



DÉTERMINATION DE LA FORME CELLULAIRE : ÉVOLUTION CONVERGENTE DE LA PAROI CHEZ LES BACTÉRIES, CHAMPIGNONS ET PLANTES

14 h 30 Ouverture

Jean-François BACH, *Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences*,

Jean-François MOROT-GAUDRY, *Ancien Président de l'Académie d'agriculture de France*

14 h 50 Introduction

Michel CABOCHE, *Membre de l'Académie des sciences*

15 h 00 **Arezki Boudaoud (ENS, Lyon) : Une vision mécanique de la morphogénèse**

- Mirabet, V., Das, P., Boudaoud, A., and Hamant, O. (2011). The role mechanical forces in plant morphogenesis. *Annu Rev Plant Biol* 62, : 385.
- Corson, F., Hamant, O., Bohn, S., Traas, J., Boudaoud, A., and Coude (2009). Turning a plant tissue into a living cell froth through isotropi growth. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106, 8453-8458.

15h 40 **Rut Carballido-Lopez (INRA, Jouy en Josas) : Détermination de la forme chez les bactéries.**

- Dominguez-Escobar, J., Chastanet, A., Crevenna, A.H., Fromion, V., Wedlich-Soldner, R., and Carballido-Lopez, R. (2011). Processive mo of MreB-associated cell wall biosynthetic complexes in bacteria. *Sci* 333, 225-228.
- Carballido-Lopez, R., and Formstone, A. (2007). Shape determinatio *Bacillus subtilis*. *Curr Opin Microbiol* 10, 611-616.

16 h 20 **Jean-Paul Latge (Institut Pasteur, Paris) : Synthèse et remodelage de la paroi chez les champignons**

- Hurtado-Guerrero, R., Schuttelkopf, A.W., Mouyna, I., Ibrahim, A.F., Shepherd, S., Fontaine, T., Latge, J.P., and van Aalten, D.M. (2009). Molecular mechanisms of yeast cell wall glucan remodeling. *J Biol C*

284, 8461-8469.

- Latge, J.P. (2007). The cell wall: a carbohydrate armour for the fungus. *Mol Microbiol* 66, 279-290.

17 h 00 **Herman Höfte (INRA, Versailles) : Synthèse et remodelage de la paroi chez les plantes**

- Wolf, S., Hematy, K., and Hofte, H. (2012). Growth control and cell wall signaling in plants. *Ann Rev Plant Biol* 63, in press.
- Crowell, E.F., Bischoff, V., Desprez, T., Rolland, A., Stierhof, Y.D., Schumacher, K., Gonneau, M., Hofte, H., and Vernhettes, S. (2009). The organization of Golgi bodies on microtubules regulates secretion of cellulose synthase complexes in Arabidopsis. *Plant Cell* 21, 1141-1154.

17h 40 **Conclusion et perspectives**

Jean-François MOROT-GAUDRY, Ancien *Président de l'Académie d'agriculture de France*

17 h 50 **Clôture**

Jean-François BACH, *Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences*,

Préambule :

Les cellules des bactéries, champignons et plantes partagent la présence d'une matrice extracellulaire épaisse et rigide : la paroi. Cette paroi constitue un élément du squelette hydrostatique et protège la cellule dans des environnements fluctuants, tout en permettant la croissance et la prolifération de celle-ci. Malgré une composition chimique totalement différente, l'architecture des parois a convergé dans ces trois règnes vers un matériau composite constitué de fibres enchâssées dans une matrice de polysaccharides et de protéines. Dans les trois cas, la machinerie cellulaire a évolué permettant le dépôt, orienté ou pas, des polymères ainsi que leur remodelage au cours de la croissance cellulaire.

Cette session devrait nouer un dialogue entre les chercheurs qui, appartenant à des communautés scientifiques distinctes, travaillent sur ces différents systèmes. Enfin, la vision d'un physicien-mécanicien, permettra d'illustrer les principes organisationnels communs pour les parois dans ces trois règnes.

PRÉSENTATION

par Jean-François **Morot-Gaudry**¹

“Les parois ”, séance organisée par M. **Caboche** et H. **Höfte** et J.F. **Morot-Gaudry**, se tient dans le cadre d’une séance inter-académique, à l’Académie des Sciences. La séance porte sur « les relations entre expression des gènes et propriétés mécaniques des parois : comparaison des parois végétales, bactériennes ou de champignon ». Les cellules végétales, les champignons, les bactéries (et certaines algues) possèdent en effet une paroi, matrice extracellulaire épaisse, rigide et protectrice, sorte d’exosquelette qui détermine et maintient leur forme, contenant la pression osmotique interne tout en autorisant les échanges intercellulaires, la croissance et la division cellulaire.

La paroi est un assemblage biologique complexe de polysaccharides et de protéines : essentiellement peptidoglycanes chez les bactéries, chitine et glucanes chez les champignons, cellulose, hemicellulose, pectines et lignines chez les plantes. Si la biosynthèse de ces macromolécules est régie par l’expression de gènes codant les enzymes nécessaires à leur élaboration, l’organisation des macromolécules en édifice pariétal résulte de mécanismes d’auto-assemblage qui dépendent de la structure chimique fine des macromolécules et de la nature de l’environnement physico-chimique (pH, ions). Ce mécanisme est étroitement régulé au cours du développement.

Malgré une composition chimique totalement différente et des formes très variées, dans les trois règnes sous l’effet de contraintes physiques et mécaniques, l’architecture des parois a convergé vers un matériau composite renforcé de fibres inclus dans une matrice. Dans les trois cas, la machinerie cellulaire a évolué permettant le dépôt orienté des polymères, régulièrement remaniés au cours de la croissance cellulaire, et dont les caractéristiques mécaniques influent sur les patrons de développement. La structure pariétale n’est donc absolument pas figée mais est en perpétuelle évolution.

Chez les bactéries, ces réarrangements pariétaux jouent un rôle essentiel dans les interactions avec les autres organismes ; la paroi est par exemple la cible des antibiotiques. Chez les champignons, les protéines de la paroi participent à la réponse de l’hôte à l’infection et aux relations de symbiose (fixation symbiotique de l’azote par exemple). Chez les plantes, la paroi conditionne la croissance et le développement des plantes et représente 60% de la biomasse végétale, un enjeu économique considérable (biofuels et produits de la chimie verte : papier, fibres de tissage, biopolymères, etc.). La maîtrise de cette variabilité est essentielle pour améliorer la qualité des productions végétales.

Le message de la session pourrait être « comment différents organismes ont trouvé des solutions variées pour résoudre un même problème: construire une paroi à la fois rigide et extensible qui les modèle sous l’influence des contraintes physiques et mécaniques, permettant cependant leur croissance et développement, tout en assurant leur intégrité et leur protection au cours des changements environnementaux ».

¹ Président de l’Académie d’Agriculture de France pour l’année 2011, directeur de recherche honoraire de l’INRA, laboratoire de la Nutrition Azotée des Plantes, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles.

UNE VISION MÉCANIQUE DE LA MORPHOGENÈSE.

par Arezki **Boudaoud**¹

La forme des bactéries, des champignons ou des plantes est essentiellement déterminée par les parois cellulaires, qui jouent le rôle d'un exosquelette. A l'occasion de cet exposé, nous examinerons la mise en place des formes cellulaires, en nous intéressant aux contraintes physiques et mécaniques auxquelles sont soumises les parois. D'une part, le rôle protectif de la paroi a pour corollaire qu'elle freine la croissance de la cellule. Il n'est donc pas surprenant que la pression osmotique interne à la cellule puisse atteindre la dizaine de bars. Nous donnerons une revue des derniers développements dans la mesure de ces propriétés mécaniques — rigidité de la paroi et pression interne — et nous dégagerons des tendances dans les variations de ces propriétés entre espèces, en relation avec la géométrie cellulaire. D'autre part, un ballon gonflé adopte généralement une forme sphérique, alors que les cellules à parois sont souvent de forme cylindrique. Nous discuterons les deux mécanismes principaux permettant la morphogenèse de cellules allongées : croissance apicale et croissance diffuse anisotrope.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) MIRABEL V., DAS P., BOUDAOU D. A. and HAMANT O., 2011. – The role of mechanical forces in plant morphogenesis. *Annu Rev Plant Biol.* **62**, 365-385.
- (2) CORSON F., HAMANT O., BOHN S., TRAAS J., BOUDAOU D. A., and COUDER Y., 2009. – Turning a plant tissue into a living cell froth through isotropic growth. *Proc Natl Acad Sci U S A*, **106**, 8453-8458.

SYNTHÈSE DE LA PAROI CHEZ LES BACTÉRIES NON-SPHÉRIQUES.

par Rut **Carballido-Lopez**²

Le monde bactérien présente une diversité de formes généralement insoupçonnée. Loin d'être limitées aux bâtonnets, sphères et autres ovoïdes couramment présentés, les cellules peuvent adopter des formes de carrés, d'étoiles, de citrons, d'hélices ou encore de haricots. Chez la plupart des bactéries, la morphologie cellulaire est maintenue grâce à la paroi, structure rigide extérieure à la membrane cytoplasmique. Cette paroi est formée majoritairement du polymère peptidoglycane, lequel confère une résistance suffisante pour maintenir la forme et contenir la pression osmotique interne tout en autorisant croissance et division cellulaires. Cette barrière protectrice est également une des principales cibles des antibiotiques. Le contrôle de la composition et de la structure du peptidoglycane est donc un élément crucial afin de maintenir la forme, mais également de permettre des adaptations comme lors de la multiplication cellulaire ou la formation de cellules spécialisées (e.g. spores).

De nombreux éléments de la machinerie de synthèse de la paroi bactérienne sont désormais connus mais leur contrôle reste largement inconnu. Sont particulièrement étudiées les protéines dites cytosquelettiques (actine, tubuline et filaments intermédiaires). Récemment identifiées chez les bactéries,

¹ ENS Lyon

² MICALIS, INRA, Jouy en Josas

certaines d'entre elles se sont révélées jouer un rôle critique dans l'acquisition de la forme de la paroi. L'exemple le plus documenté est celui des protéines de la famille MreB, analogues structuraux de l'actine eucaryote. Ces protéines, présentes chez les bactéries non-sphériques, s'associent directement aux machineries de synthèse de la paroi latérale pour contrôler leur mouvement, critique pour une élongation tubulaire contrôlée de la cellule. Un autre exemple est celui de la crescentine - homologue des filaments intermédiaires eucaryotes, qui force les cellules de l'espèce *Caulobacter crescentus* à adopter une forme courbée. La crescentine s'assemble de façon stable dans un filament sur un seul coté de la cellule. Le modèle actuel suppose que la résistance intrinsèque de ce filament réduirait le stress physique sur la paroi directement adjacente. Ceci réduirait l'insertion de nouveau matériel localement, entraînant une croissance différentielle sur les deux cotés de la cellule et *in fine* une courbure de *C. crescentus*.

Ces deux exemples illustrent comment les protéines cytosquelettiques modèlent, via leur control des machineries de synthèses de la paroi, la forme des cellules bactériennes. D'autres mécanismes, impliquant par exemple la présence de flagelles seront également abordés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) DOMINGUEZ-ESCOBAR J., CHASTANET A., CREVENNA A.H., FROMION V., WEDLICH-SOLDNER R., and CARBALLIDO-LOPEZ R., 2011. – Processive movement of MreB-associated cell wall biosynthetic complexes in bacteria. *Science*, **333**, 225-228.
- (2) CARBALLIDO-LOPEZ R., and FORMSTONE A., 2007. – Shape determination in *Bacillus subtilis*. *Curr Opin Microbiol.*, **10**, 611-616.

LA PAROI DES CHAMPIGNONS EST UN ORGANELLE VIVANT

par Jean-Paul **Latgé**³

Une des caractéristiques majeures de tous les champignons est la présence d'une paroi qui entoure la cellule fongique et la protège des agressions de son environnement. Cette paroi est essentielle à la survie du champignon. La paroi est constituée d'un réseau tridimensionnel de polysaccharides décorant un cœur central structural composé de 1, 3 glucanes et de chitine. Une matrice extracellulaire entoure le plus souvent la paroi cellulaire et les polysaccharides constitutifs de cette matrice jouent un rôle important dans la réponse de l'hôte à l'infection. Les récents progrès dans la connaissance des complexes enzymatiques (synthases, hydrolases et transglycosidases) responsables de la biosynthèse de la paroi fongique seront présentés au cours de cette conférence. □ Longtemps considérée comme un squelette inerte, les études récentes que je retracerai à l'aide d'exemples pris dans l'étude du champignon pathogène opportuniste *Aspergillus fumigatus* montrent que (i) la structure pariétale n'est absolument pas figée mais est au contraire en perpétuelle évolution en fonction de l'environnement auquel est soumis le champignon et que (ii) ces réarrangements jouent un rôle essentiel dans les interactions champignon-hôte.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Hurtado-Guerrero, R., Schuttelkopf, A.W., Mouyna, I., Ibrahim, A.F., Shepherd, S., Fontaine, T., Latgé, J.P., and van Aalten, D.M. (2009). Molecular mechanisms of yeast cell wall glucan remodeling. *J Biol Chem* **284**, 8461-8469.
- (2) Latgé, J.P. (2007). The cell wall: a carbohydrate armour for the fungal cell. *Mol Microbiol* **66**, 279-290.

³ Unité des *Aspergillus*, Institut Pasteur, Paris

SYNTHESE ET REMODELAGE DE LA PAROI CHEZ LES PLANTES

par Herman **Höfte**¹

Les parois végétales montrent une très grande variabilité dans leur composition chez différents espèces, types cellulaires et même, au sein de la même cellule, dans différents domaines de la paroi. Malgré cette grande diversité, toutes les parois ont un plan de construction similaire : des microfibrilles de cellulose, rigides et résistantes à la traction qui sont enrobées d'une matrice d'hémicelluloses et/ou pectines, de protéines structurales et, dans certains types cellulaires, de polymères de composants phénoliques, les lignines. L'orientation des microfibrilles crée une anisotropie mécanique dans la paroi et contrôle la direction de la croissance cellulaire. Les polysaccharides de la matrice sont constamment modifiés au cours de la croissance, par l'action d'enzymes pariétales qui contrôlent les propriétés rhéologiques de la paroi et par conséquent la vitesse de croissance de la cellule. Dans cet exposé je discuterai d'abord le contrôle du dépôt orienté des microfibrilles et son impact sur l'anisotropie de la croissance, puis je présenterai les connaissances actuelles sur la régulation de l'extensibilité et de l'intégrité de la paroi au cours de la croissance de la plante.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) WOLF S., HEMATY K., and HOFTE H., 2012. – Growth control and cell wall signaling in plants. *Ann Rev Plant Biol.*, **63**, in press.
- (2) CROWELL E.F., BISCHOFF V., DESPREZ T., ROLLAND A., STIERHOF Y.D., SCHUMACHER K., GONNEAU M., HOFTE H. and VERNHETTES S., 2009. – Pausing of Golgi bodies on microtubules regulates secretion of cellulose synthase complexes in Arabidopsis. *Plant Cell*, **21**, 1141-1154.

¹ IJPB, INRA Versailles