

MÉCANISMES DU TRANSFERT SOL-PLANTE ET DE L'ACCUMULATION DES MÉTAUX POUR L'OPTIMISATION DE LA PHYTORÉMÉDIATION.

CONCLUSION

par Jean-François **Morot-Gaudry**¹

Le problème des métaux est généralement abordé au niveau du sol et plus rarement au niveau de la plante. Cette fois nous avons fait exception. M. Lebrun et P. Hinsinger nous ont présenté de façon magistrale et rigoureuse les mécanismes du transfert sol-plante et l'accumulation des métaux pour l'optimisation de la phytoremédiation.

La présence de métaux dans les sols et les végétaux pose des problèmes d'alimentation (carences des plantes de culture en fer et zinc par exemple ou métaux sous forme non disponible pour l'alimentation humaine), de sécurité alimentaire (risque d'accumulation de métaux lourds dans les produits végétaux destinés à l'alimentation humaine) et de pollution. Pour nettoyer et réhabiliter des terrains pollués par des métaux lourds, il a été proposé d'utiliser ou de générer des plantes hyper-accumulatrices des métaux toxiques susceptibles de décontaminer les sols pollués suivant un procédé appelé phytoremédiation. C'est ce dernier aspect qui a été essentiellement traité au cours de cet exposé.

M. Lebrun a démontré à travers quelques exemples que les connaissances fondamentales sur l'acquisition, le transport et le stockage des métaux dans les plantes modèles sont absolument incontournables pour optimiser la phytoremédiation. P. Hinsinger a expliqué que la compréhension et la modélisation des mécanismes de transfert de métaux entre le sol et les plantes, dans ce compartiment biologique complexe qu'est la rhizosphère, sont des enjeux importants de connaissance nécessaires pour l'amélioration des capacités de bio-remédiation. Il est indispensable également de pouvoir déterminer les modes de prélèvement des racines, leur capacité à explorer le sol et à modifier la rhizosphère (modifications de pH et exsudation de composés capables de complexer les métaux). De nombreuses autres questions restent en suspens. Quels sont les effets des métaux toxiques sur la physiologie et le développement des plantes. Comment un élément toxique atteint-il sa cible moléculaire ? Pourquoi les cellules d'un organe cible sont-elles plus exposées ou plus sensibles que celles d'autres organes ? Deux aspects importants peuvent retenir notre attention ; la connaissance des multiples formes physicochimiques (spéciation) des métaux et celle de l'homéostasie métallique chez les plantes.

La détermination de la forme chimique sous laquelle le métal est actif ou inactif est un aspect important qui doit être pris en compte. **La spéciation** est la distribution d'un élément sous les

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture, directeur de recherches à l'INRA, directeur du Laboratoire du Métabolisme et de la Nutrition des Plantes, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles. morot@versailles.inra.fr
C.R. Acad. Agric. Fr., 2003, 89, n°3. Séance du 15 octobre 2003.

différentes espèces chimiques susceptibles d'être présente en solution (ions libre ou espèces complexes formées avec des ligands inorganiques ou organiques). Par extension, on parle de spéciation dans le sol (sous-entendu en phase solide) pour décrire les différentes formes sous lesquelles un métal peut être retenu par les divers constituants du sol (argiles, oxydes métalliques, matières organiques, etc.). De même, on qualifie de spéciation dans le végétal la distribution d'un métal sous les différentes formes possibles (complexe, précipité, etc.) et compartiments de rétention (apoplasme, cytosol, vacuole des cellules racinaires ou foliaires, etc.). Un ensemble d'approches analytiques (spectroscopie d'absorption de rayons-X, microanalyse par faisceau d'ions, microscopie, tomographie, chromatographie, spectrométrie de masse, etc.) visant la détection et la caractérisation structurale des différentes espèces chimiques des éléments *in situ*, i.e. la spéciation, est actuellement développé, mais les verrous méthodologiques restent nombreux. L'information sur la spéciation est cependant essentielle pour comprendre au niveau moléculaire les interactions spécifiques de l'élément d'intérêt lors des processus d'absorption, de transport et d'accumulation dans la cellule et la plante. Ainsi, sur le plan biologique la toxicité éventuelle d'un élément ne peut être comprise que par la caractérisation des entités moléculaires (protéines réceptrices, chélatantes, transporteurs) impliquées dans le métabolisme. Dans l'environnement la spéciation est également très importante pour définir la toxicité. La spéciation dans les milieux biologiques et environnementaux est un challenge ambitieux qui implique de nombreuses équipes de recherche nationales et internationales pouvant répondre à des problèmes de plus en plus complexes sur l'impact des métaux toxiques en faisant appel aux techniques d'analyse les plus sophistiquées. Le développement récent de plate-formes multilaboratoires en chimie analytique va permettre de développer des microtechniques analytiques pour identifier à l'état de trace les métaux au sein des échantillons biologiques et de sol (techniques à nano-débit, électrophorèse et électrochromatographie capillaires). Les progrès récents en matières de résolution spatiale de techniques spectroscopiques telles que micro-SXRF, micro-EXAFS et micro-XANES (de rayonnement X synchrotron) ou des sondes ioniques (nano-SIMS) ouvrent des perspectives complémentaires.

La compréhension des mécanismes permettant le maintien de **l'homéostasie métallique** chez les cellules végétales est également un passage absolument indispensable pour sélectionner ou générer des plantes de culture permettant de tolérer et de décontaminer des sols pollués par les métaux, d'exclure les métaux toxiques des produits végétaux destinés à l'alimentation et de soutenir les besoins en micro-éléments métalliques essentiels à notre développement. Les travaux menés sur les transporteurs de métaux (famille NRAMP par exemple) ont montré que l'étude de la toxicité des métaux lourds (cadmium) et l'étude des carences (fer) sont deux facettes d'un même problème (travaux de S. Thomine, CNRS-Gif sur Yvette, communication personnelle). Des programmes de recherche utilisant les approches globales de la génomique fonctionnelle, transcriptome et protéome, sont mis en place chez *Arabidopsis*. Ces projets permettront de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans les réponses des plantes à un stress par les métaux lourds ou à la carence en un métal donné. Elles rendront possible également l'identification des gènes importants pour générer ou sélectionner des plantes ayant un contenu en micro-éléments amélioré ou à l'inverse capables d'accumuler et tolérer de fortes concentrations en métaux toxiques.

La bioremédiation est une technologie intéressante, biologique, qui devrait être acceptée par le citoyen. Toutefois, les problèmes de faisabilité, de mise en œuvre, de coût, sont à étudier et à comparer aux « techniques industrielles » de type nettoyage mécanique, plus lourdes mais parfois plus efficaces. A ce titre, les perspectives offertes par les techniques de phytostabilisation semblent plus prometteuses que celles permises par la phytoextraction, qui requièrent dans bien des cas des durées incompatibles avec la gestion de la contamination. Les problèmes de remise en état de grands territoires contaminés, de friches industrielles et d'élimination à petite échelle de déchets urbains, demandent des solutions différentes et adaptées. La bioremédiation peut-être considérée comme une approche d'avenir pour extraire les métaux indésirables et réhabiliter ainsi les sols

contaminés par des éléments toxiques. Cependant, elle devra compter pour être efficace sur les progrès qui seront réalisés dans les domaines de la biologie moléculaire, de la génétique, de la physico-chimie et de l'environnement, prenant en compte tous les niveaux d'intégration, de l'atome au peuplement.