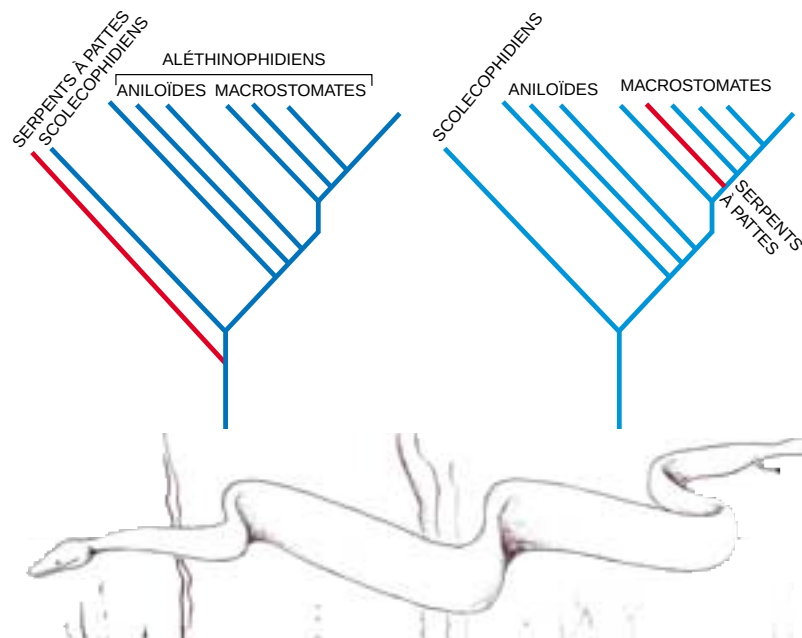




Deux arbres généalogiques concurrents des serpents. En bas, reconstitution du serpent à pattes *Podophis descouensi*. On remarque la très petite taille relative des pattes et leur curieuse position, près de l'extrémité caudale.

une branche ancienne, qui s'était détachée du tronc commun des serpents avant que les sclérophidiens et les aléthynophidiens ne s'individualisent. En revanche, E. Tchernov et ses collègues, se fondant surtout sur l'analyse d'*Haasiophis*, dont la bouche

est étonnamment grande, considèrent que ces serpents bipèdes sont des macrostomates, c'est-à-dire des serpents évolués.

Podophis, lui, semble confirmer l'hypothèse de M. Caldwell et M. Lee : il montre que les serpents bipèdes sont primitifs.

Dans cette hypothèse, les serpents anciens auraient été macrostomates ; la grande bouche des serpents actuels serait une structure anatomique ancienne. Autrement dit, les serpents évolués ne seraient pas ceux que l'on croit.

Dans l'hypothèse inverse, comment les serpents à pattes seraient-ils dérivés de serpents ne possédant plus de pattes ? Autrement dit, soit tous les groupes de serpents autres que les formes bipèdes ont perdu indépendamment leurs pattes postérieures, soit les pattes postérieures sont réapparues chez les serpents bipèdes.

Des caractères anatomiques importants ayant été mal interprétés par E. Tchernov et ses collègues, leur hypothèse semble douteuse, mais le paradoxe subsiste. On devra commencer par revoir les données sur ces trois fossiles. On n'oubliera pas non plus que les serpents bipèdes étaient marins. S'ils sont effectivement primitifs, il s'agit d'un argument qui s'ajoute au fait que les plus proches parents des serpents sont des lézards vanaroïdes du Crétacé, marins eux aussi. Ainsi, on devrait conclure que les serpents sont nés de lézards en milieu marin, alors qu'on pensait naguère qu'ils étaient issus d'animaux fouisseurs.

Jean-Claude RAGE
et François ESCUILLIÉ

Le plomb au service de l'environnement

Pour détecter la contamination des nappes phréatiques par les décharges publiques

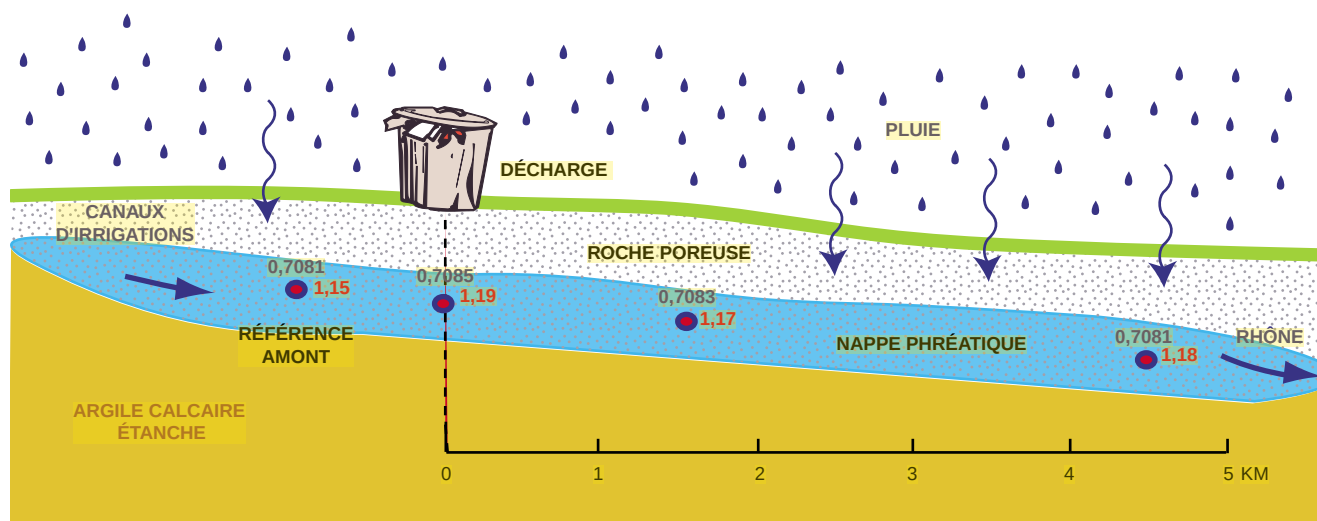
Les décharges d'ordures ménagères sont disgracieuses et nauséabondes. On sait moins qu'elles polluent les sols et les eaux : quand l'eau de pluie traverse les déchets, elle en extrait certaines substances solubles (des sels, des composés organiques...) qu'elle emporte avec elle ; ce «lixiviat» passe dans le sol. Aussi, depuis quelques années, on utilise des barrières composées de couches successives d'argile et de matériaux synthétiques, afin de confiner les lixivats. Cependant, en l'absence de barrière ou en cas de fuite, ceux-ci s'infiltrent dans les aquifères (les formations géologiques poreuses) et se mélangent à la nappe phréatique. Pour détecter une éventuelle contamination de ces réserves d'eau, voire leur pollution, on compare les concentrations en

certaines substances chimiques en amont et en aval de la décharge. Les plus utilisées sont les ions chlorures, sulfates et nitrates, ainsi que le carbone présent dans des molécules organiques. Cependant, à cause de leur dilution dans l'eau des aquifères, les concentrations de ces molécules sont parfois inférieures à la limite de détection (en général, un microgramme par litre). En outre, ces traceurs ne sont pas toujours issus de la décharge : le carbone organique est omniprésent dans la nature ; les chlorures viennent parfois du salage des routes, et les sulfates et les nitrates des engrais. Notre équipe a mis au point une méthode à la fois plus fiable et plus sensible de détection des lixivats : nous proposons de mesurer les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans les eaux des nappes phréatiques (les isotopes sont des atomes qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent : ils n'ont pas la même masse).

Dans les décharges d'ordures ménagères, le plomb est surtout présent dans les circuits électriques et dans les piles, tandis que le strontium vient principalement des objets en plastique, où

il est associé aux carbonates de calcium, qui améliorent leur résistance mécanique. On retrouve ces deux éléments en faibles concentrations dans les lixivats : quelques microgrammes par litre de plomb et jusqu'à un milligramme par litre de strontium.

Chaque minerai de plomb ou de strontium présente une composition isotopique qui dépend de son âge, de sa composition et des conditions où il s'est formé. Les variations de cette composition résultent de mécanismes de fractionnement naturels, lors de la formation du minerai : les rendements des transformations physiques et chimiques des isotopes d'un même élément sont légèrement différents, surtout dans le cas des éléments légers (la différence relative de masse entre les isotopes est plus grande que pour les éléments lourds). Dans les lixivats issus des décharges, les abondances isotopiques relatives résultent de celles des déchets, dont les matériaux ont été fabriqués à partir de minerais variés (il n'y a pas de fractionnement lorsque les lixivats traversent les formations géologiques). Elles sont distinctes des abondances naturelles dans la nappe phréatique, qui sont



Les rapports isotopiques du plomb ($^{206}/^{207}$, en bleu) et du strontium ($^{87}/^{86}$, en rouge) diffèrent en amont et en aval de cette décharge. En amont, ils dépendent de la nature géochimique du sous-sol. En aval, ils résultent du mélange avec la nappe phréatique de l'eau qui

a traversé les déchets (dont les matériaux ont des rapports isotopiques propres aux minerais utilisés pour les fabriquer) et s'est infiltrée dans le sol. Grâce à la mesure de ces rapports, on détecte une éventuelle contamination de la nappe phréatique.

déterminées par la nature géochimique du sous-sol.

Dans les nappes phréatiques analysées, on détecte le plomb et le strontium par spectrométrie de masse : les plus faibles concentrations mesurables sont de l'ordre de 10 picogrammes (10 millièmes de microgramme) par litre pour le plomb et de 50 nanogrammes (50 millièmes de gramme) pour le strontium. Les concentrations effectivement mesurées sur le terrain sont trop faibles pour que l'on parle de pollution : celle du plomb est 500 fois inférieure à la limite autori-

sée dans l'eau potable. En revanche, les rapports isotopiques différents, en amont et en aval des décharges, prouvent que les lixiviats qui en sont issus atteignent les nappes. Sur l'un des sites étudiés, nos analyses montrent que le rapport isotopique du strontium dans l'eau de la nappe phréatique revient à sa valeur amont à 4,5 kilomètres en aval de la décharge. En revanche, à cette distance, le rapport isotopique du plomb reste supérieur (voir la figure) : grâce au plomb, on détectera une éventuelle contamination à plus grande distance.

Lorsque les lixiviats pénètrent dans les aquifères, ils participent à des réactions biologiques conduisant à la dégradation de la matière organique par des bactéries et à des réactions physico-chimiques concomitantes, qui fixent une partie des métaux. En étudiant les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans l'aquifère, on espère mieux comprendre ces phénomènes.

J.-Y. BOTTERO et J.-D. VILOMET
Unité mixte 6635
(CNRS/CEREGE/Université d'Aix-Marseille III)

Pas de quoi en faire un plat

Faute d'une théorie convenable, le débat cosmologique s'enlise.

Depuis quelques années, le public est averti des « progrès » spectaculaires de la cosmologie : un jour, on découvre que l'expansion de l'Univers s'accélère ; un autre, que l'origine de la masse manquante est enfin élucidée ; le mois dernier, des cosmologistes affirmaient que, dans le cadre des modèles proposés, l'Univers est plat. Pourquoi les nouvelles de ce genre s'accumulent-elles sans être confirmées. Qu'avons-nous réellement appris sur l'Univers depuis 50 ans ? Que signifie la platitude de l'Univers ?

La théorie de la gravitation d'Einstein a permis de forger le concept d'univers courbe. Cette courbure apparaît quand on considère comment deux rayons lumi-

neux issus de la Terre et qui se propagent selon deux directions voisines s'écartent, à mesure que la lumière se propage. Dans un univers plat, l'écartement entre les rayons varie conformément à la géométrie euclidienne : il augmente proportionnellement à la distance parcourue à partir de la source. Dans un univers courbe, la courbure se manifeste par une différence entre l'écartement mesuré et celui que donnerait, à la même distance de la source et au même écartement angulaire, la formule euclidienne.

Selon la courbure, positive ou négative, cette différence correspond à un déficit ou à un excès d'écartement par rapport à celui qui existerait dans un univers euclidien.

Le point clé du débat est que la courbure n'est perceptible que suffisamment loin du point d'observation, lorsque la distance à ce point est une fraction notable d'une longueur caractéristique nommée « rayon de l'Univers ». Ce rayon indique à quelle échelle de dis-

tance la différence avec le cas euclidien devient notable. Dans un univers à courbure positive, à une distance égale à son rayon, l'écart entre les faisceaux lumineux est 16 pour cent inférieur à l'écart euclidien, tandis qu'il n'est que 4 pour cent inférieur à l'écart euclidien à une distance égale à la moitié de ce rayon.

Le problème est de déterminer le rayon d'un univers. Notre Univers est âgé d'environ 15 milliards d'années, ce qui fixe la distance de l'horizon cosmologique et limite le volume observable de l'Univers (la lumière qui est au-delà de l'horizon cosmologique n'a pas pu nous parvenir). Ainsi, si le rayon de notre Univers est bien supérieur à 15 milliards d'années-lumière, la courbure sera indétectable, et notre Univers paraîtra plat. C'est comme si l'on décrétait que la Terre est plate parce que, à l'échelle de la France, elle semble plate (voir la figure). Tant que l'horizon cosmologique est bien inférieur au rayon de l'univers, tout univers semble plat.