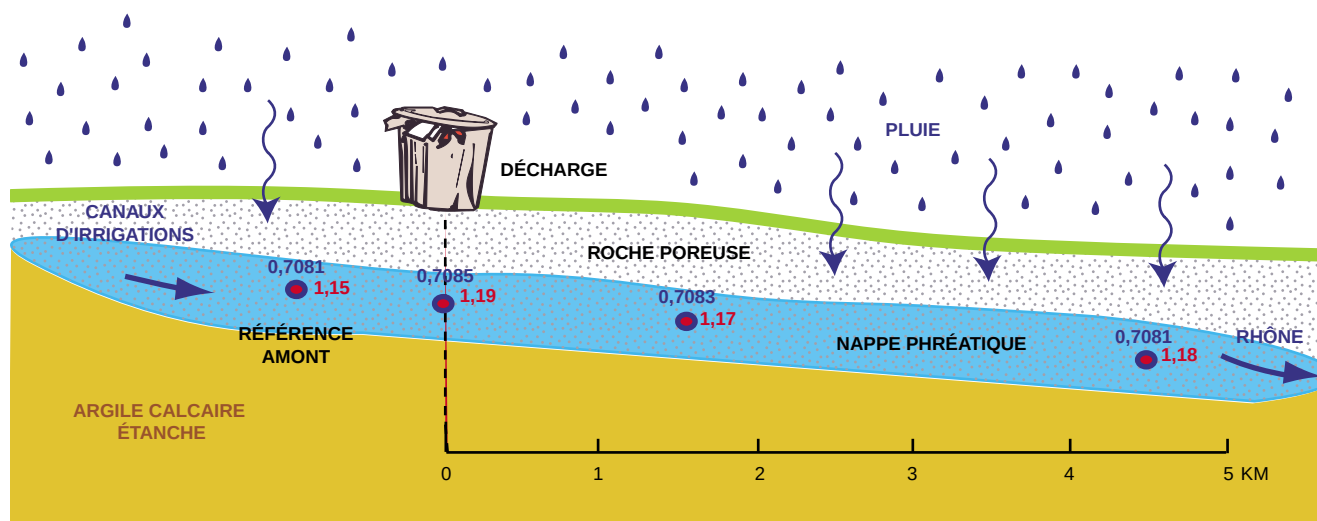




Les rapports isotopiques du plomb ($^{206}/^{207}$, en bleu) et du strontium ($^{87}/^{86}$, en rouge) diffèrent en amont et en aval de cette décharge. En amont, ils dépendent de la nature géochimique du sous-sol. En aval, ils résultent du mélange avec la nappe phréatique de l'eau qui

a traversé les déchets (dont les matériaux ont des rapports isotopiques propres aux minéraux 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-

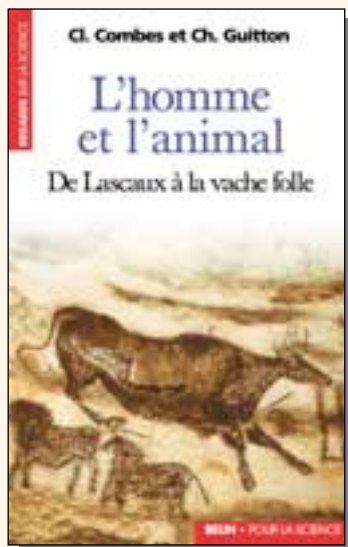
neux issus de la Terre et qui se propagent selon deux directions voisines s'écartent, à mesure que la lumière se propage. Dans un univers plat, l'écartement entre les rayons varie conformément à la géométrie euclidienne : il augmente proportionnellement à la distance parcourue à partir de la source. 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 indécélable, 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.



L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guittton**

«160 pages brillantes
d'érudition, de profondeur
et d'ouverture d'esprit.»

*Philippe Dorchies,
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire*

...

«Une promenade plaisante,
claire et documentée, guidée
conjointement par un biologiste
et un vétérinaire.»

Eurêka

...

«Un livre riche et divertissant
alliant philosophie et sciences
grand public publié par deux
scientifiques de l'université
de Perpignan.»

Midi Libre

**Code P012 • 95 F
160 pages**

**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

Or, c'était exactement la situation peu après le Big Bang, lorsque l'Univers était si récent que la lumière n'avait pas eu le temps de parcourir un trajet suffisant : la théorie de la relativité montre alors que ce trajet reste plusieurs ordres de grandeur inférieur au rayon. Ainsi tous les univers semblent plats lorsqu'ils naissent ; ils continuent de le paraître tant qu'ils n'ont pas atteint leur âge «adulte», c'est-à-dire tant que la portion d'espace explorée n'est pas suffisante pour que l'on détecte une courbure.

Quant aux univers «exactement» plats, ce sont des univers mathématiques dont la courbure, si elle était indécélable à très grande distance, le serait encore à distance supérieure. Si nous vivions dans un tel univers, nous ne pourrions jamais le savoir, car la preuve de platitude imposerait l'exploration de portions d'espace toujours plus grandes, à la recherche d'une courbure qui infirmerait l'hypothèse de départ. La contradiction logique soulevée montre que le concept mathématique d'univers plat est à éliminer du débat cosmologique.

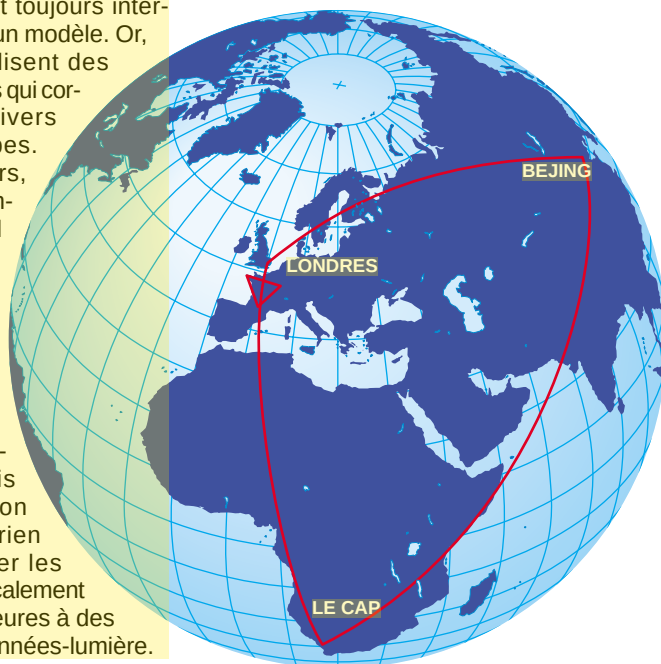
Au final, si les mesures montrent que notre Univers est plat, c'est que sa courbure est difficilement détectable, soit parce que la qualité des mesures est insuffisante, soit parce que le rayon de courbure est trop grand par rapport à la profondeur de l'espace que nous pouvons sonder. À moins que la théorie elle-même ne soit en cause...

En effet, une mesure ne signifie rien en elle-même : elle est toujours interprétée dans le cadre d'un modèle. Or, les cosmologistes utilisent des modèles mathématiques qui correspondent à des univers homogènes et isotropes. Ces univers particuliers, choisis par souci de simplicité, décrivent mal l'Univers où nous vivons : notre Univers n'est pas un gaz homogène de particules (des structures comme les galaxies ou les amas de galaxies ne sont pas en expansion) ; les astronomes n'ont jamais prouvé que l'expansion était isotrope ; enfin, rien n'autorise à extrapoler les paramètres observés localement à des distances supérieures à des dizaines de milliards d'années-lumière.

La contribution de la théorie des univers homogènes et isotropes est certes importante : c'est elle qui a inventé le Big Bang. Toutefois, en se fondant uniquement sur ces modèles, les cosmologistes ne peuvent prétendre rendre compte de manière satisfaisante de la réalité. De surcroît, notre physique reste incapable de traiter le Big Bang lui-même.

Une des graves contradictions qui entachent les modèles d'univers homogène est le problème de l'horizon. À l'origine, au Big Bang, la proportion d'Univers visible (pour chaque observateur potentiel) était infiniment faible. Autrement dit, dans ce type d'univers homogènes construits selon la théorie d'Einstein, les différents points sont «causalement» déconnectés à l'origine. Comment des points qui ne peuvent s'influencer forment-ils un univers homogène, ce qui nécessite que ces points aient uniformisé leurs propriétés physiques ? C'est un problème incompréhensible dans le cadre de la physique actuelle : la cause de l'homogénéité serait antérieure à l'instant où notre physique peut décrire l'Univers, et les débats relatifs au choix des paramètres initiaux ou à l'idée de l'inflation (une phase d'expansion très rapide qui aurait permis l'homogénéité) ne l'évitent pas. Qu'avons-nous découvert depuis la théorie de la relativité générale et le Big Bang ? Rien, hors la confirmation de la justesse globale de la théorie.

Christian MAGNAN, GRAAL, Montpellier



À l'échelle de la France, la Terre semble plate, tandis qu'à plus grande échelle, sa courbure se fait sentir. La distance entre Strasbourg et Montpellier n'est inférieure que de 0,2 pour cent à la distance euclidienne, calculée à partir des distances entre Brest et Strasbourg, Brest et Montpellier, et l'angle Strasbourg-Brest-Montpellier. Pour Londres, Pékin et Le Cap, la distance entre Pékin et Le Cap est inférieure de 18 pour cent à la distance euclidienne.