

# La signalisation chez les végétaux revue et corrigée

## INTRODUCTION

Arnould Savouré

Laboratoire « Physiologie Cellulaire et Moléculaire des Plantes », UR5 EAC7180 CNRS, Case 156, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

Auteur correspondant : Arnould Savouré, [arnould.savoure@upmc.fr](mailto:arnould.savoure@upmc.fr)

Reçu le 24 septembre 2009

À la différence des animaux, les plantes sont des organismes fixés, donc soumis à l'action directe et immédiate de leur environnement. Pour pouvoir se développer, se multiplier, faire face à la présence de prédateurs ou de conditions environnementales défavorables, les plantes ont développé des systèmes de perception des modifications de leur environnement qui reposent sur des communications inter- et intracellulaires particulièrement efficaces. La perception et l'intégration de ces stimuli environnementaux qui peuvent être de natures physico-chimique (choc osmotique, froid, stimuli mécaniques...) et/ou biotique, souvent de très faibles intensités, induisent l'activation de voies de signalisation pour la mise en place d'un programme morphogénétique aboutissant au franchissement d'une étape de leur cycle de développement ou à la mise en place d'une adaptation. C'est ainsi que les plantes ont la capacité d'exprimer différents phénotypes en réponse à des contraintes biotiques et abiotiques, propriété remarquable appelée plasticité phénotypique.

La signalisation cellulaire est essentielle pour comprendre la plupart des aspects de la biologie cellulaire et du développement. Malgré les grandes avancées scientifiques de ces dernières années, la compréhension des voies de signalisation chez les êtres vivants, et plus particulièrement chez les plantes, est loin d'être complète. Chez ces dernières, des découvertes remarquables ont été obtenues à propos de l'identification de nouveaux facteurs endogènes (hormones, peptides...) et de systèmes de perception de facteurs externes ou internes, grâce à l'utilisation de plantes modèles combinée à des approches génétique, biochimique et de biologie cellulaire.

Les revues présentées dans ce numéro de « *Biologie Aujourd'hui* » relatif à la séance explorent les connais-

sances acquises très récemment chez les plantes sur l'identification d'une nouvelle famille d'hormones et la présentation de voies de signalisation qui leur sont spécifiques. Quatre exemples seront développés sur la signalisation intra- et intercellulaire dans les contextes physiologiques les plus pertinents. Je tiens à remercier les auteurs pour leur excellente contribution à cette séance.

La sécheresse et la salinité sont les contraintes environnementales affectant sévèrement le développement et la productivité des plantes. Avec le réchauffement climatique, ces contraintes seront de plus en plus critiques pour les plantes, en particulier dans les régions tempérées. Depuis une dizaine d'années, de nombreux travaux ont porté sur l'identification des voies de signalisation impliquées dans la perception de ces contraintes.

Le calcium joue un rôle clé dans la transduction de signaux environnementaux chez les plantes. M. Boudsocq révèle que les plantes ont développé et multiplié les senseurs calciques. Plus de 250 de ces senseurs ont en effet été dénombrés chez la plante modèle *Arabidopsis*. En plus des senseurs calciques sans activité enzymatique, dont le prototype de cette famille ubiquitaire est la calmoduline, il existe une famille de protéines kinases spécifique des plantes, dont l'activité est dépendante du calcium et indépendante de la calmoduline. Ces protéines, dénommées *calcium-dependent protein kinases* possèdent trois domaines : un domaine calmoduline régulateur, un domaine auto-inhibiteur et un domaine kinase. Ces senseurs calciques sont particulièrement importants dans la transduction de signaux hydriques.

La transduction de signaux extra- et intracellulaires met souvent en jeu différentes formes de phospholipides. Ces molécules ne sont pas uniquement des

composants structuraux de la membrane plasmique mais également des seconds messagers. Comme le présentent A.S. Leprince et A. Savouré, leur implication dans les voies de signalisation, et notamment dans les réponses aux contraintes hydriques, est de mieux en mieux documentée. Là encore, les plantes ont su développer des voies de signalisation lipidiques particulièrement originales par rapport à celles caractérisées chez les animaux. Par exemple, il est maintenant démontré que les seconds messagers produits par l'action des phospholipases C à la suite de l'hydrolyse du phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate, tels que l'inositol 1,4,5-trisphosphate et le diacylglycérol, n'ont pas le rôle de second messager décrit chez les animaux. Chez les animaux, l'IP<sub>3</sub> active un récepteur IP<sub>3</sub>-dépendant qui permet une sortie de Ca<sup>2+</sup> des organites qui le stockent, comme le réticulum endoplasmique. Chez les végétaux, ce récepteur ne semble pas présent. En revanche, l'IP<sub>6</sub>, forme hexaphosphorylée de l'IP<sub>3</sub>, semble être impliquée dans la sortie du calcium des organites. D'autre part, la famille des phospholipases D, dont les enzymes sont impliquées dans l'hydrolyse des glycérophospholipides, apparaît beaucoup plus complexe chez les plantes que chez les mammifères. Ces phospholipases D sont des régulateurs positifs mais également négatifs de réponses adaptatives liées à des signaux environnementaux.

La mise en place de la fécondation croisée a constitué une étape clé dans l'évolution des plantes à fleurs, contribuant au brassage génétique. La fécondation croisée est favorisée ou même rendue obligatoire du fait de l'existence de systèmes d'incompatibilité génétique. L'auto-incompatibilité constitue un système de reconnaissance cellulaire original puisqu'il fonctionne, à l'opposé du système immunitaire des vertébrés, pour rejeter le soi et accepter le non-soi. Les mécanismes moléculaires liés à l'auto-incompatibilité commencent à être mieux

compris au niveau moléculaire grâce à l'utilisation d'un système d'auto-incompatibilité sporophytique, modèle présent chez les Brassicacées. Thierry Gaude nous montre que les acteurs impliqués dans le rejet de l'autopollen par le pistil reposent sur une interaction de type ligand-récepteur qui n'est pas sans rappeler le mode de perception des hormones peptidiques par les cellules animales *via* des récepteurs kinase membranaires.

Les hormones, et plus particulièrement la signalisation hormonale, sont toujours un domaine de recherche particulièrement dynamique. Depuis la découverte de l'auxine en 1934, sept autres familles d'hormones ont été identifiées chez les plantes. Ce n'est que très récemment que des avancées spectaculaires ont été faites avec la découverte de la plupart des récepteurs de ces hormones. Mais de nombreuses découvertes restent à faire, comme le montrent C. Rameau *et al.* avec la mise en évidence d'une nouvelle famille d'hormones, les strigolactones, impliquées dans le contrôle de la ramification. La ramification joue un rôle essentiel pour le développement et la fructification de la plante mais aussi pour la valeur agronomique de la plupart des plantes cultivées. Cette revue résume les plus récentes découvertes sur cette nouvelle famille d'hormones et leur mode d'action.

Ce tour d'horizon de la signalisation chez les végétaux donne un aperçu de la diversité des mécanismes de perception et de transduction de signaux environnementaux et endogènes présents chez les végétaux. Le développement de travaux coordonnés sur les systèmes animaux et végétaux ne pourra que faire fructifier nos connaissances sur ces voies de signalisation essentielles au développement harmonieux des êtres vivants et contribuera à l'ouverture de perspectives intéressantes, tant d'un point de vue appliqué que fondamental.