exposant d'ordre deux, ce sont les éléments avec lesquels nous travaillons.

Cette simplification peut surprendre, mais un modèle simple a l'avantage de s'appliquer à beaucoup de cas. Et puis, nous nous sommes rendus compte que, dans les études sur la turbulence, les données se multiplient avec les simulations numériques sans que l'on sache forcément quoi en faire. Plus de données, des modèles plus compliqués, tout ça ne permet pas forcément de comprendre. Et même si dans certains cas, nos modèles peuvent être utilisés pour la prédiction (par ex., pour la prédiction de l'avancée des dunes), nous voulons comprendre avant tout. La validation d'un modèle est une mauvaise question. Le but du modèle, c'est ça la bonne question. Ensuite, nous simplifions et nous regardons jusqu'à quel point le modèle est valide. De la même façon, si nos modèles nécessitent trop de calculs, c'est que le problème n'a pas été assez simplifié.

Les problèmes de multi-échelle se réduisent à cette question : étant donné le niveau, l'échelle, que décrit un modèle, comment intégrer les autres échelles ? Nous n'essayons pas de décrire plusieurs niveaux d'échelle, mais de transposer les processus à l'échelle qui nous intéresse.

Dans des thèmes similaires, quelques mots sont irritants pour nous :

- ▶ l'émergence. Cela donne l'impression d'une apparition due à la magie, alors qu'il suffit de décrire les interactions existantes. Dans ces cas précis, les interactions sont plus importantes que les processus individuelles en tant que tels.
- ▶ les systèmes complexes. Notre travail consiste à les simplifier.

Dans nos travaux à l'interface entre de nombreuses disciplines, une partie du travail est de convaincre les collègues de l'intérêt de nos études. Cette compréhension est intuitive et rend difficile la communication. Comment expliquer ce que nous ressentons ? Le cerveau travaille de manière inconsciente, il fonctionne différemment selon les expériences passées. La compréhension se fait donc par expériences. Quelqu'un qui reste dans sa discipline va comprendre moins facilement un problème multi-disciplinaire. Ceci explique peut-être les problèmes de dialogue entre disciplines et les efforts à faire pour créer un lien.

Financement et valorisation

Les étudiants formés dans l'interdisciplinarité ont du mal à se « caser ».

Voici l'histoire d'un étudiant, mi mathématicien, mi physicien. Il est allé chercher une théorie mathématiques pour décrire un problème physique de formation de gaines protectrices autour des gamètes. Les travaux des mathématiciens en géométrie différentielle, sur les problèmes de surface à courbure de Gauss constante, posent les équations comme insolubles. Une approximation a été proposée mais au delà d'un temps court, elle n'est plus valide. L'étudiant a juste enlevé un terme de l'équation pour la rendre soluble. Cela donne une approximation moins bonne mais plus robuste. Cette approche qui mélange les deux conceptions, est difficile à valoriser, il y a un problème de reconnaissance.

Un autre étudiant, dans un laboratoire de mathématiques appliquées, s'est vu dire que son travail était trop appliqué.

Au niveau des financements, c'est pire. Il y a une réelle différence entre le discours de l'ANR et du CNRS et ce qui est fait en pratique. Les commissions interdisciplinaires sont peu nombreuses, et favorisent les personnes déjà reconnues, les sujets déjà traités.

De plus, en temps de crise, les disciplines se replient sur elles-mêmes. Il manque d'une structure qui soutienne la pluridisciplinarité.

Plus spécifiquement, la physique théorique a du mal à trouver sa place. En effet, c'est la prouesse technique qui est valorisée. La science se développe et se complexifie, il est difficile de comprendre, et de juger le travail des autres. Nos modèles très simples sont jugés négativement pour leur simplicité. Il est arrivé qu'un rapporteur nous écrive « soit c'est vrai, et ça a déjà été fait; soit c'est faux ».

Dans un monde où la valeur d'une mesure est proportionnelle au coût qu'elle a coûté, nous avons un problème de visibilité et de lisibilité. Nous ne pensons pas que notre approche est la seule possible, juste qu'il faut de la place pour tout le monde.