



**HAL**  
open science

## Soil, a sponge for pollutants

Eric Lichtfouse

► **To cite this version:**

| Eric Lichtfouse. Soil, a sponge for pollutants. *Analisis*, 1997, 25 (8), pp.M16-M23. hal-00193259

**HAL Id: hal-00193259**

**<https://hal.science/hal-00193259>**

Submitted on 3 Dec 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revised version

Analisis Magazine **25**, M16-M23, 1997.

Preface of the special issue "Soil Pollutant" (Analisis Magazine **25**, M16-M72, 1997)

Correspondence: Dr. Eric Lichtfouse, INRA-CMSE-PME, 17, rue Sully, 21000 Dijon, France

Eric.Lichtfouse@dijon.inra.fr

## **SOIL, A SPONGE FOR POLLUTANTS**

## ***LE SOL, UNE ÉPONGE À POLLUANTS***

Eric LICHTFOUSE

### **Abstract**

This preface of the special issue entitled "Soil Pollutants" (Analisis Magazine 25, M16-M72, 1997) highlights major basic and applied issues about the sources and fate of organic, mineral and radioactive pollutants in soils. Soils have long been considered as a closed and inert medium where wastes can be dumped without impact on living organisms. This is false and we know now that soils play a vital role in ecosystems. Pollution sources are diverse and numerous. Toxic compounds are either of anthropogenic or natural origin, e.g. heavy metals occur at high levels both in some industrial soils and in some pristine rocks. Polycyclic aromatic hydrocarbons occur also in most ecosystems as a result of natural and anthropogenic processes. One of the key issue of understanding the fate of pollutants is the occurrence of bound residues. Bound residues are pollutants, or their degradation products, that are bound to organic and mineral matter such as humic substances. Here, the degree of binding will rule the availability of pollutant, and, in turn, will control their toxicity and release in water and atmosphere. Knowledge on bound residue is still scarce despite numerous studies involving <sup>14</sup>C-labelling of pesticides. Remediation of contaminated soils involves physical, chemical and biological methods.

Key-words: soil pollution; PAHs; heavy metals; <sup>14</sup>C pesticide; water pollution; bioavailability; bound residues; petroleum; toxicity; <sup>137</sup>Cs; PCR; Cu; Cd; Cr; Pb; Ni; Zn; analysis; remediation; phytoremediation; humic substances

Notes from the author: this abstract was written in 1997 for indexing in the HAL archive. The article is written both in English and in French

Revised version

Analisis Magazine **25**, M16-M23, 1997.

Preface of the special issue "Soil Pollutant" (Analisis Magazine **25**, M16-M72, 1997)

Correspondence: Dr. Eric Lichtfouse, INRA-CMSE-PME, 17, rue Sully, 21000 Dijon, France

Eric.Lichtfouse@dijon.inra.fr

## **SOIL, A SPONGE FOR POLLUTANTS**

### ***LE SOL, UNE ÉPONGE À POLLUANTS***

Eric LICHTFOUSE

Laboratoire Sols et Environnement associé à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), ENSAIA-INPL, 2, avenue de la Forêt de Haye, 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex.

#### **1. SOIL, A THREATENED PATRIMONY**

Soils have been regarded for a long time as inert and closed media where it was possible to dump any kind of hazardous waste without implications on living organisms. This is false (Figure 1). The soil is an essential cogwheel of life on earth. The millions of organisms living within it such as worms, bacteria, fungi and algae are recycling organic debris, thus playing an important part in the global system. Soil humic substances, formed by slow degradation of organic residues, have also several vital functions, for instance as a pool of water and plant fertilizers, and as a glue coating mineral particles. Therefore, the alteration of soil humic substances, e.g. by the use of excessive loads of fertilizers and pesticide, leads inescapably to soil impoverishment and erosion.

The soil is not a closed system at all. All earth organic carbon has flowed during geological times through this interface between atmosphere, underground and rivers. Its ability to remediate pollutants is very limited. All pollutants entering the soil system can be stocked, transformed - often into more hazardous compounds - then transferred toward atmosphere by aeolian erosion, toward plants - because soils are feeding plants! -, and toward groundwater and rivers. Obviously, the building up of toxic waste into the soil system is a risk for all life beings.

#### ***LE SOL, UN PATRIMOINE MENACÉ***

*Le sol a été considéré pendant longtemps comme un milieu inerte et clos où il était possible d'enfouir toutes sortes de déchets toxiques sans encourir de conséquences pour les organismes vivants. C'est faux (Figure 1). Le sol est un des rouages essentiels du bon fonctionnement de la vie sur terre. Il contient des milliers d'organismes vivants : vers, bactéries, champignons, algues, etc. qui assure le recyclage des résidus organiques, un maillon essentiel de l'équilibre de notre planète. L'humus de la terre, formé par la lente décomposition de ces résidus organiques, joue de nombreux rôles vitaux, par exemple en gardant des réserves d'eau et de nutriments pour les plantes, ou en stabilisant les grains minéraux avec une 'colle' organique. En conséquence, la dégradation de l'humus, par exemple lors de l'usage abusif de pesticides et d'engrais, conduit inéluctablement à l'appauvrissement du sol et à l'érosion rapide des grains minéraux.*

*Le sol n'est certainement pas un milieu clos. Tout le carbone organique terrestre a transité par cette interface entre l'atmosphère, le sous-sol et les rivières à un moment ou un autre des temps géologiques. Sa capacité de dépollution est très limitée. Ainsi tout polluant entrant dans le sol est susceptible d'être stocké, transformé - souvent en produits plus toxiques - puis transféré vers l'atmosphère par érosion éolienne, vers les plantes par assimilation - car le sol nourrit les plantes! - et vers l'eau des rivières et des nappes phréatiques. Il est clair que l'accumulation de*

*produits toxiques dans le sol présente un risque à plus ou moins long terme pour tout les organismes vivants.*

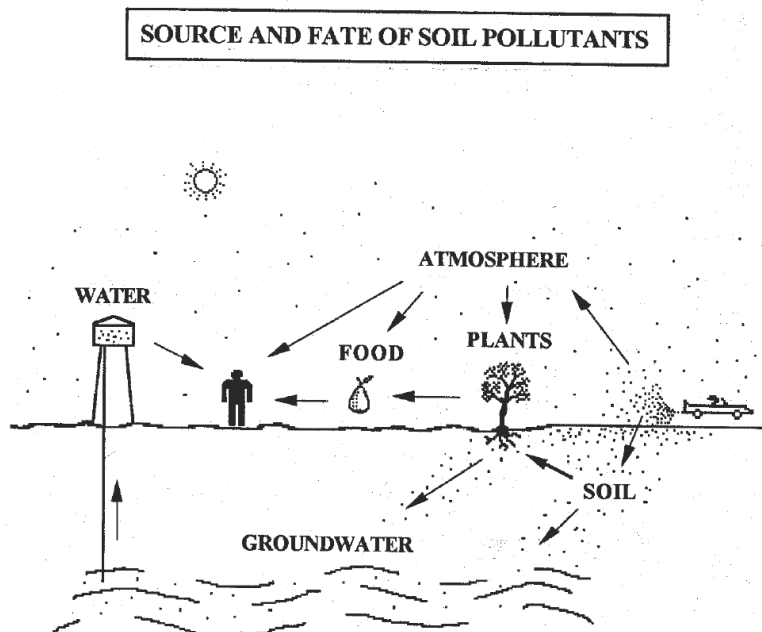


Figure 1. Main pathways of pollutants in the environment. *Principales voies de diffusion des polluants dans l'environnement.*

## 2. POLLUTION SOURCES

They are numerous and diverse. All human activities are potential sources of organic and mineral pollution : transportation, non-recyclable goods, agricultural and industrial practices. The underlying reason of the dramatic increase of pollution of natural media during the past century is the breakdown of ecological cycles by economic activities, which, for example, do not take into account the fate of wastes.

A pollutant is a substance exhibiting toxic effects for living organisms. There are natural as well as anthropogenic pollutants, the later being linked to human activities. For instance, hazardous compounds from volcanoes, natural vegetation fires and upward petroleum migration have a strict natural origin. Alternatively, the rapid industrialization and urbanization has lead to the introduction of various pollutants into urban, crop and forest soils. Heavy metals, for example, are occurring in soils from ancient factories. Following accidents, organic and mineral radioactive wastes have also been scattered into ecosystems. Further, combustion engines are emitting numerous hazardous substances (mutagenic and carcinogenic) such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) that are introduced into the atmosphere then transferred to soils, waters and life beings. Lastly, a large part of pesticides used to grow plants are regarded as persistent organic pollutants (POP) able to spread and stay tens of years in all biological media. There are three main chemical categories of hazardous substances : heavy metals, radioactive elements, and organic pollutants. While organic pollutants may be eventually degraded by biological processes because they have a carbon skeleton, heavy metals and radioactive elements are hardly degradable at low cost.

## **SOURCES DE POLLUTION**

*Elles sont nombreuses et variées. Toutes les activités humaines sont des sources potentielles de pollution organique et minérale : les transports, la consommation de produits non-recyclables, les pratiques agricoles et les industries. La cause profonde de l'augmentation rapide de la pollution du milieu naturel au cours du dernier siècle est la rupture des cycles écologiques par les activités économiques qui n'ont notamment pas pris en compte le devenir des déchets.*

*Un polluant est une substance présentant des effets toxiques vis à vis des organismes vivants. On peut distinguer les polluants naturels des polluants anthropiques dont l'origine est liée à l'activité humaine. Par exemple, les substances toxiques émises par les volcans, par les feux de végétation -naturels- ou par les remontées de pétrole à travers les failles de la croûte terrestre, ont une origine strictement naturelle. Par contre, l'industrialisation et l'urbanisation ont provoqué l'introduction de polluants variés dans les sols urbains, agricoles et forestiers. On peut citer les pollutions par les métaux lourds, concentrées notamment dans les anciennes friches. Dans plusieurs domaines d'activité, l'utilisation croissante de substances radioactives, organiques ou minérales, s'est traduit par des accidents ayant entraîné la diffusion à dose élevée de ces polluants dans les écosystèmes. Les moteurs à combustion produisent de nombreux substances toxiques, mutagènes et cancérigènes comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont introduites dans l'atmosphère puis transférées vers les sols, les eaux et les êtres vivants. Enfin, une grande partie des pesticides utilisés pour les cultures agricoles ou potagères sont considérés comme des polluants organiques persistants (POP) susceptible de diffuser et de rester pendant des dizaines d'années dans tout les milieux biologiques. Nous sommes donc en présence de trois grandes classes chimiques de substances toxiques : les métaux lourds et les radionucléides, peu ou pas dégradables, et les polluants organiques, susceptible d'être dégradés de part leur squelette carboné.*

## **3. BOUND RESIDUES**

The very complex structure of organo-mineral assemblages of soils is a really attracting challenge for the analytical scientist. For several reasons. First, following their entry into the soil, pollutants and their degradation products are slowly bounded to the matrix by more or less strong bonds (Figure 2). These bound residues may account for an important part of soil pollutants. They are also as a pool of hazardous substances which may re-enter the aqueous phase over several years. While the total amount of bound mineral residues can be quantified by dissolution of the soil matrix and degradation of the organic matter, e.g. with HF and hot HNO<sub>3</sub>, the complete extraction of bound organic residues is rarely achieved. In fact, few methods are available to determine 1) the biogeochemical ways of pollutant binding, 2) the nature and energy of pollutant-matrix bonds, and 3) the amount of bound residues. For example, classical extraction with water or methanol often allows a small part of the pollutant to be analysed. Therefore, regulations based upon solvent extraction do not take into account the amount of bound residues which could be very toxic in the long run. Noteworthy, a such problem is also encountered during analysis of plant, food and other biological media.

To follow the fate of pollutants into the soil puzzle, with emphasis on the determination of bound residues, analytical experiments using labelled elements are by far the most efficient. In this way, S. HOUOT and co-workers from the *Unité de Science du Sol* INRA, Thiverval-Grignon, use  $^{14}\text{C}$ -tagged pesticides to follow their fate into various soil compartments. They show that the behaviour of pollutants is mainly controlled by interactions with humic substances.

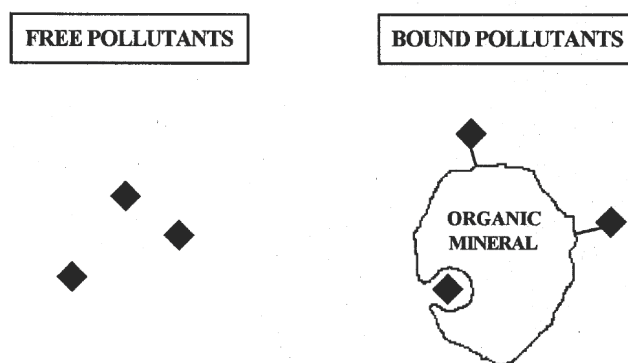


Figure 2. Soil pollutants occur either freely or bound to humic and mineral substances. *Les polluants du sol sont présents soit sous forme libre, soit sous forme liée aux substances humiques ou minérales.*

### **RÉSIDUS LIÉS**

*Le sol, de part sa structure organo-minérale extrêmement complexe, constitue un véritable défi à l'analyste. Pour plusieurs raisons. Tout d'abord, après introduction dans le sol, les polluants et leurs produits de dégradation sont peu à peu liés à la matrice par des liaisons plus ou moins fortes (Figure 2). Ce sont ces résidus liés qui constituent une partie importante des polluants du sol. Ils constituent un véritable réservoir de polluants, et de leurs métabolites, susceptibles d'alimenter l'eau du sol pendant plusieurs années. Les polluants minéraux peuvent être dosés par minéralisation complète, tandis que l'extraction complète d'un polluant organique, ou plus précisément l'extraction de la fraction liée de ce polluant, est très difficile. Il existe très peu de méthodes permettant de préciser 1) le mode d'incorporation du polluant, 2) la nature et l'énergie des liaisons entre polluant et matrice; et 3) la quantité de polluant et de métabolites liés. Ainsi, les extractions classiques du sol avec un solvant organique comme l'eau ou le méthanol ne permettent d'analyser souvent qu'une petite fraction des polluants effectivement présents. C'est pourquoi les normes, fondées sur l'extraction avec un solvant, ne rendent pas compte de la quantité de résidus liés qui peuvent s'avérer très toxiques à long terme. Ce problème est d'ailleurs aussi crucial lors de l'analyse de plantes, d'aliments ou d'autres milieux biologiques.*

*Pour suivre le devenir des polluants dans le sol, et en particulier pour mesurer les quantités de résidus liés, les approches utilisant des éléments traceurs sont actuellement les plus efficaces. Ainsi, en utilisant des substances marquées au carbone 14, S. HOUOT et ses collaborateurs de l'Unité de Science du Sol INRA de Thiverval-Grignon explorent la formation et la dissipation de pesticides dans le sol. Ils montrent que ces comportements sont gouvernés essentiellement par les interactions avec l'humus.*

#### 4. BIOAVAILABILITY

The toxicity of a substance is first dependent on its bioavailability, meaning the ability of a molecule to be transferred into a living organism (Figure 3). Analytical methods for the determination of pollutant bioavailability in soils are rare. Water and methanol extracts seem to represent the most bioavailable part of the soil pollutant. Higher yields are often given with less polar solvents e.g. as methylene chloride, but here, the extracted molecules are unlikely to represent the real pool of toxic substances that are bioavailable in the short term. Therefore, although it is convenient to use the 'total' - extractable - amount of pollutant to define regulation levels, the measured amounts are only partly indicative of the soil toxicity. Real toxicity can only be measured with biological tests, where living organisms such as light-emitting bacteria and plants are grown in contact with the toxic media. Here, A. BISPO and co-workers from the *Institut de Recherche Hydrologique*, Vandoeuvre-lès-Nancy, have set up several biotests for the analysis of polluted soils.

Radioactive substances, spread in soils following nuclear tests and accidents, e.g. Chernobyl, are a risk of ionization exposure by migration toward living organisms. Here, S. STAUNTON from the *Unité de Science du Sol* INRA, Montpellier, shows that the transfer of radioactive caesium ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) toward water and living organisms is controlled by a limited numbers of factors such as concentration and soil exchange capacity.

The effects of hazardous substances on soil microbial life and associated consequences on agricultural practices are poorly understood. T. VALLAEYS from the *Centre de Microbiologie des Sols et de l'Environnement*, Dijon, reviews several recent analytical approaches used to assess microbial changes induced by pollutants such as metals and pesticides. For instance, direct analysis of soil desoxyribonucleic acid (DNA) by polymerase chain reaction (PCR) is a promising tool to find bioindicators of pollution alert.

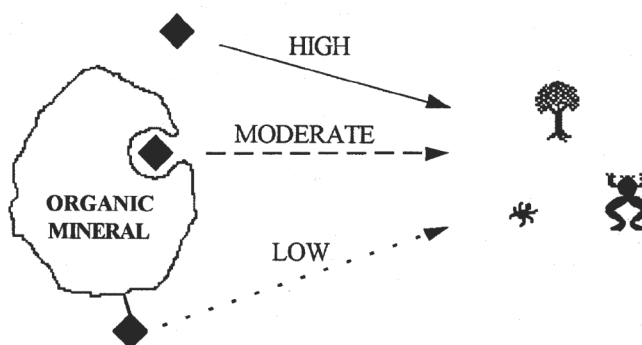


Figure 3. Free soil pollutants are more available to living organisms than bound pollutants. *Les polluants libres du sol ont une disponibilité plus forte que les polluants liés.*

#### **BIODIPONIBILITÉ**

*La toxicité d'un polluant dépend étroitement de sa biodisponibilité, c'est à dire de l'aptitude d'une substance à être transférée dans un organisme vivant (Figure 3). Or, il y a peu de méthodes capables de mesurer avec précision la biodisponibilité d'un polluant du sol. Alors que les extractions à l'eau ou au méthanol sont considérées comme les plus représentatives des fractions biodisponibles, l'utilisation de solvants moins polaires comme le chlorure de méthylène,*

*dont le rendement est souvent meilleur, donne accès à des fractions dont la biodisponibilité immédiate peut être mise en doute. En conséquence, les teneurs 'totales' en substances toxiques utilisées dans les normes pour des raisons de commodité ne reflètent que partiellement la toxicité réelle du milieu. C'est pourquoi les tests biologiques, consistant à mettre en contact un organisme vivant comme des bactéries luminescentes, des plantes ou des daphnies avec un milieu contaminé, s'avèrent indispensables pour mesurer la toxicité réelle du substrat contaminé. Ici, A. BISPO et ses collaborateurs de l'Institut de Recherche Hydrologique à Vandoeuvre-lès-Nancy ont mis au point plusieurs tests biologiques particulièrement utiles pour l'analyse des sols pollués.*

*Les essais nucléaires et les accidents comme celui de Chernobyl ont contribué à l'introduction de substances radioactives dans le sol, présentant un risque d'ionisation par transfert vers les organismes vivants. Ici, S. STAUNTON de l'Unité de Science du Sol INRA de Montpellier nous montre que l'aptitude au transfert du césium radioactif ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) vers l'eau et les organismes vivants est contrôlée par un nombre limité de facteurs comme la concentration et la capacité d'échange du sol.*

*L'impact des substances toxiques sur le bon fonctionnement des microbes du sol est encore un domaine peu exploré dont les conséquences sur les pratiques agricoles peuvent s'avérer néfastes. T. VALLAEYS du Centre de Microbiologie des Sols et de l'Environnement nous présente ici plusieurs approches analytiques utilisées pour observer les changements de la biomasse microbienne induits par des polluants tels que les métaux et les pesticides. Par exemple, l'analyse directe de l'acide désoxyribonucléique (ADN) de la terre par réaction de polymérisation en chaîne (RPC) constitue certainement une voie prometteuse pour la recherche de bioindicateurs d'alerte de pollution.*

## **5. GEOCHEMICAL BACKGROUND**

In some cases, it is difficult to distinguish natural from anthropogenic pollutions. For example, soils inherited from metamorphic source-rocks are naturally enriched in heavy metals and radioelements. In order to solve this issue, D. BAIZE from the *Unité de Science du Sol* INRA, Orléans, describes an analytical way to determine the geochemical background of crops, in order to assess unambiguously anthropogenic sources of pollution by metals (Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn). Noteworthy, a such method could be applied to the studies of other media such as plants, waters, sediments and airborne particulates.

### **FOND GÉOCHIMIQUE**

*Dans certains cas, il est difficile de distinguer pollution naturelle et anthropique. Certains sols formés sur des roches métamorphiques, par exemple, sont naturellement riches en métaux lourds et radionucléides. Pour résoudre ce problème, D. BAIZE de l'Unité de Science du Sol INRA à Orléans nous présente une démarche analytique consistant à déterminer le fond géochimique des sols agricoles afin de déceler avec certitude les contaminations en métaux d'origine anthropique (Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn). Ce type de démarche est d'ailleurs tout à fait applicable à l'analyse d'autres milieux comme les plantes, les eaux, les sédiments et les aérosols.*



## 6. TRANSFER

Despite numerous laboratory studies, the pathways of pollutant transfer into the soil, within the soil and from the soil toward other media such as atmosphere, plants, rivers and groundwater, are poorly understood in the field. In particular, the physico-chemical conditions controlling the migration of pollutants, e.g. in the solid, liquid, gaseous and colloidal phases, are still a matter of controversy, especially for low water-soluble molecules. Here, P. CAMBIER from the *Unité de Science du Sol* INRA, Versailles, shows us that analysis of both soils and associated waters from an ancient industrial work gives useful informations on the migration of metals (Zn, Cu).

### *TRANSFERT*

*Malgré de nombreuses études de laboratoire, les modes de transfert des polluants vers le sol, dans le sol et du sol vers d'autres milieux comme l'atmosphère, les plantes, les rivières ou les nappes phréatiques, sont peu connus sur le terrain. En particulier, l'état dans lequel se meuvent les substances, par exemple en phase liquide, solide, gazeuse ou liées aux particules organo-minérales, est encore sujet à controverse, notamment pour les molécules peu solubles dans l'eau. Ici, P. CAMBIER de l'Unité de Science du Sol INRA de Versailles montre que l'analyse de sols et des eaux d'infiltration associées provenant d'une ancienne friche industrielle permet de donner des indications pertinentes sur la mobilité des métaux (Zn, Cd).*

## 7. RAPID ANALYSIS

Numerous natural and industrial areas are heavily contaminated by fossil fuels. A pipeline breakdown, for example, causes an immediate risk of transfer of toxic molecules into groundwater. It is therefore necessary to locate and quantify rapidly hydrocarbons in the soil. Here, J. DUCREUX and co-workers from the *Institut Français du Pétrole*, Rueil-Malmaison, have set up a fast pyrolysis method, called 'Pollut-Eval', that allows to locate the oil plume and to determine the pollutant source, e.g. regular gas, diesel oil and fuel oil.

Classical extraction of soil organic pollutants are often undertaken during long periods of time with high sample amounts (~100 g) and hazardous solvent volumes (~500 ml). Such procedures also favour losses and degradation of the pollutant during extraction and transfer steps. To lower these issues, P. HENNER and co-workers from the *Laboratoire Sols et Environnement* INRA, Vandoeuvre-lès-Nancy, have set up a fast method to extract small soil samples (300 mg) by elution of a tiny amount of methylene chloride (2 ml) through a modified Pasteur pipette. On the other hand, C. RODRIGUEZ and co-workers from the *Institut de Recherche Hydrologique*, Vandoeuvre-lès-Nancy, show that supercritical fluid extraction (SFE) of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) is a rapid, selective and environmentally friendly method.

The soil analysis market is now flourishing notably because farmers and agronomic industries try to optimise the use of fertilizers for each soil type. This concept of 'sustainable fertilisation', promoted by the *Société Alsacienne pour le Développement et l'Etude de la Fertilité*, Aspach-le-Bas, allows for example to prevent the use of excess loads of fertilizers which often generate crop production losses associated with underground pollution. J.-Y. BALITEAU, from this society, describes a simple and fast procedure to analyse the main elements (P, K, Ca, Na, Fe, Mn, Cu, Zn) of a lot of soil samples (>40 000/an).

## **ANALYSE RAPIDE**

*De nombreux sites naturels et industriels sont contaminés de façon massive par des hydrocarbures fossiles. La rupture d'un pipe-line, par exemple, présente un risque immédiat de transfert de molécules toxiques dans les eaux de la nappe phréatique. Il est alors nécessaire de localiser et de quantifier rapidement les hydrocarbures au sein du sol et du sous-sol. À cette fin, J. DUCREUX et ses collaborateurs de l'Institut Français du Pétrole à Rueil-Malmaison nous présentent la mise au point d'une méthode de pyrolyse rapide, intitulée 'Pollut-Eval', qui permet non seulement de localiser les hydrocarbures, mais aussi de préciser leur nature : essence, gazole, fioul.*

*Les extractions classiques des polluants organiques du sol sont souvent effectuées par contact prolongé de quantités importantes d'échantillons (~100 g) avec des volumes importants de solvants à caractère toxique (~500 ml). Ces extractions, ainsi que les étapes ultérieures de concentration et de transfert de l'échantillon, favorisent les pertes par manipulation, par dégradation et par évaporation. Afin de minimiser ces problèmes, P. HENNER et ses collaborateurs du Laboratoire Sols et Environnement de Vandoeuvre-lès-Nancy ont mis au point une nouvelle méthode d'extraction rapide d'une petite quantité de sol (300 mg) par élution de chlorure de méthylène (2 ml) sur une pipette Pasteur modifiée. D'autre part, C. RODRIGUEZ et ses collaborateurs de l'Institut de Recherche Hydrologique à Vandoeuvre-lès-Nancy nous montrent que l'extraction avec un fluide en phase supercritique (EFS) de sols pollués par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) est une méthode rapide, sélective et respectueuse pour l'environnement.*

*La demande en analyse de sols de la part des agriculteurs et des industries agricoles est actuellement en croissance rapide notamment afin d'adapter au mieux l'utilisation des engrais à tel ou tel type de sol. Ce concept de fertilisation 'raisonnée', promu par la Société Alsacienne pour le Développement et l'Etude de la Fertilité d'Aspach-le-Bas, permet notamment d'éviter un excès d'apport d'engrais souvent néfaste à la production et à l'environnement. Confronté à un nombre important d'échantillons de terre, J.-Y. BALITEAU, membre cette entreprise, nous expose un protocole expérimental simple et astucieux pour analyser rapidement les principaux fertilisants et oligo-éléments (P, K, Ca, Na, Fe, Mn, Cu, Zn) de nombreux échantillons de terre (> 40 000/an).*

## **8. REMEDIATION**

Most soils are polluted by potentially toxic substances at more or less high levels. Among cases of heavy contamination, there are soils of ancient work, cities, suburbs, roads, backyards, railways and some crops. To minimize the diffusion of pollutants toward other natural media, a wide panel of remediation techniques are under development. Incineration and thermal desorption, for instance, are fast. However, though thermal treatment is convenient to resolve quickly major issues of pollution, it has several drawbacks such as the high cost, the loss of soil biological properties by sterilization, and the possible emission of toxic compounds, e.g. dioxins.

Alternatively, the spreading of detergents onto the soil surface solubilizes pollutants that are later water-washed toward other media. Nonetheless, it is rarely complete and favors the migration of the pollutants toward groundwater, rivers and other ecosystems. On the other hand, mild, low-cost and efficient biological methods are now developing rapidly. Their principle lies on the

natural ability of living organisms to extract and degrade toxic molecules. For instance, bioreactors are vessels where soil polluted waters can be cleaned with microbes, e.g. bacteria and fungi, boosted by fertilizers. The principle of biohillocks is similar but here, a small hill of contaminated soil is built then treated with fertilizers.

Lastly, plants may be used to remediate polluted soils (Figure 4), a process called phytoremediation. Currently, a such procedure is under deep investigation, especially due to its cheap and simple practice, analogous to agricultural cropping. Its principles lies on two main phenomenons. First, some plant species are able to extract selectively high amounts of heavy metals from the ground then stock them up. Here, besides soil cleaning, plants may be harvested and burnt afterwards to give an enriched ore of recyclable metal. Second, plants activate strongly the microbial biomass by injection of exudates enriched in organic nutriments, e.g. sugars and amino acids, in the root zone called the ‘rhizosphere’. Thus the microbes, well-fed by the plant, degrade organic pollutants such as pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Here, P. HENNER and co-workers from the *Laboratoire Sols et Environnement INRA*, Vandoeuvre-lès-Nancy, describe the occurrence and remediation options of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs).

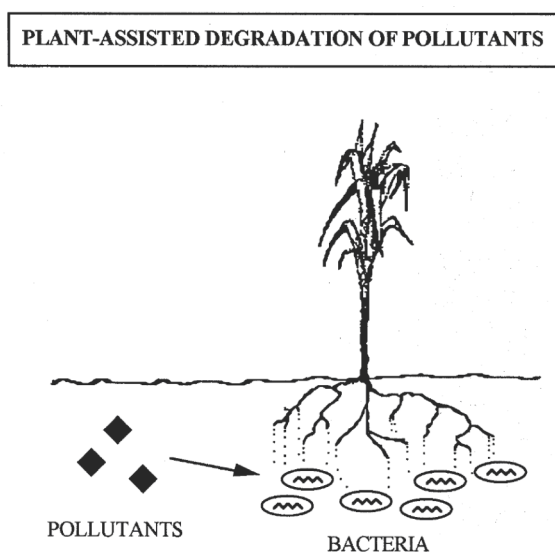


Figure 4. Bacteria, well-fed by plant root exudates, degrade faster organic pollutants (bacteria are not to the scale). *Les bactéries, bien nourries par les exsudats des racines, dégradent plus vite les polluants organiques (les bactéries ne sont pas dessinées à grandeur réelle).*

## **RÉHABILITATION**

*La plupart des sols sont contaminés par des substances potentiellement toxiques, à des doses plus ou moins fortes. Parmi les cas de pollutions massives, on peut citer les friches industrielles, les sols urbains, sub-urbains et routiers, les sols des jardins potagers, des voies ferroviaires et quelques exploitations agricoles. Afin de limiter la diffusion des polluants vers d'autre milieux, de nombreuses techniques de réhabilitation sont en cours de développement. L'incinération ou la désorption thermique par exemple sont des procédés rapides. Bien que cette technique soit parfois appropriée aux cas d'urgences, elle présente plusieurs inconvénients comme le coût*

élevé, la perte des qualités biologiques du sol par stérilisation et l'émission potentielle de polluants, des dioxines notamment.

Alternativement, l'épandage de détergents ou d'autres tensio-actifs à la surface du sol a pour objectif en solubilisant le polluant de le déplacer hors de la zone contaminée. Néanmoins, ce déplacement se faisant souvent vers les eaux de la nappe phréatique et des rivières, cette technique est susceptible de favoriser la diffusion des polluants dans les écosystèmes. Les méthodes biologiques, plus douces, efficaces et moins onéreuses, sont actuellement en plein développement. Leur fonctionnement repose sur l'utilisation des capacités naturelles des organismes vivants à extraire et à dégrader les polluants. Dans les bioréacteurs, par exemple, les eaux polluées du sol sont épurées par des micro-organismes comme les bactéries et les champignons activés par des engrais. Les biotertres fonctionnent sur le même principe d'activation microbienne : la terre polluée est excavée, assemblée sous forme de tertre - une petite colline cloisonnée - puis traitée avec des engrais.

Enfin, les plantes peuvent contribuer à dépolluer le sol (Figure 4) : c'est la phytoréhabilitation, ou phyto-rémediation. Cette technique est en plein essor notamment à cause de la simplicité de mise en oeuvre analogue aux cultures agricoles. Ici, la dépollution est basée sur deux phénomènes selon la nature du polluant. D'une part, certaines espèces assimilent préférentiellement les métaux lourds puis les stockent, contribuant ainsi à extraire ces polluants du sol. Cette technique permet non seulement de dépolluer le sol mais aussi de produire un véritable minerai recyclable après récolte et incinération des plantes. D'autre part, les plantes activent fortement la biomasse microbienne en injectant en permanence des exsudats organiques, tels que des sucres et des acides aminés, dans la zone des racines, c'est à dire la 'rhizosphère'. Ainsi les micro-organismes du sol, bien nourris par la plante, dégradent les polluants organiques comme les pesticides ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ici, P. HENNER et ses collaborateurs du Laboratoire Sols et Environnement de Vandoeuvre-lès-Nancy nous présentent les problèmes associés aux sols contaminés par les HAP, et les moyens d'y remédier.

---