

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modelent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 002401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 98

BELIN • POUR LA SCIENCE

Selon une autre hypothèse, la prééclampsie serait due à un conflit génétique entre la mère et le fœtus ; ce conflit serait une conséquence d'une implantation défectueuse d'œufs de mauvaise qualité incapables de bien maîtriser la production de cytokines et d'autres facteurs signalétiques à l'interface fœto-maternelle. Au cours de l'évolution, diverses stratégies visant à limiter la naissance de nouveau-nés en mauvaise santé se sont mises en place. La prééclampsie, qui entraîne des retards de croissance des fœtus, représenterait un échec de cette stratégie.

De surcroît, deux constatations semblent indiquer que des conflits génétiques participent à l'installation de la maladie. D'une part, la prééclampsie est plus fréquente avec des fœtus mâles, et les môles hydatiformes où le patrimoine génétique n'est que d'origine paternelle. D'autre part, quand une femme a une prééclampsie lors d'une première grossesse, le risque diminue lors des grossesses ultérieures, à condition que les enfants soient du même père (on constate qu'un mécanisme d'habituation de l'organisme maternel à la présence d'antigènes d'origine paternelle se met en place). La prééclampsie résulterait-elle d'un conflit, au sein des cellules fœtales, entre les gènes d'origine maternelle et ceux d'origine paternelle ? L'« empreinte parentale » favorise l'expression d'un gène hérité du père plutôt que celle du même gène hérité de la mère, ou inversement. Une dérégulation de l'empreinte paternelle ou maternelle dans l'expression de certains gènes participerait à l'étiologie de la prééclampsie.

Enfin, pour terminer ce panorama encore parcellaire des causes possibles de la prééclampsie, signalons que certaines pathologies maternelles qui existent avant la grossesse peuvent être responsables d'une ischémie placentaire par l'intermédiaire de lésions artérielles ; c'est le cas de l'hypertension artérielle

chronique, du diabète ou de l'obésité. D'autres provoquent une hypoperfusion placentaire par des mécanismes de thrombose, c'est-à-dire d'obstruction plus ou moins complète de certains vaisseaux sanguins. D'autres maladies encore, telles les thrombophilies familiales ou acquises (dûes à des mécanismes de coagulation excessifs) et la drépanocytose homozygote (maladie génétique caractérisée par la présence, dans les globules rouges, d'une hémoglobine anormale), provoquent une hypoperfusion placentaire par des mécanismes thrombotiques. Chacune de ces pathologies maternelles peut aboutir à des phénomènes d'hypoxie placentaire et à des symptômes de prééclampsie.

À la recherche d'un test de dépistage précoce

Aujourd'hui, on commence à mieux comprendre les mécanismes physiopathologiques de la prééclampsie, maladie placentaire. La cause de la maladie reste à déterminer, mais l'objectif principal des médecins est de dépister le plus tôt possible les femmes à risques, pour les protéger, elles-mêmes et leur enfant. Plus d'une centaine de tests biologiques ou cliniques ont été proposés pour prévoir ou identifier la prééclampsie. En effet, diverses substances qui indiquent, pour la plupart, un dysfonctionnement endothélial ou un stress oxydatif, sont en concentration anormale dans le sang ou dans les urines des femmes prééclampsiques. Si l'existence d'une anomalie génétique placentaire se confirme, l'analyse de l'ADN des cellules trophoblastiques qui circulent dans le sang maternel pourrait constituer un test non invasif autorisant le dépistage précoce de cette pathologie. Une surveillance précoce de la mère et du développement du fœtus pourrait alors réduire la mortalité des femmes enceintes et celle des nouveau-nés.

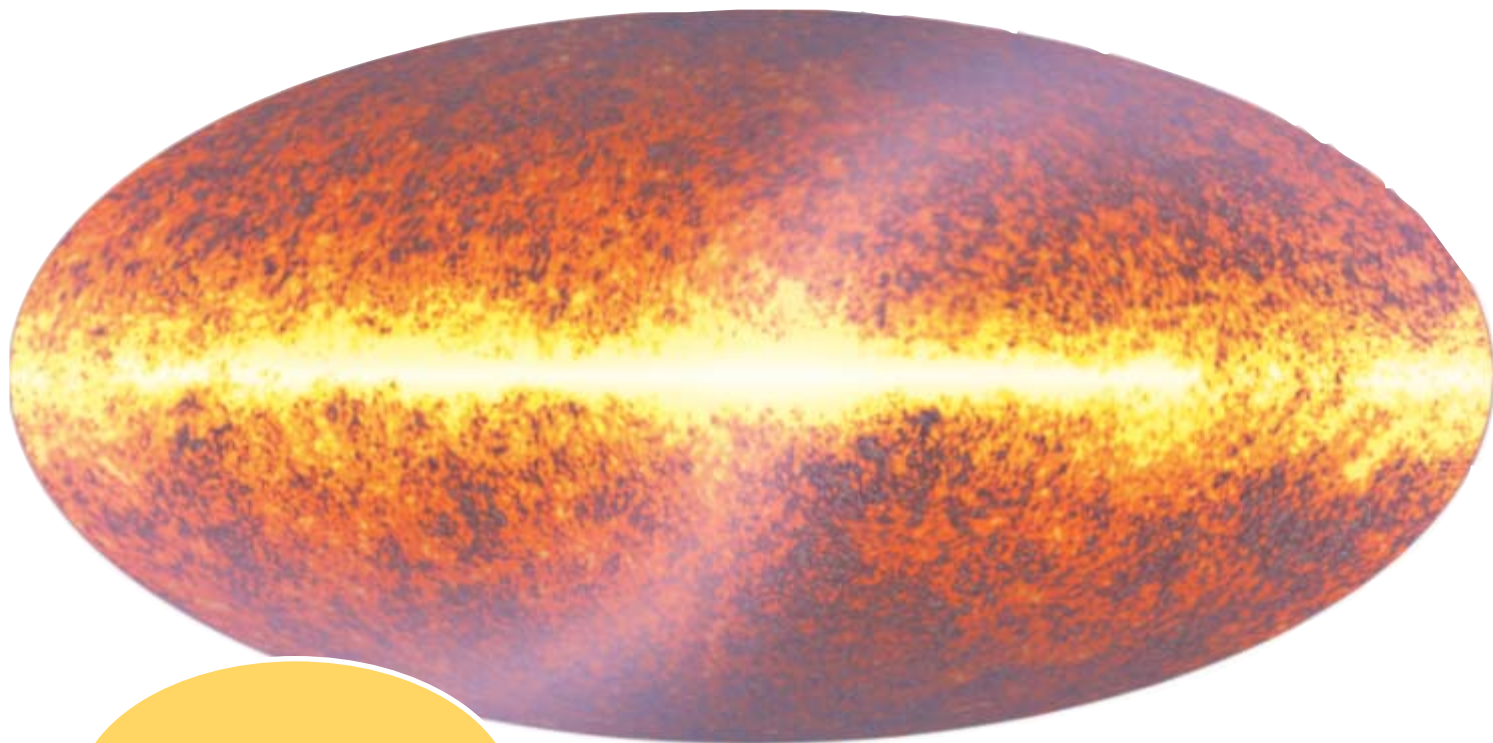
Françoise FERRÉ dirige l'unité U 361 de l'INSERM, Reproduction et physiopathologie obstétricale, à l'Hôpital Cochin-Port Royal. Bruno CARBONNE praticien hospitalier dans le Service d'obstétrique de l'Hôpital Saint-Antoine mène ses recherches dans l'Unité U 361.

J. KINGDOM et P. KAUFMANN, *Oxygen and Placental Villous Development : Origins of Fetal Hypoxia*, in *Placenta*, n°18, pp. 13-621, 1997.

B. CARBONNE, *Prématurité et anomalies de croissance fœtale*, in *Treizièmes Journées de Technologie avancée en gynécologie obstétrique*, Éditions AGPA, Paris, 1998.

G. DEKKER et al., *Etiology and pathogenesis of preeclampsia : Current concepts*, in *Am. J. Obstet. Gynecol.*, vol. 179, n° 5, pp. 1359-1375, 1998.

A. ALLAIRE et al., *Placental Apoptosis in Preeclampsia*, in *Obstetrics & Gynecology*, vol. 96, n° 2, pp. 271-276, 2000.



Mini-dossier

La cosmologie en effervescence

Depuis quelques années, la cosmologie est en effervescence et connaît un renouveau sans précédent. Des nouvelles découvertes ont mis en défaut les théories généralement admises sur l'évolution de l'Univers. Quels que soient leurs doutes, les cosmologistes ont une certitude : les réponses à quelques-unes de leurs principales questions viendront des données qu'apportera un nouveau satellite, la sonde des anisotropies micro-ondes, nommée MAP (en anglais *Microwave Anisotropy Probe*). Avec une précision qui n'a jamais été atteinte, la sonde photographiera les composants constitutifs de l'Univers à une époque reculée où les étoiles et les galaxies n'étaient qu'une lueur dans l'œil de la nature. Les caractéristiques fondamentales de notre Univers, telles que sa taille, sa forme, son contenu, son origine et sa destinée sont gravées dans cette image.

Ce jour est proche : le lancement du satellite est prévu pour l'été prochain. Jamais depuis le télescope spatial *Hubble*, un satellite n'avait suscité autant d'espoirs. Grâce à de tels instruments, la cosmologie, discipline essentiellement théorique, est devenue une science obser-

vationnelle, quantitative. L'amélioration de la précision des observations est à l'origine de la révolution qui a vu le jour il y a trois ans, quand l'observation des supernovae a révélé que l'expansion cosmique subit actuellement une phase d'accélération, une idée qui, il y a peu de temps encore, aurait fait sourire plus d'un cosmologiste.

La crise de maturité de la cosmologie observationnelle fait l'objet des deux premiers articles de ce mini-dossier.

Robert Caldwell et Marc Kamionkowski montrent comment le satellite MAP et ses successeurs apporteront les données qui consolideront les fondements de la théorie de l'inflation, théorie bien acceptée, mais pour laquelle les preuves sont ténues. Trois astrophysiciens appartenant à l'équipe de MAP, Charles Bennett, Gary Hinshaw et Lyman Page exposent brièvement les principes de leur dispositif, qui devra repérer un signal minuscule parmi des myriades de signaux parasites.

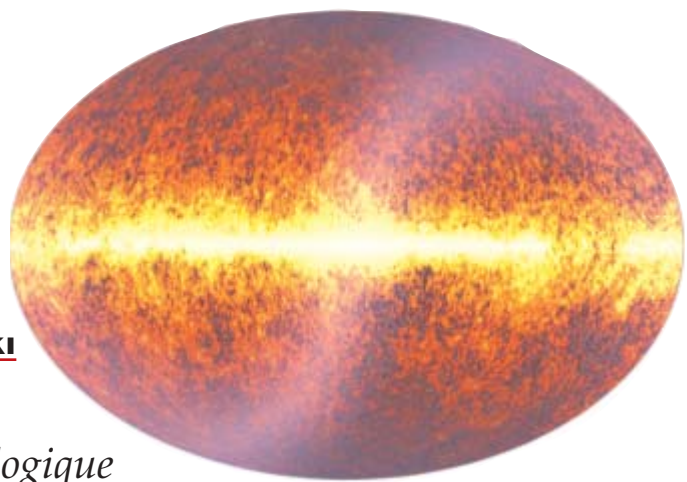
Le troisième article décrit comment la révolution cosmologique est entrée dans une nouvelle phase. Il ne suffit pas que les observateurs aient établi que l'expansion de l'Univers accélère, encore

faut-il que les théoriciens expliquent cette accélération. Depuis Einstein qui avait postulé que l'énergie du vide est constante, on admettait son hypothèse de la constante cosmologique. Aujourd'hui cette hypothèse est minée par les paradoxes, et divers astronomes, dont Jeremiah Ostriker et Paul Steinhardt lui cherchent une remplaçante, une nouvelle source d'énergie étrange, nommée «quintessence». Une des vertus de la quintessence est de réconcilier l'accélération de l'expansion de l'Univers et la vie, deux concepts qui semblent inconciliables : l'accélération serait inéluctable et catastrophique, au point qu'aucune créature vivante ne pourrait en réchapper. Heureusement, la quintessence laisse entrevoir la possibilité d'une évolution plus heureuse de l'Univers. Enfin James Peebles, le père fondateur de la cosmologie moderne, disserte sur ces nouvelles théories, tandis que João Magueijo, échafaudé d'autres théories encore. Quelles que soient les découvertes à venir et les futures théories qui seront élaborées, toutes les turbulences cosmologiques récentes nous ont au moins appris qu'il ne faut rejeter aucune hypothèse.

Les échos du Big Bang

ROBERT CALDWELL • MARC KAMIONKOWSKI

Les empreintes laissées par les ondes gravitationnelles dans le fond diffus cosmologique qui baigne l'Univers détiennent peut-être les clés de son origine.



Aujourd'hui encore, les cosmologistes posent les mêmes questions que les tout premiers astronomes. Quelle est l'origine de l'Univers? Comment est-il parvenu à son état actuel? Quel est son avenir? Bien que les théoriciens spéculent depuis fort longtemps sur l'origine du cosmos, ils n'avaient que peu d'informations sur ses premiers instants pour tester leurs hypothèses. Depuis peu, les astrophysiciens disposent d'une méthode d'observation de l'Univers dans sa phase primordiale, celle où il se trouvait une fraction de seconde après le Big Bang. Ils identifient les traces d'ondes gravitationnelles dans le fond diffus cosmologique micro-onde : un rayonnement micro-onde à 2,7 kelvins qui baigne l'Univers depuis 15 milliards d'années et se refroidit au cours de son expansion.

Le fond diffus cosmologique a été émis environ 500 000 ans après le Big Bang, quand les protons et les électrons de la soupe primordiale se sont combinés pour former les atomes d'hydrogène (ce que les astrophysiciens nomment la «recombinaison»). Ce rayonnement est la pierre de Rosette de la cosmologie, car il nous donne une photographie de l'Univers primordial. En 1965, Arno Penzias et Robert Wilson, de la Société Bell, ont découvert le fond diffus cosmologique. Les astrophysiciens qui l'étudient ont mesuré que sa température est proche de 2,7 kelvins, quelle que soit la direction d'observation. Ainsi le fond diffus cosmologique isotrope semblait indiquer que l'Univers primitif était extrêmement uniforme. Dans les années 1990, le satellite d'observation

du fond diffus cosmologique COBE (*Cosmic Background Explorer*) a détecté d'infimes variations (de l'ordre de un cent-millième) dans la température du rayonnement. Ces fluctuations témoignent de l'existence de «grumeaux» dans le plasma primordial. Ces hétérogénéités ont ensuite évolué par effondrement gravitationnel pour former les grandes structures du cosmos : les galaxies et les amas de galaxies qui constituent notre Univers actuel.

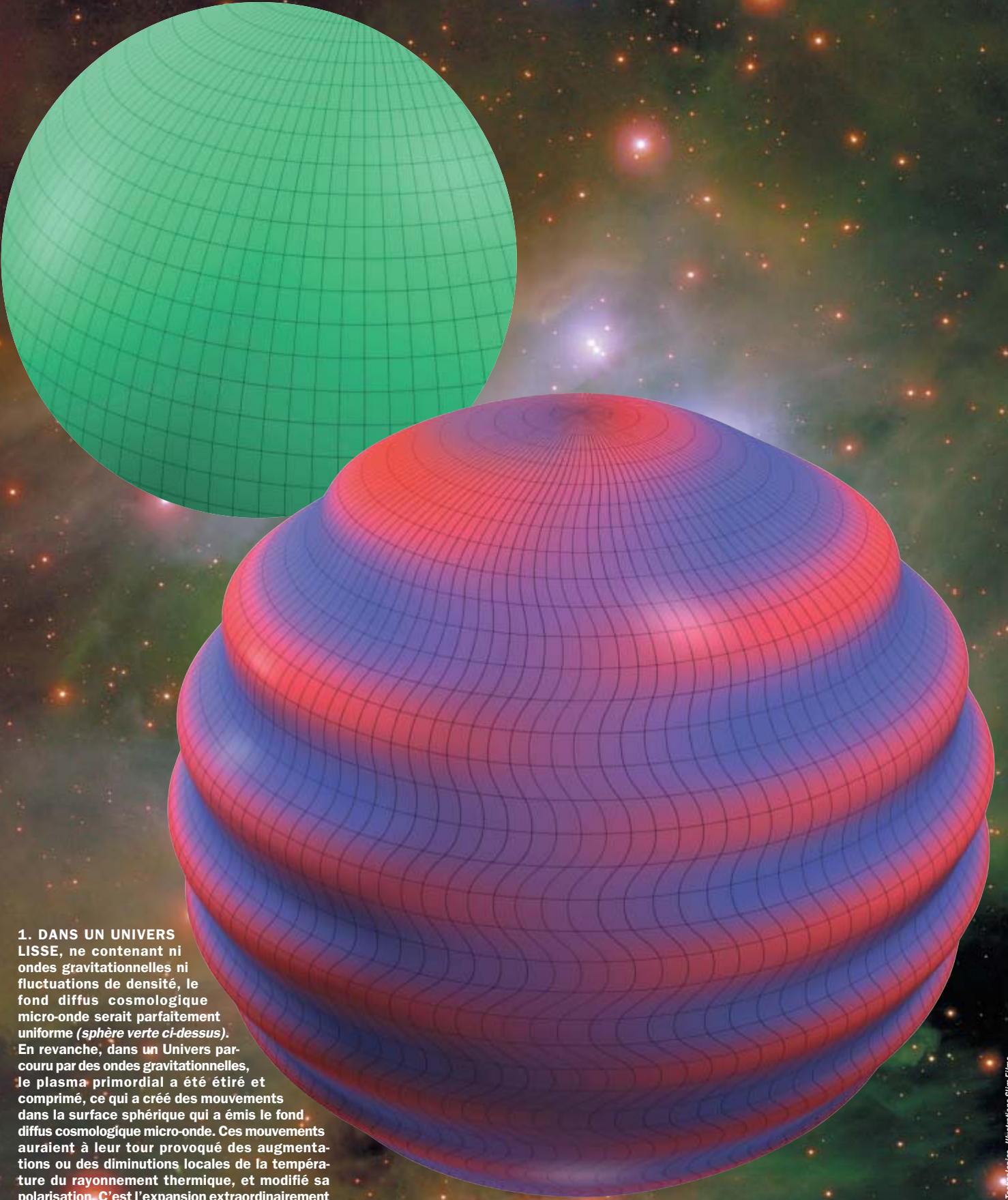
Mine d'observations sur l'Univers

Grâce à des détecteurs au sol ou embarqués à bord de ballons, les astrophysiciens ont mesuré à la fin des années 1990 le fond diffus cosmologique micro-onde avec une résolution angulaire bien supérieure à celle de COBE. Ils ont mis en évidence des structures dans le plasma primordial d'un diamètre apparent inférieur à un degré sur la sphère céleste (le diamètre apparent de la lune est d'un demi degré). On déduit de la taille de ces structures que l'Univers est très plat. Ces observations s'accordent aussi avec la théorie de l'inflation, selon laquelle une phase d'expansion extrêmement rapide s'est produite juste après le Big Bang. Cette année, la NASA a prévu de lancer le satellite MAP qui cartographiera les variations de température du fond diffus cosmologique dans tout l'espace (voir l'article *Un cartographe cosmique*, page 42). Prévu pour 2007, le satellite Planck de l'Agence spatiale européenne produira une carte encore plus fine de la voûte céleste. Les cosmologistes s'attendent à tirer de ces

observations une mine d'informations sur l'Univers primordial.

Les astrophysiciens espèrent trouver des preuves directes d'une période d'inflation. La plus évidente – aussi évidente que celle du pistolet qui fume encore après le coup qui vient d'être tiré – serait l'observation des ondes gravitationnelles, dont Albert Einstein a prédit l'existence dans le cadre de sa théorie de la relativité générale. Ces ondes sont l'équivalent des ondes électromagnétiques qui, tels les rayons X, les ondes radio ou la lumière visible, perturbent le champ électromagnétique : les ondes gravitationnelles perturbent le champ de gravitation. Comme la lumière ou les ondes radio, les ondes gravitationnelles véhiculent l'énergie et l'information que leur a communiquées la source qui les a produites. De plus, elles se propagent sans entrave à travers les matériaux qui absorbent les ondes électromagnétiques. Ainsi, les ondes gravitationnelles permettent aux astrophysiciens d'observer des phénomènes qui seraient «invisibles» sinon, exactement comme les rayons X rendent les tissus transparents aux médecins qui les examinent. Toutefois, personne n'en a encore détecté directement, même si les observations astronomiques ont montré que certains objets doubles, tels que des paires d'étoiles à neutrons ou des trous noirs engendrent des ondes gravitationnelles quand ils spiralent.

Le plasma qui a rempli l'Univers pendant ses 500 000 premières années était opaque au rayonnement électromagnétique, car tout photon émis y était instantanément diffusé dans la



1. DANS UN UNIVERS LISSE, ne contenant ni ondes gravitationnelles ni fluctuations de densité, le fond diffus cosmologique micro-onde serait parfaitement uniforme (*sphère verte ci-dessus*). En revanche, dans un Univers parcouru par des ondes gravitationnelles, le plasma primordial a été étiré et comprimé, ce qui a créé des mouvements dans la surface sphérique qui a émis le fond diffus cosmologique micro-onde. Ces mouvements auraient à leur tour provoqué des augmentations ou des diminutions locales de la température du rayonnement thermique, et modifié sa polarisation. C'est l'expansion extraordinairement rapide de l'Univers, juste après le Big Bang, qui serait à l'origine des ondes gravitationnelles. Ci-dessus, on a simulé les effets d'une onde gravitationnelle qui se propage d'un pôle à l'autre, avec une longueur égale au quart du rayon de cette sphère (*sphère rouge ci-dessus*).

soupe des particules subatomiques. C'est pourquoi les astronomes ne peuvent observer de signal électromagnétique antérieur au fond diffus cosmologique. Or la théorie de l'inflation prévoit que la brusque expansion de l'Univers, qui aurait eu lieu 10^{-38} seconde après le Big Bang, a produit des ondes gravitationnelles qui, elles, pouvaient traverser le plasma. Si c'est exact, ces ondes se sont propagées dans l'Univers primordial et, 500 000 ans plus tard, ont laissé, dans le fond diffus cosmologique, d'infimes perturbations observables aujourd'hui (voir la figure 2).

Ondes et inflation

Pour comprendre comment l'inflation a produit des ondes gravitationnelles, penchons-nous sur l'une des conséquences fascinantes de la mécanique

quantique : le vide n'est pas totalement vide. Des paires virtuelles constituées d'une particule et d'une antiparticule y sont créées et annihilées en permanence. Selon le principe d'incertitude de Heisenberg, une paire peut naître du vide avec une énergie ΔE et persister pendant une durée Δt , pourvu que $\Delta E \cdot \Delta t$ soit inférieur à $\hbar/2$, où $\hbar$ est la constante de Planck réduite.

Le graviton, la particule quantique associée aux ondes gravitationnelles (l'analogie du photon des ondes électromagnétiques), est aussi soumis à ce principe. Des paires de gravitons virtuels jaillissent en permanence du vide avant de disparaître. L'expansion de l'Univers a été si rapide pendant la phase d'inflation que des paires de gravitons ont été séparées avant de s'être annihilées. Des particules virtuelles sont ainsi devenues des particules réelles. L'expansion ultra-rapide de l'Univers

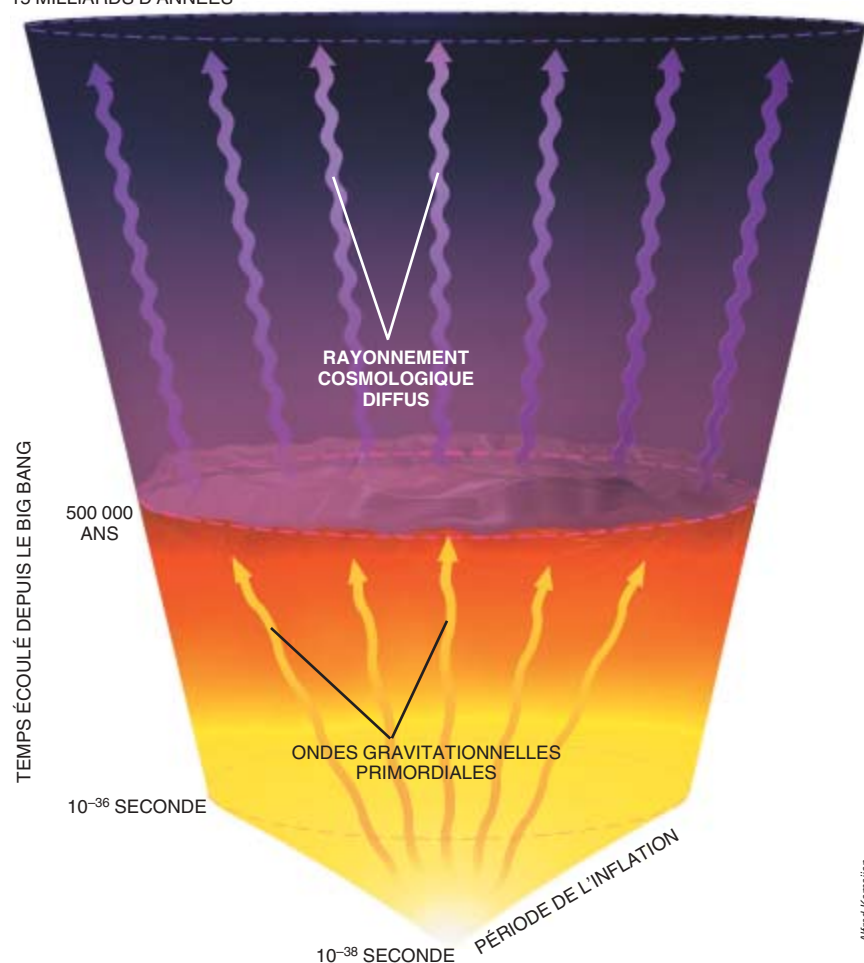
a aussi modifié les longueurs d'onde associées à ces gravitons, les faisant passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Ainsi, l'inflation aurait pompé de l'énergie dans le vide pour produire des gravitons et créé de la sorte tout un spectre d'ondes gravitationnelles caractéristiques de l'état de l'Univers, juste après le Big Bang. Si les ondes gravitationnelles dues à l'inflation existent, elles sont la relique la plus ancienne de l'Univers primordial : elles auraient 500 000 ans de plus que le fond diffus cosmologique !

Alors que les longueurs d'onde du rayonnement cosmologique sont confinées dans un petit intervalle – entre un et cinq millimètres, avec un maximum vers deux millimètres – celles des gravitons issus de l'inflation couvrent un vaste domaine, entre un centimètre et 10^{23} kilomètres, la taille de l'Univers observable aujourd'hui ! Selon la théorie de l'inflation, les ondes gravitationnelles les plus intenses ont les plus grandes longueurs d'onde, et leur intensité dépend du taux d'expansion de l'Univers inflationniste. Ce taux est proportionnel à l'énergie mise en jeu pendant l'inflation, elle-même déterminée par la température de l'Univers au début de l'inflation. Ainsi, l'intensité des ondes gravitationnelles dépend du moment où l'inflation a commencé.

10⁻³⁸ seconde après le Big Bang

Malheureusement, les cosmologistes ne connaissent pas avec précision cet instant, car ils ignorent ce qui a déclenché l'inflation. Pour certains théoriciens, elle aurait commencé quand trois des interactions fondamentales – l'interaction forte, l'interaction faible et l'interaction électromagnétique – se sont dissociées, peu après la naissance de l'Univers. Unifiées au tout début de l'Univers, ces trois « forces » se seraient différenciées quelque 10^{-38} seconde après le Big Bang, événement à l'origine de l'expansion. Si cette théorie est correcte, l'échelle d'énergie associée à l'inflation aurait été de l'ordre de 10^{15} à 10^{16} gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt est l'énergie qu'un proton acquiert quand il est accéléré sous une différence de potentiel de un milliard de volts). Les plus gros accélérateurs atteignent actuellement des énergies de 10^3 gigaélectronvolts). En revanche, si l'inflation a été déclenchée

15 MILLIARDS D'ANNÉES



2. LES MÉCANISMES QUANTIQUES qui se sont produits durant la phase d'inflation – une expansion explosive de l'Univers qui a eu lieu juste après le Big Bang – ont engendré tout un spectre d'ondes gravitationnelles. Ces dernières se sont propagées quelque 500 000 ans dans le plasma primordial jusqu'à l'émission du fond diffus cosmologique, qu'elles ont distordu. Les astrophysiciens espèrent détecter ces distorsions dans le fond diffus cosmologique d'aujourd'hui.

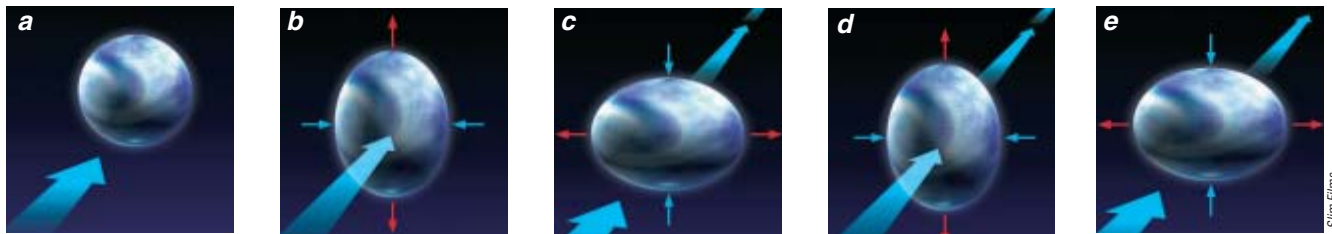
ultérieurement par un autre mécanisme, l'intensité des ondes gravitationnelles serait moindre.

Depuis qu'elles ont été produites une fraction de seconde après le Big Bang, les ondes gravitationnelles de l'inflation se propagent dans l'Univers. Comment les astronomes peuvent-ils les observer? Rappelons d'abord comment un récepteur reçoit un signal radio. Les ondes radio, constituées de l'association d'un champ magnétique et d'un champ électrique oscillants, font osciller les électrons de l'antenne du récepteur. Ce mouvement produit un courant électrique que le récepteur enregistre. De même, une onde gravitationnelle déforme l'espace qu'elle traverse, lui faisant subir des compressions et des étirements oscillants. De telles oscillations devraient entraîner de petits déplacements

de masses que l'on arrangerait habilement pour qu'elles «flottent» librement. Dès la fin des années 1950, le physicien Hermann Bondi, à Londres, tenta de convaincre ses collègues sceptiques de la réalité des ondes gravitationnelles en concevant le premier détecteur d'ondes gravitationnelles. Ce dispositif conceptuel était constitué d'une paire d'anneaux à cheval sur une tige rigide. Traversant ce système, une onde gravitationnelle d'amplitude h et de fréquence f contracterait la distance L qui sépare les anneaux d'un facteur $h \times L$, à la fréquence f . La quantité de chaleur libérée par le frottement des anneaux sur la tige prouverait que les ondes gravitationnelles véhiculent de l'énergie.

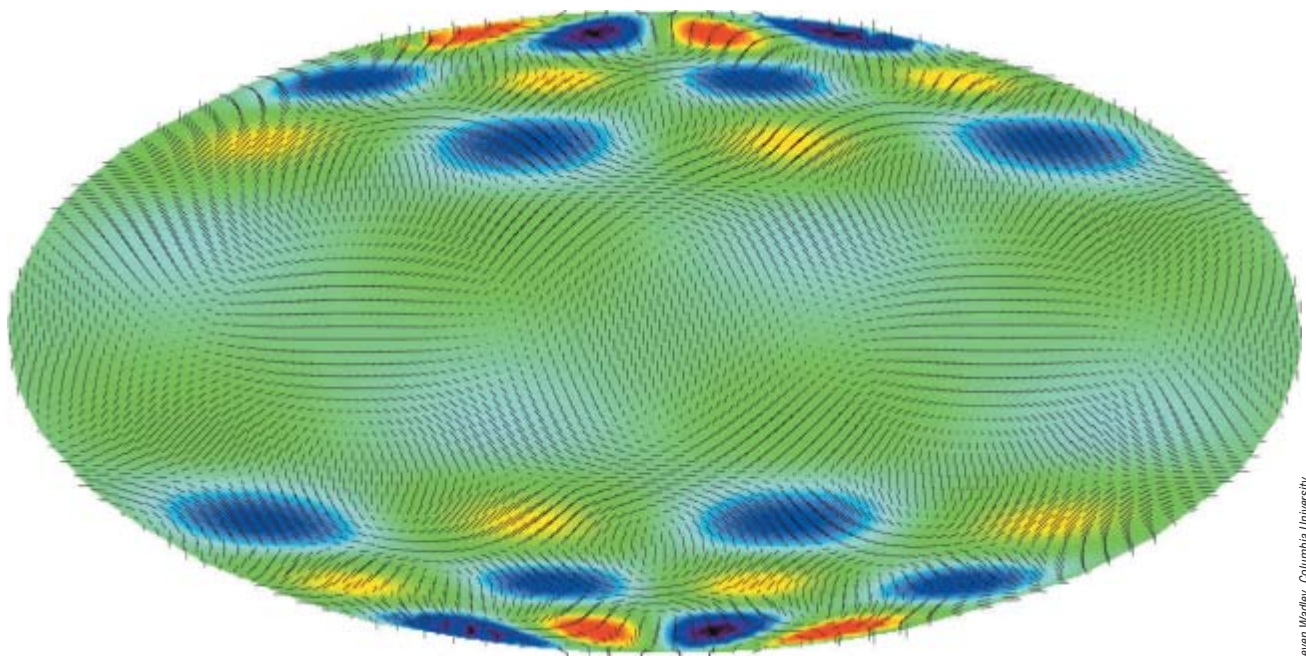
Le système idéal de Bondi n'a jamais conduit à la découverte des ondes gravitationnelles. Aujourd'hui, les astro-

physiciens construisent des détecteurs d'ondes gravitationnelles toujours plus élaborés; ils mesurent les déplacements minuscules de masses suspendues à l'aide de lasers (voir l'encadré de la page 40). Notons que la distance entre ces masses détermine le domaine des longueurs d'onde que le système peut détecter. Ainsi, dans le plus grand des détecteurs au sol, les masses sont séparées de quatre kilomètres, ce qui autoriserait la détection des oscillations dues à des ondes gravitationnelles dont la longueur d'onde serait comprise entre 30 et 30 000 kilomètres. Un dispositif spatial capable de détecter des longueurs d'onde 1 000 fois plus grandes est à l'étude. Les longueurs des ondes gravitationnelles résultant de la coalescence d'étoiles à neutrons ou de la collision de trous noirs sont situées dans cet intervalle et pourraient donc être



3. LES ONDES GRAVITATIONNELLES n'ont jamais été observées, mais la théorie prédit qu'elles étirent et compriment l'espace qu'elles parcourent. Ainsi, une onde gravitationnelle qui traverse une masse sphérique (a), l'étire d'abord dans une certaine direction avant de la comprimer dans la direction perpendiculaire (b). Puis, les deux effets s'inversent (c), de sorte que la

surface de la masse oscille à la fréquence de l'onde (d et e). Les distorsions représentées ci-dessus sont très exagérées; les ondes gravitationnelles sont trop faibles pour produire des effets directs mesurables. Les physiciens tentent donc d'observer les traces qu'elles auraient laissées dans le fond diffus cosmologique (ci-dessous).



4. LES ONDES GRAVITATIONNELLES DE L'INFLATION ont peut-être laissé leurs empreintes dans le fond diffus cosmologique. Cette carte de la sphère céleste simule les variations de la température et de la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde, qui résulteraient

de microperturbations au sein du plasma primordial. Les taches rouges et bleues représentent des régions plus chaudes et plus froides du fond diffus cosmologique micro-onde; les petits segments représentent l'orientation de la polarisation du fond diffus cosmologique sur le plan du ciel.

détectées par ces nouveaux instruments. En revanche, les ondes gravitationnelles issues de l'inflation dont les longueurs d'onde sont dans cet intervalle ont une amplitude bien trop faible pour être détectées de cette façon.

Les ondes gravitationnelles les plus intenses issues de l'inflation ont des longueurs d'onde comparables au diamètre de l'Univers observable. Pour les détecter, les astronomes doivent utiliser des masses flottant librement à des distances du même ordre ! *A priori*, cela semble impossible, mais, par hasard, la nature nous offre une configuration de ce type : le plasma primordial d'où est né le fond diffus cosmologique. Durant les 500 000 premières années qui ont séparé l'inflation

de l'émission du fond diffus cosmologique, les ondes gravitationnelles à très grandes longueurs d'onde se sont propagées l'Univers, étirant ou comprimant le plasma primordial (voir la figure 4). Le phénomène se traduit aujourd'hui par de faibles décalages Doppler dans le fond diffus cosmologique, que les astrophysiciens peuvent observer. Ainsi, si, au moment où le fond diffus cosmologique a été émis, une onde gravitationnelle était en train d'étirer une région du plasma dans notre direction – c'est-à-dire dans la direction de l'Univers qui allait devenir notre Galaxie –, le rayonnement provenant de cette région est décalé vers les longueurs d'onde plus courtes, c'est-à-dire vers le bleu (voir la figure 5) : la

température y est supérieure. Inversement, si, au moment de l'émission du fond diffus cosmologique, une onde gravitationnelle était en train de comprimer une région de plasma en l'éloignant de nous, le rayonnement issu de cette région est décalé vers les plus grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge (voir la figure 5) : la température y est inférieure. En relevant les points chauds et froids du fond diffus cosmologique, les astronomes découvriront peut-être la signature laissée par les ondes gravitationnelles issues de l'inflation. L'Univers entier deviendrait une sorte de détecteur géant d'ondes gravitationnelles.

Malheureusement, l'Univers n'est pas un endroit simple. Comme nous

Chasseurs d'ondes

Selon la théorie, les ondes gravitationnelles issues de l'inflation ne seraient pas les seules à parcourir l'Univers. Plusieurs phénomènes astrophysiques, tels les étoiles binaires, les étoiles à neutrons qui coalescent ou encore des trous noirs qui entrent en collision, émettent aussi des ondes gravitationnelles de forte amplitude. La relativité générale prévoit que ce type d'ondes est produit par tous les systèmes physiques dont les mouvements internes n'ont pas une symétrie sphérique. Contrairement à une étoile isolée, deux étoiles en rotation l'une autour de l'autre produisent de telles ondes.

L'atténuation de ces ondes lors de leur propagation rend leur détection difficile. Bien que la coalescence de deux étoiles à neutrons ou la collision de deux trous noirs figurent parmi les cataclysmes les plus violents de l'Univers, les ondes gravitationnelles émises lors de ces événements sont à peine perceptibles quand elles nous parviennent après avoir parcouru des centaines de millions d'années-lumière. Prenons un exemple : celui de la collision de deux trous noirs situés à un milliard d'années-lumière. Les calculs montrent que l'onde gravitationnelle issue de cette collision modifierait la distance entre deux masses libres de se mouvoir de un millimètre si elles étaient séparées de un million de milliards de kilomètres (10^{-21}).

Pour mesurer d'aussi infimes oscillations, les physiciens ont construit l'Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*). Construit sur deux sites, l'un à Livingston, en Louisiane, l'autre à Hanford, dans l'État de Washington (voir les photographies ci-contre).

Sur chaque site, deux tuyaux longs de quatre kilomètres se joignent à angle droit pour former un L gigantesque. Dans chacun d'eux, des faisceaux laser se réfléchissent entre des miroirs de haute qualité. En réglant les différents paramètres pour que les lasers interfèrent, les physiciens devraient mettre en évidence des variations de la distance qui sépare les miroirs de l'ordre de 10^{-17} centimètre, environ le milliardième du diamètre de l'atome d'hydrogène ! Les résultats obtenus simultanément à Livingston et à Hanford seront comparés de façon à ce que les signaux qui pourraient être confondus avec des ondes gravitationnelles soient éliminées (par exemple, une activité sismique, des ondes acoustiques, les instabilités du laser).

D'autres physiciens construisent des détecteurs plus petits, prévus pour fonctionner de concert avec LIGO : TAMA près de Tokyo, Virgo près de Pise et GEO près de Hanovre. Ils permettront de repérer la source d'éventuels émetteurs d'ondes gravitationnelles par la méthode de triangulation. La NASA et l'Agence spatiale européenne mènent aussi un projet commun pour détecter les ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde. Elles prévoient d'envoyer dans l'espace l'interféromètre spatial LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) vers 2010. Ce détecteur sera constitué de trois satellites identiques placés aux sommets d'un triangle 0, entre lesquels un faisceau laser parcourra cinq millions de kilomètres. Malheureusement, aucun de ces instruments ne sera assez sensible pour détecter les ondes gravitationnelles produites par l'inflation. Seul le fond diffus cosmologique pourrait nous les révéler.

LIVINGSTON, LA.



Alex Desselle, Skyview Technologies

HANFORD, WASH.



G. White

l'avons souligné, les hétérogénéités de la distribution des masses dans l'Univers primordial ont aussi causé des variations de température dans le fond diffus cosmologique. Ainsi, le champ gravitationnel des régions les plus denses du plasma a pu décaler vers le rouge les photons émis par ces régions, perturbant localement la température. Si les cosmologistes se contentaient de mesurer la température du fond diffus cosmologique, ils ne sauraient établir la part des ondes gravitationnelles dans les variations observées par COBE ou par les autres détecteurs. Or, on sait que les variations dues aux ondes gravitationnelles ne sont responsables, au maximum, que d'un cent millièmes des variations observées. Ce fait impose une limite physique sur l'énergie qui a engendré l'inflation : elle n'a pu excéder 10^{16} gigaélectronvolts, et, par conséquent, n'a pu commencer que 10^{-38} seconde après le Big Bang.

Comment les cosmologistes peuvent-ils améliorer leurs estimations ? Comment confirmer l'origine des fluctuations de température ? C'est la polarisation du fond diffus cosmologique qui fournit la réponse à ces questions. Toute onde lumineuse qui se réfléchit sur une surface selon une direction qui fait un angle droit avec la direction du faisceau incident est polarisée, c'est-à-dire que les ondes s'orientent selon une direction privilégiée. Les verres de lunettes polarisés sont fondés sur ce principe : ils réduisent l'intensité lumineuse en bloquant la lumière polarisée horizontalement à celle qui est réfléchie par le sol. Le fond diffus cosmologique est polarisé lui aussi. Juste avant que l'Univers ne devienne transparent au rayonnement, les photons du fond diffus cosmologique ont été diffusés une dernière fois par les électrons du plasma. Quand ces diffusions se sont produites sous de grands angles, certains de ces photons ont été polarisés.

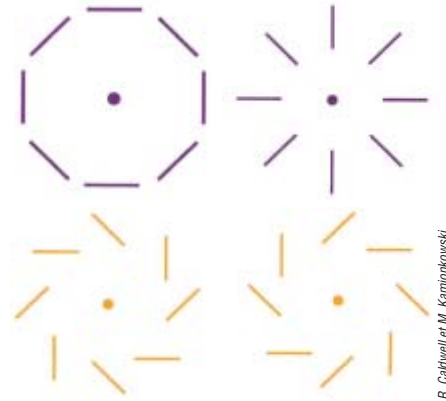
On devrait pouvoir détecter les ondes gravitationnelles dues à l'inflation, car les mouvements du plasma dus aux ondes gravitationnelles ont donné des motifs de polarisation différents de ceux que créent des fluctuations de la densité massique. La raison en est simple. Représentons par de petits segments l'angle de polarisation du fond diffus cosmologique dans chaque région du ciel (voir la figure 5). Ces segments s'agencent sous forme d'anneaux, d'étoiles, ou de tourbillons, lesquels tournent soit vers la droite, soit vers la gauche.

Cette orientation des tourbillons indique leur origine. Des fluctuations de densité dans la masse du plasma primordial n'auraient pu produire de tels motifs de polarisation, car les régions denses ou peu denses du plasma étaient dépourvues d'orientation vers la droite ou vers la gauche. Les ondes gravitationnelles, en revanche, sont polarisées. C'est pourquoi les motifs de polarisation créés par les ondes gravitationnelles sont la superposition de nombreux tourbillons de tailles et de sens variés.

Même un observateur entraîné ne pourrait deviner à l'œil nu si un diagramme de polarisation de l'espace contient des motifs en tourbillons. Toutefois, grâce à une forme particulière d'analyse de Fourier, les astrophysiciens décomposent un motif de polarisation en ses composantes. Ainsi, si les cosmologistes parviennent à mesurer la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde et déterminent la proportion des motifs en tourbillons, ils pourront en déduire l'amplitude des ondes gravitationnelles de très grandes longueurs d'ondes issues de l'inflation. Ils en déduiront également l'énergie liée à l'inflation (ou du moins son ordre de grandeur), puisque l'amplitude des ondes gravitationnelles qui en sont issues en découle directement. Ils sauront alors si c'est bien la différenciation des forces fondamentales qui a déclenché l'inflation.

Analyser la polarisation

Quand sera-t-on en mesure d'analyser les motifs de polarisation ? Le satellite MAP de la NASA et nombre d'autres détecteurs au sol ou embarqués dans des ballons devraient bientôt mesurer, pour la première fois, la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde. Toutefois, ces instruments ne seront probablement pas assez sensibles pour détecter la composante due aux ondes gravitationnelles de l'inflation. Les expériences suivantes fourniront sans doute plus d'informations. Si l'inflation a bien été déclenchée par l'unification des forces fondamentales, le signal des ondes gravitationnelles sera peut-être assez intense pour être détecté par le satellite européen Planck. À moins qu'une nouvelle génération d'instruments encore plus sensibles ne soit nécessaire... En revanche, si l'inflation résulte d'autres phénomènes physiques plus tardifs et moins énergétiques, le signal laissé par les ondes gravitationnelles émises dans



R. Caldwell et M. Kamionkowski

5. LA POLARISATION du rayonnement cosmologique diffus devrait nous renseigner sur les premiers instants de l'Univers. Des fluctuations de densité du plasma primordial auraient créé des motifs de polarisation en anneau ou en étoile (*en haut*) ; les ondes gravitationnelles, au contraire, auraient produit des tourbillons gauches ou droits (*en bas*).

ces conditions serait trop faible pour être détecté dans un avenir proche.

Réduits à des spéculations quant à l'origine de l'inflation, les cosmologistes ne peuvent prédire avec certitude l'amplitude du signal de polarisation laissé par les ondes gravitationnelles de l'inflation. Toutefois, même s'il n'y a qu'une toute petite chance qu'un tel signal soit mesurable, alors on doit tenter de le détecter. Sa mesure serait une validation incontestable de la théorie de l'inflation et nous permettrait de remonter à la naissance de l'Univers, ou presque : 10^{-38} seconde après le Big Bang. Aurons-nous alors la réponse à la question qui taraude l'homme depuis toujours : d'où vient l'Univers ?

Robert CALDWELL est maître de conférences en physique et en astronomie à l'Université de Dartmouth. Marc KAMIONKOWSKI est professeur de physique théorique et d'astronomie à l'Institut de technologie de Californie.

Robert R. CALDWELL, Marc KAMIONKOWSKI et Leven WADLEY, *First Space-Based Gravitational-Wave Detectors*, in *Physical Review D*, vol. 59, Issue 2, pp. 27101-27300, 15 janvier 1999.

La révolution cosmologique, Mini-dossier, in *Pour la Science*, mars 1999.

Les missions MAP et Planck sont détaillées sur le site map.gsfc.nasa.gov/ ; astro.estec.esa.nl/astrogen/planck/mission_top.html

Pour plus d'informations sur les détecteurs d'ondes gravitationnelles, consulter le site :

www.ligo.caltech.edu/lisa.jpl.nasa.gov

Cartographe cosmique

CHARLES BENNETT • GARY HINSHAW • LYMAN PAGE

Le satellite MAP de la NASA mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, afin de fournir aux cosmologistes une vision plus précise de l'Univers primordial.

Durant l'été prochain, la NASA prévoit d'envoyer dans l'espace un satellite de 830 kilogrammes et de 4 mètres de hauteur : MAP (de l'anglais *Microwave Anisotropy Probe*, c'est-à-dire sonde de l'anisotropie micro-onde). La sonde mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique ; elle devrait atteindre l'orbite qui lui est assignée autour du Soleil – à 1,5 million de kilomètres au dessus de l'orbite terrestre – en trois mois. Elle commencera alors une mission d'observation de deux ans de tous les détails du fond diffus cosmologique micro-onde. Ce dernier a été émis il y a environ 15 milliards d'années et n'a pas été modifié depuis. Si l'on parvient à le cartographier, on disposera d'une photographie de l'Univers primordial. En étudiant cette carte, les cosmologistes détermineront la composition de l'Univers, sa géométrie et son histoire.

Comme son nom l'indique, la sonde MAP mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique micro-onde, c'est-à-dire les infimes variations de sa température en fonction de la direction d'observation. MAP sera assez sensible pour enregistrer des différences de température d'un vingt millionième de kelvin de part et d'autre de la température moyenne de 2,73 kelvins. Encore plus intéressant, la sonde déterminera la position des points chauds et froids sur le plan du ciel avec une résolution angulaire de 0,23 degré, y réalisant un million de mesures en tout. Ainsi, MAP fournira une carte du fond diffus cosmologique beaucoup plus détaillée que les mesures réalisées au début des années 1990 sur l'ensemble de la voûte céleste par le satellite COBE (ce dernier avait une résolution angulaire de sept degrés seulement).

Les performances de MAP résultent de l'utilisation de deux télescopes micro-ondes adossés l'un à l'autre, afin

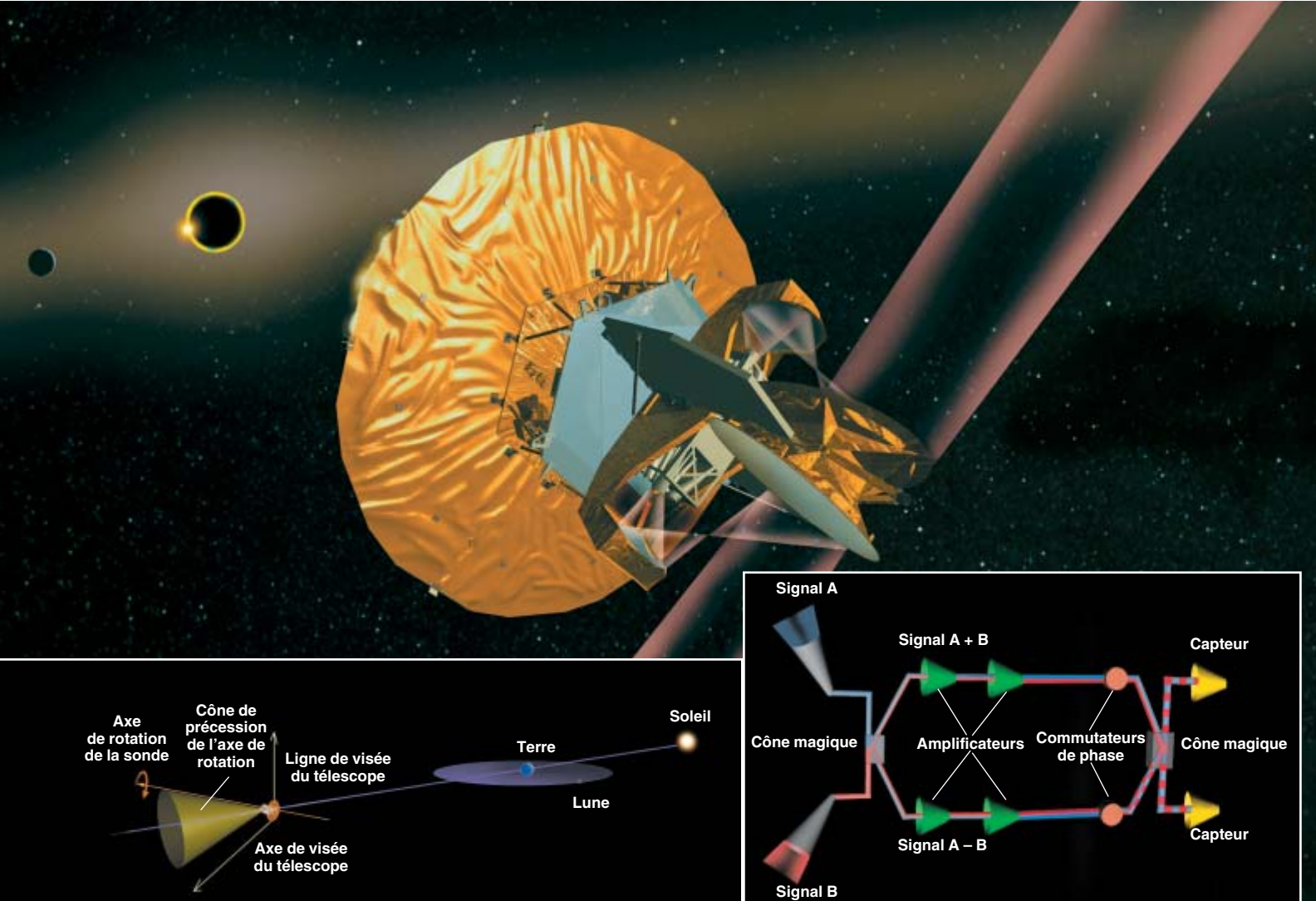
de focaliser le rayonnement incident. Le signal recueilli par chacun des télescopes sera exploité par des systèmes d'acquisition différentiels, conçus pour analyser cinq bandes de fréquences du fond diffus cosmologique. Plutôt que de mesurer la température absolue du rayonnement, chaque système enregistrera la différence entre les signaux des deux télescopes. Le satellite tourne sur lui-même toutes les deux minutes, et son axe subit un mouvement de précession, c'est-à-dire qu'il décrit un cône autour d'une certaine direction. Les systèmes d'acquisition des données pourront comparer la température de chaque point du ciel à 1 000 autres points, et fourniront des jeux de données imbriqués. Cette stratégie de mesure est analogue à celle d'un cartographe qui préférerait mesurer les différences de hauteur entre les sommets des collines d'un haut plateau plutôt que leurs élévations par rapport au niveau de la mer.

La méthode s'affranchit des perturbations engendrées par les petites variations de la température de la sonde elle-même. Pour étalonner les données, la sonde mesurera en permanence le moment dipolaire du fond diffus cosmologique, c'est-à-dire les modifications de la température du rayonnement dues au mouvement de la Terre à travers l'espace. MAP a été conçu de façon à réduire au minimum la contamination des données par des signaux parasites. Si tout se passe comme prévu, cette sonde devrait fournir une carte du fond diffus cosmologique micro-onde d'une qualité encore inégalée.

Charles BENNETT, Gary HINSHAW et Lyman PAGE font partie de l'équipe qui mène le projet MAP.

LES DEUX TÉLESCOPES DE MAP sont adossés. Ils focalisent le rayonnement micro-onde du fond diffus cosmologique (*les bandes rouges de la figure*) grâce à leurs miroirs primaires et secondaires. Leurs miroirs primaires mesurent 1,6 mètre sur 1,4, et leurs miroirs secondaires ont un mètre de diamètre. À l'arrière des capteurs solaires, un blindage (*en orange*) protège la sonde du rayonnement solaire et de ceux de la Terre et de la Lune, ce qui minimise les signaux parasites qui parviennent aux télescopes. Le rayonnement micro-onde focalisé par chaque télescope pénètre dans dix cônes (*en gris beige sur la figure*), conçus pour recueillir le rayonnement cosmologique dans cinq bandes de fréquences. Les quatre cônes étroits placés au centre enregistrent des longueurs d'onde de l'ordre de trois millimètres. Les cônes plus évasés placés à l'extérieur recueillent le rayonnement micro-onde à 22, 30, 40 et 60 gigahertz. À la base de chaque cône, un dispositif partage le rayonnement en ses deux

composantes de polarisations orthogonales, lesquelles sont ensuite envoyées vers deux systèmes d'acquisition différentiels indépendants. Ces derniers combinent les signaux des deux télescopes *A* et *B* à l'aide d'un instrument optique nommé "cône magique", qui fournit les signaux de sortie $A + B$ et $A - B$. Ceux-ci sont ensuite amplifiés, puis leur phase est permutée. Un autre cône magique les recombine ensuite pour fournir les signaux des télescopes *A* et *B* avant qu'un capteur enregistre leur différence de température. Grâce à cette architecture croisée, chacun des deux amplificateurs agit sur les deux signaux simultanément, ce qui évite l'amplification des erreurs avec celle des signaux. Notons finalement que le poste d'observation de MAP sera proche du point de Lagrange L2, à environ 1,5 million de kilomètres de notre planète, sur l'axe Terre-Soleil. La sonde tournera autour du Soleil à la même vitesse que la Terre, de sorte que l'espace lointain sera sans cesse observable.



Planck, le successeur de MAP

L'Agence spatiale européenne prévoit de lancer en 2007 une mission pour compléter les résultats de MAP. Construit avec la participation des États-Unis et du Canada, le satellite *Planck* cartographiera le fond diffus cosmologique micro-onde dans dix bandes de fréquences (au lieu de cinq avec MAP). À cet effet, il emportera deux instruments : le premier observera le rayonnement de fond entre 30 et 100 gigahertz ; il est en voie de réalisation sous la direction de Nazzareno Mandolesi, de l'Institut Tesre de Bologne. Le second, dont Jean-Loup Puget, de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, supervise la construction, observera entre 100 et 900 gigahertz. Ces instruments mesureront les fluctuations de température (ou anisotropies) du fond diffus cosmologique micro-onde sur toute la voûte céleste avec une sensibilité de l'ordre de 6 millièmes de degré et une résolution angulaire de 0,1 degré. Cette sensibilité et cette résolution sont respectivement trois et deux fois meilleures que celles de MAP.

Les astrophysiciens ont sélectionné les fréquences d'observations de *Planck*, afin de détecter et de mesurer les émissions d'une autre origine que le fond diffus. Elles sont dues, par exemple, à la poussière galactique ou à certaines sources extra-galactiques lointaines, et parasitent le signal cosmologique diffus. Grâce au signal recueilli par *Planck*,

les astrophysiciens détermineront ces émissions parasites avec la plus grande précision possible. Ils obtiendront ainsi une carte d'une qualité inédite du fond diffus cosmologique micro-onde et de sa polarisation.

Planck permettra aux cosmologistes de tester les modèles qui décrivent l'Univers primordial (inflation, défauts topologiques...). De plus, les chercheurs détermineront, grâce aux données du satellite, la valeur des paramètres en fonction desquels sont formulés les différents modèles d'Univers. Ces «paramètres cosmologiques clés» comprennent notamment la constante de Hubble, le paramètre de décélération, la constante cosmologique...

Planck devrait aussi fournir un catalogue complet des amas de galaxies et des galaxies (de l'ordre de plusieurs milliers d'objets). Autant de données grâce auxquelles les astrophysiciens expliqueront mieux les processus de formation et d'évolution de ces grands objets cosmiques. Les observations faites par *Planck* leur permettront aussi de dresser une carte spectrale et spatiale de notre Galaxie, qui ira du domaine radio à l'infrarouge lointain. Les astrophysiciens s'en serviront pour étudier, notamment, les propriétés des poussières de notre Galaxie.

Nabila AGHANIM appartient à l'équipe *Planck* de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay.

