

# Transfert sol-plante d'éléments chimiques et/ou radioactifs

Claire Sahut, Valérie Chaignon et Catherine Santucci

**Résumé** Les transferts vers les plantes d'éléments présents dans les sols dépendent d'un très grand nombre de paramètres. Nous présentons des résultats obtenus par autoradiographie, technique qui fournit une connaissance qualitative de la répartition dans la plante des éléments transférés et est donc utile pour approcher les mécanismes biochimiques du transfert. De plus, elle permet de suivre le transfert en fonction des divers paramètres externes, ce qui ouvre la voie vers sa modélisation. L'organisation de ces recherches au plan national est rappelée, ainsi que son objectif de base qui est de contrôler la pollution des sols par les activités humaines ; la sûreté nucléaire s'inscrit bien dans ces objectifs généraux.

**Mots-clés** Transferts d'éléments, sols, contamination, phytotoxicité.

**Abstract** **Soil plant transfer of chemically or radiologically toxic elements**  
The transfer of elements from soils to plants depends on a large number of parameters. We present results obtained by the technique of autoradiography, which yields a qualitative description of where the transferred elements are located in the plant, a route to the understanding of mechanisms. This technique also provides a mean of following the transfer as a function of external parameters, which is a prerequisite to modelling. The organisation of the research in this field in France is recalled as well as its primary objective of monitoring the pollution of soils by human activity; nuclear safety is thus clearly among the objectives.

**Keywords** Transfer, soils, pollution, phytotoxicity.

Les activités humaines contribuent à multiplier les transferts et à générer une accumulation croissante de divers contaminants dans les eaux et les sols. Ces accumulations peuvent avoir des effets délétères pour l'environnement et la santé humaine : pour l'environnement, par des effets toxiques limitant le développement de communautés animales, de micro-organismes ou végétales ; pour la santé, par les transferts potentiels de ces composés dans la chaîne alimentaire et *in fine* leur accumulation dans l'alimentation humaine. L'acceptation sociale des activités industrielles nécessite alors d'évaluer les risques sur la santé et sur l'environnement. Dans le cadre des activités nucléaires, et quelle que soit l'origine des radioéléments (pollution accidentelle ou rejet diffus), l'évaluation du risque implique de déterminer leur migration depuis le point de contamination jusqu'à leur transfert à l'Homme par des voies directes et/ou indirectes, et pour des impacts à court et moyen terme. Une des voies d'entrée potentielle dans la chaîne alimentaire est le transfert dans les plantes. Le radio-césium et le radiostrontium sont, par exemple, des radioéléments dangereux pour l'environnement car ils sont chimiquement très similaires aux éléments nutritifs que les plantes vont puiser dans le sol, respectivement le potassium et le calcium. La limitation de la quantité de polluants dans les sols et de leur transfert dans la matière organique végétale représente donc un enjeu majeur de prévention pour l'environnement et la santé. La méthodologie présentée dans ce document est développée pour les activités nucléaires, mais elle est de plus en plus appliquée à d'autres activités industrielles mettant en jeu des métaux toxiques par exemple.

## Comportement des éléments dans les sols : des phénomènes variés et complexes

La technique de l'autoradiographie permet la visualisation rapide des contaminants transférés dans les différentes parties d'une plante s'étant développée sur un sol pollué. La *figure 1* représente un plan de moutarde cultivé en

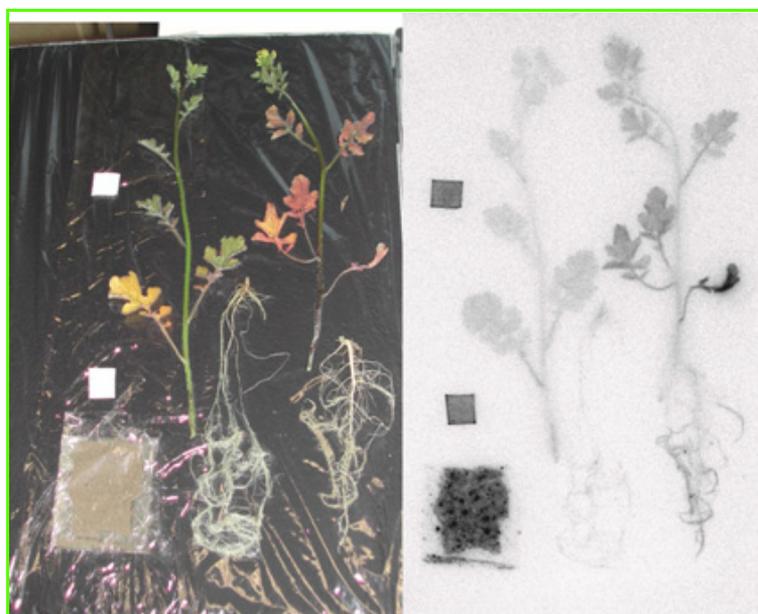


Figure 1 - Autoradiographie d'un plan de moutarde montrant le transfert du césium dans la plante après sa culture sur sol contaminé.

laboratoire, dans une enceinte contrôlée, sur un sol contenant du césium (en collaboration avec DSV/LEMIR). Après quelques jours de culture (plante de gauche), la photo montre bien un transfert du polluant dans la plante, transfert encore plus important après quelques semaines (plante de droite). Mais l'évaluation précise de l'exposition aux polluants suppose la connaissance des flux de polluants réellement transférés du sol aux racines (acquisition), puis des racines aux différents organes consommés (translocation).

Outre les caractéristiques relatives à la contamination proprement dite, de nombreux paramètres vont influencer le transfert des polluants dans les horizons de surface ou subsurface : la nature du site (industriel, urbain, agricole), la variation du climat et l'activité des organismes vivants du sol. Les micro-organismes du sol jouent un rôle important sur les transferts, non seulement à cause de leur présence nombreuse dans cet environnement et dans la zone où se trouvent généralement les contaminants, mais surtout à cause de leur influence sur la chimie du sol. En effet, de nombreuses interactions existent entre les contaminants et les micro-organismes endogènes, ce qui va entraîner une modification de la forme physico-chimique des polluants et donc de leur mobilité (concentration dans les compartiments physiques) et de leur biodisponibilité (intégration dans les cycles biochimiques).

De même, la présence de plantes peut, dans la zone rhizosphérique (zone de sol soumise à l'influence des racines), modifier les propriétés physiques et chimiques des sols par différents processus qui vont permettre la mobilisation des métaux et leur assimilation par les plantes (figure 2).

Du fait de la forte liaison des métaux à la phase solide minérale et organique du sol, le transfert des polluants ne se restreint pas uniquement aux seuls processus d'absorption par la plante ; il y a également divers processus physico-chimiques intervenant sur la phase solide au niveau de la rhizosphère. Les interactions plantes-sols représentent une vision simplifiée des processus à l'œuvre dans les sols et tout particulièrement dans la rhizosphère. En effet, la présence de communautés microbiennes, bactériennes et fongiques, associées aux racines interfère largement sur la disponibilité et le prélèvement des métaux par les plantes. Ces communautés ont aussi un rôle majeur, avec les plantes, dans l'élaboration de la composition de la phase organique

du sol qui intervient fortement dans l'acquisition des métaux. Malgré leur importance fondamentale, les interactions plantes-micro-organismes/métaux associés dans les sols sont loin d'être parfaitement comprises et donc modélisables.

## De la biodisponibilité du polluant à sa phytotoxicité

Un des aspects essentiels du potentiel toxique d'un sol pollué concerne, en plus de la quantité absolue de polluant présent, la disponibilité réelle du polluant pour son absorption et son accumulation dans la plante. En effet, des phénomènes de phytotoxicité peuvent intervenir pour des expositions élevées, provoquant ainsi un effet direct sur la morphogénèse et la croissance racinaire.

Ce critère de biodisponibilité du polluant rend compte de l'interaction entre le sol contaminé\*, la plante, la solution du sol et la communauté de micro-organismes de la rhizosphère. Il dépend de multiples facteurs : nature et propriétés physico-chimiques du polluant et du sol considérés, composition de la solution du sol, interactions chimiques entre les racines et le sol, composition et activité du cortège microbien rhizosphérique, structure et volume de sol exploré par le système racinaire, activités métaboliques des racines... Une plante est majoritairement exposée aux éléments *via* la racine. Plus la surface explorée par les racines est importante, plus la plante peut prélever de contaminant. Pour qu'un élément contaminant soit prélevé et absorbé par la plante, il doit tout d'abord passer en solution et être présent dans la solution du sol sous une forme chimique assimilable par le végétal. Les équilibres sol-solution dépendent de la forme initiale des éléments dans le sol, des paramètres physico-chimiques du sol, des ligands présents et de leur évolution. Mais des expositions trop élevées peuvent engendrer des phénomènes de phytotoxicité. Il est donc nécessaire de trouver l'exposition optimale pour le végétal conduisant à une accumulation maximale sans phytotoxicité.

La spéciation des éléments dans la solution du sol est fortement dépendante de la présence de ligands métastables d'origine organique tels que des exsudats racinaires, des polysaccharides d'origine microbienne ou fongique, des ligands organiques « stables » ou des ligands inorganiques (carbonates...) et des entités colloïdales d'origine minérale tels les colloïdes aluminosilicatés ou ferrifères amorphes... pouvant aussi être recouvertes d'un film organique. L'ensemble des équilibres entre les formes chélatées et la forme libre de l'élément est fonction de la nature des surfaces sorbantes du sol et des ligands en solution. Il est donc important de comprendre à la fois les effets de l'architecture racinaire sur l'accumulation des éléments et leurs effets sur la racine et son développement.

## Un programme de R & D national pour modéliser les transferts entre le sol et la plante

Un programme de recherche intitulé « Toxicologie nucléaire environnementale »<sup>(1)</sup>, programme pluridisciplinaire et

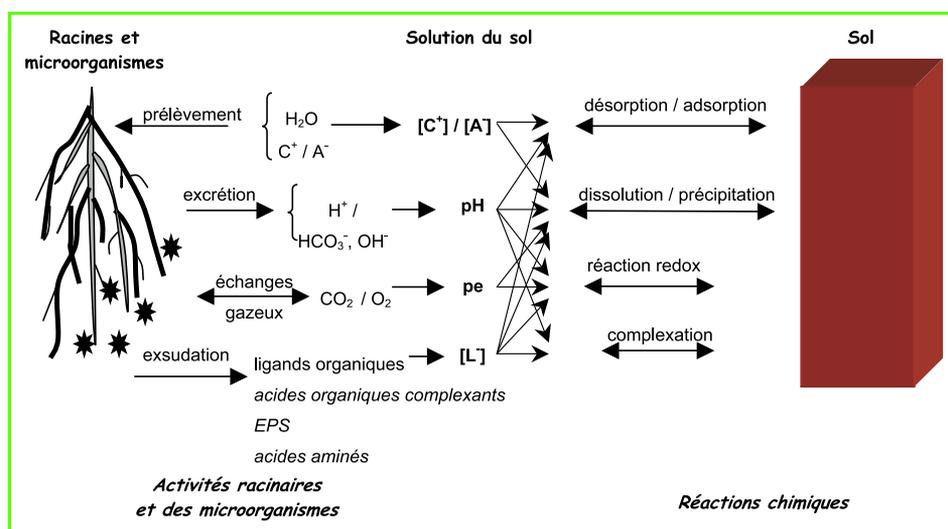


Figure 2 - Interactions chimiques induites par les activités racinaires et microbiennes dans la rhizosphère.

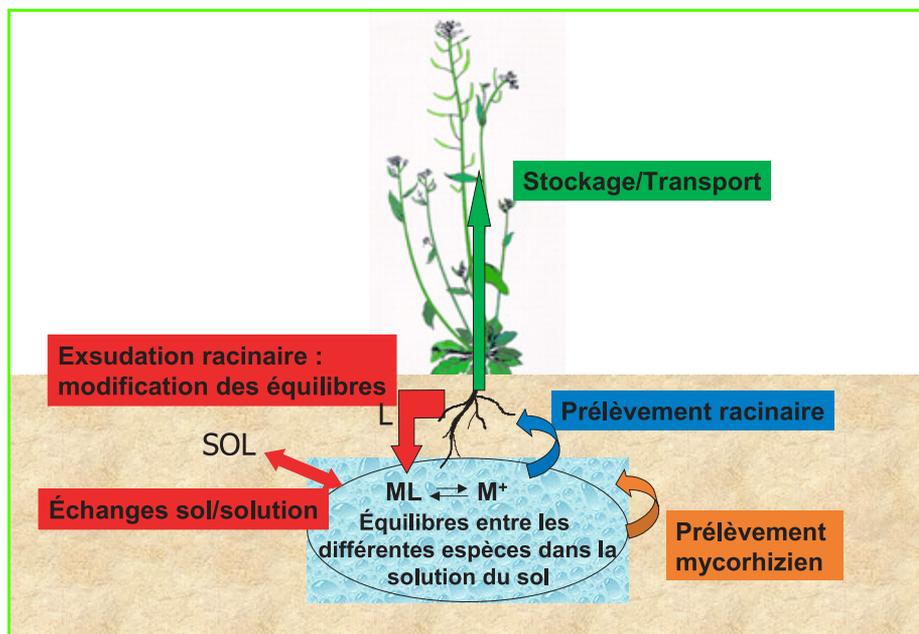


Figure 3 - Modèle de transferts dans un système sol/solution du sol/plante.

transversal, piloté par le CEA (Direction des sciences du vivant) et regroupant le CNRS, l'Inserm et l'INRA, a été mis en place (pour trois ans) afin de préciser la toxicité des éléments chimiques et radiochimiques utilisés dans l'industrie nucléaire et de proposer des solutions de prévention, surveillance et remédiation. Dans ce cadre, un projet « Transferts sol-plante », coordonné par L. Denaix (INRA Bordeaux) et M. Lebrun (CNRS Montpellier), a pour objectifs d'identifier et de caractériser les principales fonctions impliquées dans l'acquisition des métaux du sol par les plantes, de comprendre les mécanismes d'échange et de transfert de contaminants dans le système sol-eau-plante, de hiérarchiser les différents paramètres clés, biotiques et abiotiques, qui contrôlent ces transferts afin d'établir les bases d'un modèle conceptuel des différents flux entre les compartiments tels qu'ils sont présentés dans la *figure 3*, préalable indispensable à la modélisation.

Les transferts sol-plante sont complexes et mettent en jeu de nombreuses interactions entre les différents milieux. Il n'existe pas, actuellement, de modèle phénoménologique décrivant ces mécanismes dans leur ensemble et prenant en compte les phénomènes biologiques ; seuls des modèles très simples sont utilisés (facteur de proportionnalité entre la concentration dans le sol et la concentration dans l'organe cible) et leur application se limite à certaines conditions et à des domaines restreints, notamment où le polluant est à l'état de trace. La modélisation détaillée des transferts sol-plante nécessite de hiérarchiser l'importance de ces paramètres afin de construire des modèles qui soient plus phénoménologiques et qui soient paramétrés en fonction des conditions du milieu. Par exemple, il est nécessaire d'intégrer les modèles de spéciation en solution pour la solution du sol dans la zone rhizosphérique.

La détermination des facteurs clés de la biodisponibilité et de la phytotoxicité des métaux pour les plantes d'intérêt

agronomique est un objectif majeur de ce projet. Pour cela, une association entre des équipes spécialistes de la spéciation des éléments contaminants dans le système sol-eau-plante avec des équipes spécialistes du transfert sol-plante des contaminants à l'échelle de la plante entière a été réalisée. Une méthode de spéciation du Cs et Sr dans la solution du sol et dans le végétal utilisant des outils analytiques de pointe – électrochimiques (DPASV, DPP, capteurs *in situ*...), couplages de techniques séparatives (chromatographies ou électrophorèse capillaire) avec des détecteurs sensibles et spécifiques (ICP-MS avec cellule de collision, FAS, ICP-AES...) – doit être développée. L'utilisation de l'ICP-MS nouvelle génération devrait permettre en outre le suivi des rapports isotopiques dans les différents compartiments.

## Une valorisation pour une meilleure gestion des sols

La valorisation potentielle de ces travaux devrait permettre de mieux cerner la problématique des transferts de contaminants dans un sol, soit dans le but de minimiser les risques de contamination dans le contexte d'une valorisation agricole des sols faiblement contaminés (pollution diffuse), soit dans le but de maximiser les flux de polluants prélevés pour la restauration de sols plus fortement contaminés (pollution concentrée).

(1) ToxNuc-E, <http://www.toxnuc-e.org>



C. Sahut

**Claire Sahut**<sup>1</sup> est ingénieur chercheur, **Valérie Chaignon** est post-doctorante et **Catherine Santucci** est chef du LMTE à la Direction de l'Énergie Nucléaire du Centre de Caradache du CEA\*.



V. Chaignon



C. Santucci

\* DTN/SMTM/LMTE, Bât. 352, Centre de Caradache, 13108 Saint-Paul-lez-Durance Cedex.

<sup>1</sup> Tél. : 04 42 25 62 42. Fax : 04 42 25 35 45. Courriel : [claire.sahut@cea.fr](mailto:claire.sahut@cea.fr)