

## Développement des Plantes

*Arezki Boudaoud, Professeur ENS Lyon, Laboratoire de Reproduction et Développement des Plantes & Laboratoire Joliot-Curie.*

L'équipe dans laquelle travaille le professeur Arezki Boudaoud est composée de biologistes, quelques physiciens, un mathématicien et un informaticien. Elle a été créée il y a quatre ans et se concentre sur la morphogenèse à l'apex de la tige, plus précisément au sein du méristème apical caulinaire et des primordia de fleur. Leurs activités se regroupent dans quatre thématiques :

- Mécanique de la morphogenèse
- Modélisation de la morphogenèse
- Patrons de croissance florale
- Rétroactions mécaniques

### Enjeux environnementaux

Les plantes sont des organismes plus complexes qu'il n'y paraît. Leur forme et leur comportement sont en effet intrinsèquement liés à l'environnement et aux contraintes extérieures. Les études suivantes ont tout particulièrement des enjeux importants dans le contexte actuel du changement climatique :

- L'influence de l'environnement extérieur :
  - ▶ L'architecture et/ou la forme des organes de la plante se modifient au cours de sa vie. Par exemple, les feuilles des plantes aquatiques hétérophylles (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Hétérophyllie>) n'ont pas la même forme selon si elles sont immergées ou non. Les plantes peuvent être sujettes au phototropisme (capacité des plantes à s'orienter par rapport à la lumière) ou au thigmotropisme (qui répond à une stimulation tactile), comme les arbres exposés au vent qui sont plus rabougris.
  - ▶ La sélection des individus par la dispersion des graines et leur adaptation aux conditions locales au lieu de germination expliquent le déplacement observé des zones de répartition géographique des espèces en France au cours du siècle dernier, sans changement génétique ou épigénétique majeur.
- Mieux comprendre comment et pourquoi sont sélectionnés les individus les plus adaptés :
  - ▶ Ces questions sont fortement liées à la productivité agricole : la sélection variétale a joué sur les architectures et les formes. Il faudra adapter les espèces cultivées aux nouvelles conditions - en particulier au manque d'eau. Un exemple canonique du cheminement inverse est le maïs : issu de la domestication de la téosinte, la sélection a augmenté le rendement en grain en jouant sur sa forme et son architecture mais a perdu sur les ressources en eau nécessaires.

### Besoins mathématiques

Les défis ou besoins mathématiques sont différents selon la thématique. De manière générale, il s'agit de s'intéresser à :

- l'inférence de modèles (ou problèmes inverses) à partir de jeux de données réduits,
- l'hétérogénéité des modèles (discrets et continus),
- la modélisation multi-échelles,
- et la description quantitative des formes : alors que l'architecture est facile à décrire avec des concepts topologiques, il n'y a pas à notre connaissance de formalisme permettant de décrire ou quantifier les formes (voir l'exemple des feuilles sur le site <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/arbres/i-feuilles.htm>)

L'inférence de modèle, ou l'estimation de paramètres, est une activité essentielle des modélisateurs. Les images - l'observation - sont déjà un outil très utilisé mais les biologistes évoluent vers plus de quantification. Les besoins en développement de méthodes d'analyse d'images sont importants, notamment pour pouvoir formaliser des quantités d'intérêt, telles que les propriétés de mécanique des plantes, pour comprendre les processus de formation d'organes ou pour identifier les territoires cellulaires reliés à la régulation génétique du développement ou du fonctionnement.

Cela nécessite beaucoup de méthodes statistiques telles que des méthodes d'analyse spatio-temporelle de clustering de cellules à partir de données morphologiques (forme, croissance, proximité topologique) mais aussi des méthodes d'optimisation. Dans tous les cas, les besoins de formalisation sont importants. Nous avons, par exemple besoin d'identifier des paramètres intervenant à des échelles non observées.

Analyser les données et construire un modèle sont deux étapes non indépendantes. Les modèles peuvent permettre de comprendre les phénomènes observés, les observations valident les modèles. C'est pourquoi modéliser la morphogenèse est aussi un enjeu majeur de notre équipe. Des modèles visco-élastico-plastiques sont utilisés, qui prennent en compte les changements de volumes. En effet, la pression interne des cellules agit comme un champ de force sur les parois « rigides » et provoquent un étirement des cellules. Avec ces méthodes, nous pouvons mieux comprendre la croissance d'une cellule de levure. De nombreuses questions sont encore sans réponses, par exemple, pourquoi les feuilles sont-elles planes ? Il nous manque des connaissances sur les mécanismes de régulation pour pouvoir construire un modèle. Cependant, les EDPs utilisées sont déjà très complexes, les lois constitutives ne sont pas encore très claires et le comportement visco-élasto-plastique couplé à des problèmes de géométrie euclidienne n'est pas encore étudié mathématiquement. De plus, le passage à l'échelle du tissu, c'est à dire à un ensemble de cellules, reste un problème ouvert.

Dans les différents modèles mis en place, le passage au continu reste à faire, avec pour perspective la modélisation à l'échelle de la forêt. Mais cela pose des questions d'homogénéisation, de passage d'un modèle de l'échelle cellulaire à un modèle continu auxquelles les mathématiciens pourraient apporter leur aide.

### **Liens avec les mathématiciens et travail pluridisciplinaire**

Nous travaillons avec Christophe Godin de l'équipe Virtual Plants de l'INRIA-Cirad-INRA, à Montpellier, sur les aspects architecturaux des plantes. Un début de collaboration a été engagé avec Vincent Calvez. Ce sont les seuls contacts pour l'instant.

Ce genre de thématique n'est en fait pas beaucoup développé non plus à l'étranger.

L'ENS est assez aventureux et héberge le laboratoire Joliot-Curie, hôtel à projet pluridisciplinaire tourné vers les sciences du vivant. L'équipe, dans laquelle je travaille, s'est montée, il y a quatre ans, parce que les biologistes ont voulu recruter un non-biologiste pour travailler sur le développement des plantes. Avant le recrutement, j'avais déjà six ans de discussions et de collaborations avec des biologistes. Je suis le seul permanent physicien. C'était un choix audacieux car j'ai dû m'imposer dans un environnement différent, je n'étais pas biologiste et je devais enseigner en biologie. Je suis maintenant en charge des cours en modélisation pour biologistes, et d'un cours en physique tourné vers la biophysique. Je publie encore un peu en physique sur les sujets de recherche plus anciens mais la majorité de mes publications se font dans des revues de biologie.

Il est difficile d'avoir un recul sur le recrutement des étudiants qui sont passés par l'équipe. Une stratégie que nous employons est de faire en sorte que l'étudiant reste le plus possible dans le département d'origine, les gens un peu trop interdisciplinaires sont difficiles à évaluer.

À l'étranger, notamment dans les pays anglo-saxons, plusieurs affiliations « doubles » existent. Comment savoir si c'est une meilleure solution ? Dans tous les cas, pour un travail approfondi dans des thématiques pluridisciplinaires, il faut mettre les différents acteurs ensemble physiquement et être patients.