

Comment observe-t-on le fond diffus cosmologique ? Qu'apprend-t-on avec cette observation ?

Jacques Delabrouille

XV^{ème} Festival d'Astronomie de Fleurance, 9 Août 2005

Introduction

Au 4^{ème} siècle avant notre ère, Ératosthène mesura le rayon terrestre avec une méthode toute simple. Simple certes, mais ingénieuse.

Au moment où le soleil est à la verticale de Syène (éclairant le fond d'un puits vertical profond, à midi, un jour particulier de l'année), il n'est pas à la verticale d'Alexandrie, comme en témoigne l'ombre portée des bâtiments. Le rayon de la terre peut être calculé simplement à partir de la mesure de la hauteur d'un obélisque situé à Alexandrie, de la longueur de son ombre, et de la distance d'Alexandrie à Syène. Par cette méthode, Ératosthène mesura le rayon de la terre avec la précision remarquable de 2/1000 (avec de la chance, reconnaissons-le).

Si cette méthode est simple, elle repose sur quelques hypothèses, non évidentes a priori :

- La terre est ronde,
- Le soleil est assez loin pour que ses rayons puissent être considérés comme parallèles,
- Syène et Alexandrie sont à la même longitude (seule façon à l'époque de se synchroniser, midi étant alors au même instant pour les deux villes).

Il est remarquable que cette approche, se basant sur un *modèle*, sur des observations, et sur des notions de mathématiques (avancées pour l'époque) permettant de relier ces observations à la grandeur à mesurer, a permis d'effectuer de façon indirecte la mesure d'une grandeur qu'il n'était pas possible d'appréhender immédiatement. Il n'est manifestement pas possible, par exemple, de se munir d'un mètre et d'aller au centre de la terre pour en mesurer la distance ; Il n'était pas non plus concevable, à l'époque d'Ératosthène, de faire le tour de la Terre pour en mesurer la circonférence, afin d'en déduire le rayon. Conceptuellement donc, cette mesure est très différente de la mesure de la distance entre deux maisons, accessible directement *in situ* et mesurable avec un mètre, par exemple.

Quel rapport avec la cosmologie et le fond diffus cosmologique, objet de cet exposé? Tout simplement le fait que nous aussi allons essayer, en partant d'hypothèses simples, d'observations bien choisies, et d'outils d'analyse mathématiques appropriés, de mesurer quelques paramètres décrivant le monde dans lequel nous vivons : notre Univers.

Connaître notre Univers

L'Univers est bien plus grand que la Terre, peut-être infiniment plus grand. On sait aujourd'hui qu'il est plus grand que 10 milliards d'années lumières, soit environ 10^{26} m. Il est fort possible qu'il soit infini dans une ou plusieurs de ses dimensions, spatiales ou temporelle.

Il n'est pas envisageable pour un observateur de se déplacer suffisamment loin pour constater *in situ* les propriétés de l'Univers à une distance « cosmologique » – ni de se déplacer dans le temps.

Malgré cela, il est possible de mesurer un certain nombre de paramètres et de propriétés de notre Univers, comme sa courbure, sa densité, son âge... Il est possible de prédire son évolution à grande échelle et de connaître son passé. Ces mesures, tout comme celle d'Ératosthène, se basent sur un modèle (de l'Univers, des lois de la physique) et sur des observations qui, dans le cadre de ce modèle, dépendent des paramètres à mesurer. Parmi ces observations, celle du fond diffus cosmologique, rayonnement fossile émis lorsque l'Univers était âgé de 380.000 ans seulement, joue un rôle de toute première importance. Mais avant de discuter de ces observations, il convient de donner quelques bases de cosmologie... Patience donc... et commençons par le commencement.

Un modèle cosmologique

Aujourd'hui, le modèle standard de la cosmologie est relativement bien établi. On sait, à partir de l'observation de la récession des galaxies distantes, qui semblent s'éloigner de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance, que l'Univers est en expansion. Deux objets quelconques abandonnés dans l'espace s'éloignent ainsi à une vitesse v d'autant plus grande qu'ils sont loin l'un de l'autre, selon la loi de proportionnalité $v = H_0 D$, où v est la vitesse en km/s, et D la distance en Mpc (1 Mpc = 1 Mégaparsec = 10^6 parsec $\approx 3.26 \times 10^6$ années lumière) entre les deux objets. La constante de proportionnalité H_0 , nommée constante de Hubble, vaut (aujourd'hui) environ 70 km/s/Mpc. Pour fixer les idées sur la vitesse d'expansion, un calcul simple montre que pour la valeur actuelle d' H_0 , les distances augmentent d'un pour cent en 150 millions d'années environ. Notons que, bien que dénommée « constante », car elle est sensiblement la même pour toutes les galaxies qui ont servi aux observations), cette grandeur varie (assez lentement) dans le temps.

La mesure de la vitesse de récession fait intervenir la mesure du décalage spectral $z = \delta\lambda/\lambda$, interprété comme un décalage Doppler. Ce décalage spectral se mesure à partir de lignes d'émission connues de certains éléments chimiques dans les spectres d'émission des galaxies. Le décalage spectral z , qui est la quantité la plus facile à mesurer (plus facile que la distance, par exemple), est devenu de fait la mesure de distance en cosmologie, car il permet de déduire la vitesse de récession (par Doppler) puis la distance (par la loi de Hubble). De même il permet de dater un événement, puisque la distance est reliée de façon univoque au temps en raison de la vitesse finie de la lumière.

Par ailleurs, l'observation, à l'aide de télescopes, de l'Univers lointain, montre que la matière visible (essentiellement les galaxies) se répartit à peu près uniformément, sans concentration particulière à très grande échelle. Toutes les directions d'observation, par ailleurs, semblent être équivalentes si l'on considère les plus grandes distances (isotropie). Ces observations fondamentales, récession des galaxies, homogénéité et isotropie, permettent d'établir un modèle de base, le modèle du Big-Bang.

A grande échelle, les interactions dans l'Univers sont dominées par les lois de la gravitation. Dans le cadre de la relativité générale, l'équation d'Einstein permet de relier la géométrie de l'espace-temps et son contenu en masse-énergie :

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} + \Lambda$$

Cette équation est conceptuellement très simple (même si les détails des calculs pour son application à des cas concrets sont en général extrêmement compliqués). Le terme de gauche $G_{\mu\nu}$ représente la géométrie de l'espace-temps (sa courbure en chaque endroit et à chaque

instant, décrite mathématiquement par la métrique $g_{\mu\nu}$ dont se déduit le tenseur d'Einstein $G_{\mu\nu}$. La partie de droite comprend le terme $8\pi T_{\mu\nu}$, qui représente le contenu en masse-énergie (décrit par des densités et pressions de matière et rayonnement), et une constante universelle Λ appelée constante cosmologique, qu'il convient de déterminer expérimentalement. Ainsi, l'équation d'Einstein nous dit en substance : La géométrie de l'espace-temps est fixée par son contenu. Ainsi, plus l'Univers est dense, plus sa courbure est grande, par exemple.

L'hypothèse d'homogénéité et d'isotropie permet de donner la forme la plus générale de la métrique qui décrit l'Univers à grande échelle, la métrique de Friedmann-Robertson-Walker:

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) [dr^2/(1-kr^2) + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)]$$

Cette équation donne le carré de la « distance » infinitésimale ds entre deux points de l'espace-temps (deux événements décrits par un point dans l'espace et un temps, e.g. « ici et maintenant »). Le terme de droite comprend le carré dt^2 d'une différence de temps, et le carré $[dr^2/(1-kr^2) + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)]$ d'une distance dans un espace à trois dimensions. Ce second terme est multiplié par un facteur d'échelle $a(t)$ dépendant du temps, qui rend compte de l'expansion de l'espace au cours du temps.

Dans cette expression de la métrique, comme souvent en cosmologie et en relativité générale, on utilise des unités de temps et de distance telles que la vitesse de la lumière, c , est égale à 1. Par exemple, on peut choisir l'année comme unité de temps, et l'année-lumière (au lieu du mètre) comme unité de distance. Dans un espace-temps relativiste à 4 dimensions, dans lequel il n'existe pas de façon unique de définir les directions spatiales et temporelles, il n'y a en effet aucune raison d'attribuer des unités différentes à une direction arbitraire (le temps propre d'un ensemble d'observateurs particuliers) et aux directions « orthogonales » (les directions d'espace).

Le tenseur $T_{\mu\nu}$ peut s'écrire, pour notre Univers, sous la forme $T_{\mu\nu} = \text{diag}[\rho, p, p, p]$, où ρ est la densité et p est la pression. Pour un univers rempli de matière non collisionnelle (c'est à dire de particules de matière qui n'interagissent pas entre elles autrement que par gravitation), la pression p est nulle. Pour du rayonnement (des photons par exemple), $p = \rho/3$. Cette relation entre la densité et la pression est appelée *équation d'état* du fluide.

L'histoire de la constante cosmologique Λ est marquée de nombreux rebondissements. A l'origine, Einstein en avait postulé l'existence afin que son équation soit compatible avec un Univers statique. Lorsque les observations ont démontré que l'Univers est en expansion (et donc en évolution), la constante cosmologique n'était plus logiquement nécessaire dans l'équation, et Einstein l'en a supprimé, qualifiant même son introduction en premier lieu comme « la plus grosse bourde de sa vie ». Aujourd'hui, les observations les plus récentes en cosmologie semblent à nouveau indiquer qu'un terme de ce type est nécessaire dans les équations. Ce point sera abordé un peu plus loin dans cet exposé.

Paramètres cosmologiques

Résumons nous.

Nous avons vu que dans le modèle cosmologique standard, l'Univers est homogène et isotrope, en expansion, et que sa géométrie, décrite par la métrique de Friedmann-Robertson-Walker, est liée à son contenu en matière et énergie et à la constante cosmologique par l'équation d'Einstein. Ceci fait apparaître un certain nombre de paramètres, appelés paramètres cosmologiques, qui décrivent notre Univers dans son ensemble (un peu comme le rayon de la Terre est un des paramètres qui décrivent notre planète de façon macroscopique).

- La constante de Hubble $H_0 = H(t = \text{maintenant})$, qui décrit la vitesse d'expansion

actuelle ;

- Plus généralement, le paramètre d'échelle $a(t)$, qui décrit l'expansion au cours du temps, et qui est lié à la constante de Hubble par $H(t) dt = da/a(t)$;
- k , qui décrit la courbure de l'espace. Pour $k=0$, l'espace est plat (c'est-à-dire, les hypersurfaces spatiales sont Euclidiennes). Pour $k>0$, l'espace a une géométrie sphérique (identique à la « surface » d'une sphère, de dimension 3, dans un espace Euclidien de dimension 4). Pour $k<0$, l'espace est hyperbolique ;
- La constante cosmologique Λ , constante universelle qui, si elle ne s'annule pas, influe sur la gravitation en apparaissant dans l'équation d'Einstein ;
- Le contenu en matière et énergie de l'Univers décrits à grande échelle par une densité globale ρ , et une pression p .

En appliquant l'équation d'Einstein à un Univers homogène et isotrope défini par la métrique et les paramètres ci-dessus, on obtient l'équation de Friedmann :

$$H^2 = 8\pi G \rho/3 - k/a^2 + \Lambda/3$$

Où ρ est la densité, H la constante de Hubble (au temps t , H_0 étant la valeur actuelle de H), k la courbure, et Λ la constante cosmologique. On définit pour chaque type de constituant x de l'Univers le paramètre de densité $\Omega_x = 8\pi G\rho_x/3H^2$. Les paramètres Ω_{total} , Ω_m et Ω_B sont respectivement le paramètre de densité total, le paramètre de densité sous forme de matière, et le paramètre de densité sous forme de baryons (matière « ordinaire », essentiellement protons et neutrons). On définit aussi $\Omega_k = k/a^2H^2$ et $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2$, qui représentent le terme de courbure et d'énergie du vide (constante cosmologique) respectivement.

La mesure de tous ces paramètres, aussi précisément que possible, est l'un des défis de la recherche actuelle en cosmologie. Compte tenu de la relation d'Einstein, deux stratégies peuvent être envisagées : soit il est possible de mesurer directement le contenu en matière et énergie de l'Univers, et l'on peut en déduire sa géométrie, soit on peut mesurer la géométrie, et on en déduit le contenu en matière et énergie. En pratique, les cosmologistes essaient de mesurer les deux, afin de tester la cohérence du modèle, en testant au passage l'applicabilité de l'équation d'Einstein à la Cosmologie.

Les plus vieux photons de l'Univers

Des considérations thermodynamiques simples impliquent que si l'Univers est en expansion, il était plus chaud par le passé, car plus dense. Comme un gaz qui se détend, il se refroidit avec l'expansion. Si l'on remonte suffisamment loin dans le temps, l'Univers était suffisamment dense et chaud pour que l'agitation thermique ionise l'ensemble des atomes. A cette époque, photons, baryons et électrons existaient sous la forme d'un plasma. Les photons étaient alors fortement couplés aux baryons, et l'ensemble des particules interagissant de cette façon étaient forcement (au moins localement) à l'équilibre thermique.

L'Univers se refroidissant, les électrons se sont combinés aux protons et aux noyaux d'Hélium existant dans l'Univers. La matière baryonique a alors quitté l'état plasma pour se mettre dans un état gazeux, essentiellement de l'Hydrogène et de l'Hélium. Cette époque est appelée *recombinaison*, un peu abusivement puisque les électrons se combinent à ce moment pour la première fois aux protons (il n'y a donc pas recombinaison, mais combinaison tout court). Les photons peuvent se propager librement à travers ce gaz sans interagir. Ces photons primordiaux, si le modèle est correct, doivent actuellement encore remplir l'Univers d'un rayonnement « fossile », le fond diffus cosmologique.

Le fond diffus

La détection fortuite (ils testaient une antenne de télécommunications) d'un fond de rayonnement inexpliqué par Arno Penzias et Robert Wilson aux Bell Laboratories en 1965 leur valut le prix Nobel de physique (bien mérité, vu les efforts qu'ils ont fait pour comprendre d'où pouvait bien venir l'excès de bruit de leur antenne), après que la confrontation de cette détection avec les prédictions eut permis d'établir sans ambiguïté qu'il s'agissait bien du fond diffus prévu par la théorie...

Ce fond de rayonnement, qui avait donc été prédit quelques années auparavant, est extraordinairement isotrope, ce qui confirme son origine cosmologique (et non pas, par exemple, une origine galactique). Par ailleurs son spectre, mesuré par l'instrument FIRAS à bord du satellite COBE (années 1990), correspond avec une précision étonnante à celui d'un corps noir à la température de 2,725 K, ce qui confirme que la source des photons était à l'équilibre thermodynamique, comme prévu par le modèle du Big-Bang. A cette température, l'essentiel de l'énergie d'un rayonnement de corps noir se situe dans le domaine de longueur d'onde millimétrique à centimétrique – à des longueurs d'onde proches de celles utilisées pour la télévision Hertzienne et pour les communications avec les mobiles. Ainsi, si vous allumez votre télévision sans régler la fréquence, une fraction de la « neige » aperçue sur l'écran est due, en fait, au fond de rayonnement cosmologique...

Ce rayonnement de corps noir cosmologique constitue le second des trois « piliers » du Big Bang (le premier est la récession des galaxies observée par Hubble ; le troisième, l'abondance des éléments légers produits lors de la nucléosynthèse primordiale, ne sera pas abordé dans ce cours).

Inhomogénéités...

Si l'extraordinaire homogénéité du fond de rayonnement est l'une des preuves éclatantes de son origine cosmologique, elle a commencé par poser deux problèmes de taille.

Tout d'abord, ce rayonnement a été émis lorsque l'Univers était âgé de $t_{\text{dec}} \sim 380.000$ ans environ (à un décalage spectral $z \sim 1100$). Mais à cette époque, les régions de l'Univers distantes de plus de $\sim c \cdot t_{\text{dec}}$ (très grossièrement) n'étaient pas, en principe, causalement connectées. Par quel miracle pouvaient-elles être à la même température partout? Pour sortir de la crise, il faut imaginer un mécanisme pour que ces régions aient été à un moment causalement connectées : l'*inflation*. Selon la théorie, lorsque l'Univers était âgé de $\sim 10^{-34}$ secondes, il a subi une phase d'expansion exponentielle, pendant laquelle sa taille a augmenté d'un facteur $\sim e^{100} = 3 \times 10^{43}$ en un temps de $\sim 10^{-32}$ secondes. Cette période d'« inflation » aurait été engendrée par la présence d'un champ scalaire qui aurait donné une énergie non nulle au vide, jouant le rôle d'une constante cosmologique effective. Grâce à l'inflation, l'ensemble de l'Univers observable aujourd'hui aurait été, *avant*, causalement connecté.

Le deuxième souci que suscite l'extraordinaire homogénéité du CMB est le problème de la formation des structures. Si l'on observe aujourd'hui des galaxies et des amas de galaxies, il doit avoir existé à $z \sim 1000$ des petites inhomogénéités à l'origine de ces structures. Ces petites inhomogénéités devraient laisser leur empreinte sur la température du fond cosmique.

Il a fallu des efforts pour affiner les modèles de formation des structures afin d'arriver à trouver un scénario crédible dans lequel les anisotropies de température ne seraient pas supérieures (relativement au fond uniforme) à quelques 10^{-5} . L'inflation a le bon goût de prédire la présence de petites fluctuations initiales, dues à des fluctuations quantiques pendant la phase inflationnaire.

Formation des structures

Résumons ici en quelques mots le mécanisme de formation des structures observables aujourd'hui : galaxies, amas et super-amas de galaxies...

Selon la théorie, des petites perturbations initiales de densité sont générées aux tous premiers instants de l'Univers. Ces perturbations seraient liées aux fluctuations quantiques du vide pendant l'inflation. La physique de l'inflation est encore assez spéculative. On postule qu'à la sortie de l'inflation est présent un champ de petites fluctuations de densité, bien représentées par un champ aléatoire gaussien de spectre $P(k) \sim k^p$.

Ces petites fluctuations de densité vont évoluer sous l'effet combiné de deux forces qui s'opposent : l'attraction gravitationnelle d'une part tend à faire effondrer la matière et le rayonnement fortement couplés (les photons interagissant avec les électrons libres) dans les surdensités; la pression de radiation d'autre part, étant d'autant plus forte dans une région que celle-ci est dense, va résister à cet effondrement, et joue le rôle de force de rappel. Va alors s'instaurer un régime d'oscillations harmoniques où la densité locale du fluide baryon-photon va osciller dans les puits de potentiel.

Lorsque l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que les électrons et les baryons se combinent en atomes d'hydrogène et d'hélium, les photons deviennent libres de se propager jusqu'à nous. Ces photons constituent le fond de rayonnement cosmologique (ou CMB, pour Cosmic Microwave Background). Les surdensités de leur côté deviennent libres de s'effondrer pour former des structures, galaxies et amas de galaxies, sans pression de rayonnement pour s'opposer à cet effondrement.

L'origine des photons fossiles et anisotropies du fond diffus

Les photons du CMB que nous voyons ont tous été émis à peu près au même moment, à $z \sim 1080$. Ils nous parviennent donc d'une coquille sphérique centrée autour de nous, à une distance égale au temps de propagation de ces photons jusqu'à nous. Cette sphère d'où nous viennent les photons fossiles est appelée la *surface de dernière diffusion*.

Le fond diffus a été émis par de la matière à l'équilibre thermique. Les photons fossiles, qui n'ont pas interagi depuis, ont conservé une distribution de corps noir caractérisée par une température T . En raison du refroidissement dû à l'expansion, cette température de 3000°K à l'origine, est maintenant descendue à $2,7^\circ\text{K}$ environ.

Cependant, les petites surdensités de matière présentes à l'origine doivent avoir perturbé très légèrement cette température, créant de petites inhomogénéités qui devraient être observables, à supposer que nous disposions d'instruments suffisamment sensibles pour le faire.

L'évolution des perturbations initiales de densité jusqu'au moment du découplage instaure en effet, à $z=1080$, des champs de fluctuations de densité locale $\delta\rho$, de fluctuation de température locale δT , et de vitesse locale $\delta\mathbf{v}$. Ces perturbations de température locale intrinsèque, de densité, et de vitesse, vont générer des fluctuations de la température *observable* du fond diffus.

Lorsque l'une des régions de l'Univers à $z=1080$ dont on observe « l'émission » a une température intrinsèque $T = T_{\text{CMB}}(1 + \delta T/T_{\text{CMB}})$, une densité intrinsèque $\rho = \rho_0 + \delta\rho$, et une vitesse particulière $\delta\mathbf{v}$ par rapport au flot de Hubble, la température que nous observons est en effet :

- Décalée, par rapport à la moyenne, de la différence de température d'émission à cet

endroit, dT ;

- décalée par effet gravitationnel en raison de la différence de densité ρ (e.g. les photons sont « redshiftés » en grimant hors des puits de potentiel) ;
- décalée par effet Doppler (en raison de la vitesse radiale de la zone d'émission par rapport à nous).

Enfin, en pratique, la dernière diffusion n'étant pas instantanée, la surface de dernière diffusion a une « épaisseur » $dz \sim 200$. Les photons qui nous viennent d'une direction sont une superposition des émissions intégrées sur l'épaisseur de la surface de dernière diffusion. Cette épaisseur de la surface de dernière diffusion va avoir tendance à lisser les anisotropies à petite échelle angulaire.

Intérêt de la mesure des anisotropies du fond diffus cosmologique

A quoi peut bien servir la mesure des fluctuations de température du fond diffus ?

Ces fluctuations dépendent, comme nous venons de le voir, des conditions physiques qui régnaient au moment de la recombinaison : fluctuations de température et de densité, champ de vitesses. Ainsi, l'observation des fluctuations de température du fond diffus correspond, en quelque sorte, à une photographie des conditions régnant dans l'Univers il y a 13,7 milliards d'années, quand il n'était âgé que de 380.000 ans. La connaissance de ces conditions nous permet de déduire, par exemple, les paramètres cosmologiques qui permettent à l'Univers d'évoluer depuis ce moment jusqu'à l'état observable aujourd'hui. Elle nous permet de déduire, également, les conditions dans l'Univers primordial permettant d'aboutir à la situation observée à $t=380.000$ ans, d'en déduire des propriétés du champ de perturbations primordial, produit au moment de l'inflation, et donc de contraindre les modèles d'inflation, qui mettent en jeu une physique encore assez spéculative. C'est donc un outil de prédilection pour comprendre notre Univers et les lois de la physique qui ont gouverné son évolution dans la première fraction de seconde de son existence.

Afin de donner un exemple concret, considérons le problème de la géométrie de l'espace. Nous avons vu que pour une courbure positive, l'Univers a une géométrie de type sphérique. Pour une courbure nulle, l'Univers est spatialement plat, et pour une courbure négative, l'Univers a une géométrie hyperbolique.

De la géométrie dépend l'angle sous-tendu par un objet placé à une certaine distance. Une structure de taille physique donnée sera vue avec un angle plus grand si l'Univers est « fermé » (géométrie sphérique, courbure positive) que si il est « critique » (géométrie plane, courbure nulle). Elle sera vue avec un angle encore plus petit si l'Univers est « ouvert » (géométrie hyperbolique, courbure négative). Évidemment, l'effet est d'autant plus grand que la courbure est forte. Il est également d'autant plus grand que l'on regarde loin (distances non négligeables par rapport à la courbure). L'idéal, dès lors, serait de disposer, à la surface de dernière diffusion (le plus loin que l'on puisse voir par le biais de l'observation de rayonnement électromagnétique), de structures de taille physique connue (ou en fait telles que le rapport de leur taille à la surface de dernière diffusion serait connue). En mesurant l'angle sous lequel on les voit, on aurait accès à la courbure de notre Univers.

L'idéal donc serait d'observer des structures de taille connue à la surface de dernière diffusion, quand l'Univers était âgé de 380.000 ans. Il se trouve que les plus grandes structures qui auraient eu le temps de se former (par effondrement gravitationnel partiel) à ce moment là doivent avoir une taille d'environ 380.000 années lumière (en simplifiant... le raisonnement détaillé doit prendre en compte la vitesse réelle de propagation de la lumière dans un milieu fortement ionisé, qui est $c/\sqrt{3}$, et de l'expansion). Des structures plus grandes n'auraient pas

eu le temps de se former en 380.000 ans. Ainsi, en observant toutes les fluctuations du fond et en repérant les plus grandes perturbations qui ont eu le temps de se former, on en déduirait la taille angulaire qui correspondrait, à la distance de la dernière diffusion, à une taille physique de 380.000 années lumière. Ceci permettrait de conclure sur la courbure de l'Univers.

En pratique, la distribution des anisotropies de différentes tailles dans le fond diffus se mesure avec le spectre de puissance C_l . Le nombre l , ordre du multipôle, représente l'inverse d'un angle. Les petites valeurs de l correspondent aux grandes échelles (des anisotropies de grande taille angulaire sur le ciel), et les hautes valeurs de l correspondent aux petites échelles (des anisotropies de petite taille). Des structures de taille 1° environ correspondent à un multipôle $l \sim 220$.

Le nombre C_l , qui pour chaque l mesure une quantité proportionnelle au carré de l'amplitude typique des fluctuations de taille $\sim 1/l$ sur le ciel, s'appelle le *spectre de puissance* du champ de fluctuations. La présence d'un pic dans ce spectre de fluctuations signifie que le ciel comprend une majorité de structures de la taille correspondante. Ainsi, le pic de puissance se situant au l le plus bas va correspondre aux plus grandes structures ayant eu le temps de commencer à se former avant la recombinaison. La valeur de l à laquelle se situe ce premier pic va donc nous renseigner sur la courbure de l'Univers (et, du même coup, sur la densité en masse-énergie dans l'Univers, par le biais de l'équation de Friedmann qui relie la courbure à la densité des différents constituants).

La discussion précédente n'est qu'une argumentation approchée, donnant dans ses grandes lignes l'idée qui permet de mesurer la courbure à partir de la position du premier pic acoustique dans le spectre des anisotropies du CMB. Il est possible de mener le même genre de raisonnement qualitatif pour d'autres paramètres cosmologiques. De la teneur en baryons, par exemple, va dépendre l'amplitude des oscillations acoustiques : plus il y a de baryons, plus le rapport inertie sur force de rappel est grand (la quantité de photons est connue, c'est celle d'un corps noir à 2.73 K, ce qui correspond à 411 photons par cm^3 aujourd'hui). Donc de la teneur en baryon va dépendre l'amplitude des oscillations du plasma, qui déterminent la hauteur des pics acoustiques. Mais les choses se compliquent car la vitesse d'expansion (i.e. la constante de Hubble H_0) joue aussi un rôle dans la dynamique de l'effondrement gravitationnel.

En pratique, la forme exacte du spectre de C_l pour une cosmologie donnée (décrite par un certain nombre de paramètres - une grosse douzaine) en fonction de la forme du spectre initial, du contenu de l'Univers, de sa géométrie, etc... est calculée au moyen de codes numériques sophistiqués. Le calcul, bien que ne faisant intervenir que de la physique assez bien comprise (gravitation en régime linéaire, interactions entre particules), ne peut pas être conduit de façon analytique sans grosses approximations.

Ces programmes de simulation, à l'origine assez lourds, nécessitaient de nombreuses heures de calcul pour estimer la forme d'un spectre de puissance pour un jeu de paramètres cosmologiques. Aujourd'hui, les chercheurs ont optimisé ces codes de calcul, afin d'arriver à calculer un spectre en une minute environ sur un ordinateur de bureau pour un Univers donné (i.e. pour des paramètres cosmologiques donnés). Ces codes sont un outil essentiel pour l'interprétation des spectres observés et leur traduction en termes de paramètres cosmologiques. Ils permettent de calculer des millions de modèles afin de trouver celui qui « colle » le mieux aux observations. C'est de cette façon que sont obtenus les paramètres cosmologiques à partir des expériences de CMB actuelles.

Capter les photons fossiles

Venons-en maintenant au problème de la mesure des fluctuations elles-mêmes, c'est-à-dire, de la capture des photons fossiles par un instrument dédié...

Le fond diffus a une température de 2,725°K environ. Les fluctuations, pour être à l'origine des structures observables aujourd'hui, devraient avoir une amplitude de quelques dizaines à quelques centaines de microKelvin, tout au plus. Il s'agit là d'une signature extrêmement ténue, que seuls des instruments prodigieusement sensibles seront capables de détecter. Des instruments si sensibles, qu'aujourd'hui, un détecteur destiné à ces mesures est capable de détecter en une seconde d'observation seulement la chaleur dégagée par une allumette à la distance de la Lune !

Entre la découverte du fond diffus lui-même par Penzias et Wilson, en 1965, et le début des années 1990, de nombreuses équipes expérimentales se sont attachées au problème de développer un instrument suffisamment sensible pour détecter les fluctuations de température. Ce formidable défi expérimental a tenu la communauté scientifique en échec pendant près de 30 ans. C'est le développement d'amplificateurs faible bruit fonctionnant à très haute fréquence (large bande), puis l'utilisation de bolomètres à très basse température, qui a permis les succès des expériences les plus remarquables. En 1992, l'expérience DMR (Differential Microwave Radiometer) sur le satellite américain COBE détecte pour la première fois de petites fluctuations de température, d'amplitude environ 30 µK.

Quel instrument pour mesurer les anisotropies ?

La conception d'un instrument nécessite de faire un certain nombre de choix qui obligent souvent à des compromis.

La première question qui se pose, qui conditionne tout le reste de la conception instrumentale, est la question de la longueur d'onde λ (ou de la fréquence $\nu=c/\lambda$) d'observation. Il n'y a pas de réponse unique à cette question.

Tout d'abord, le maximum d'émission (brillance) du corps noir cosmologique se situe à 160 GHz (ou $\lambda=1,9$ mm) maximum de la loi d'émission de Planck $B_\nu(T=2,725)$, corps noir à 2,725°K. Mais lorsque l'objectif est de mesurer des fluctuations de température, le signal que l'on recherche n'a pas une loi de corps noir : les fluctuations de température relatives à la température moyenne du CMB ont une loi d'émission en dB/dT (au premier ordre) car $B_\nu(T_{\text{CMB}} + dT) \approx B_\nu(T_{\text{CMB}}) + dT [dB_\nu/dT](T_{\text{CMB}})$. C'est donc au maximum de $[dB_\nu/dT](T_{\text{CMB}})$, soit 217 GHz (1,2 mm), qu'il faut observer.

Ce calcul, toutefois, se base sur la maximisation du *signal utile* avec l'hypothèse que la largeur de la bande d'observation $\Delta\nu$ est indépendante de la fréquence centrale d'observation. Mais si, comme c'est souvent le cas, la bande est plutôt proportionnelle à ν , le signal reçu est maximal au maximum de $\nu[dB_\nu/dT](T_{\text{CMB}})$, soit 280 GHz.

Ce qui nous intéresse, en pratique, serait en fait de maximiser le rapport *signal/bruit*. En fonction d'hypothèses sur le signal et sur la nature du bruit, on peut calculer la fréquence optimale d'observation, mais nous n'allons pas pousser cette discussion plus loin car en fait, le choix précis des fréquences d'observation doit encore prendre en compte d'autres arguments.

L'atmosphère terrestre

Le plus gros problème pour le choix d'une bande d'observation est probablement celui de

l'atmosphère.

L'absorption atmosphérique, tout d'abord, limite la gamme de longueurs d'ondes accessibles depuis le sol. Mais par chance, il y a des fenêtres, en dessous de 50 GHz, et aux alentours de 90, de 150 et 260 GHz, où l'absorption n'est pas trop élevée pour une expérience en altitude en hiver par temps sec. Au niveau de la mer, l'absorption est pratiquement rédhibitoire à partir de 50 GHz.

Mais, pire que l'absorption, l'atmosphère a la fâcheuse propriété d'émettre du rayonnement dans le millimétrique. La température Rayleigh-Jeans équivalente, de quelques dizaines à plus de cent Kelvin dans toute la gamme de longueurs d'onde intéressante va être source de bruit de photon d'une part, et aussi et surtout source de bruit atmosphérique lorsque ses propriétés (température, composition, teneur en vapeur d'eau) varient dans la ligne de visée au cours du temps. C'est la motivation principale des vols en ballon stratosphérique, et des sites choisis pour les expériences millimétriques au sol : dans des déserts d'altitude, secs et froids (Pôle sud, Atacama, Hawaii...)

Pour une expérience CMB au sol, la longueur d'onde est contrainte par la transmission et l'émission de l'atmosphère qui limite en pratique la fréquence d'observation utile à ~100 GHz pas plus, sauf dans les très bons sites.

La limite de diffraction

La résolution limite qui peut être obtenue par un instrument, dans le domaine millimétrique et centimétrique, dépend du diamètre de la surface collectrice :

$$\Theta_{\text{limite}} \text{ (degrés)} \sim 70 \lambda/D$$

où Θ_{limite} est la résolution maximale accessible (à la limite de diffraction), λ est la longueur d'onde d'observation, et D le diamètre de l'antenne. Ainsi, à une longueur d'onde de 1cm (fréquence $\nu \sim 30$ GHz), il est nécessaire d'avoir une antenne ou un miroir principal de 70 cm de diamètre au moins pour obtenir une résolution angulaire d'un degré. Pour 5 minutes d'arc, il faut une antenne 12 fois plus grande, soit 8,4 m de diamètre !

On peut donc avoir intérêt à diminuer la longueur d'onde d'observation (augmenter la fréquence) des observations pour augmenter la résolution. Pour une observation depuis le sol, la longueur d'onde est contrainte par la transmission et l'émission de l'atmosphère qui limite en pratique la fréquence d'observation, même dans les très bons sites. Pour avoir une bonne résolution, on pourra soit s'affranchir de l'atmosphère en faisant une expérience en ballon stratosphérique ou une expérience spatiale, soit améliorer la résolution en augmentant la taille de l'antenne ou en choisissant une technique d'interférométrie...

Couverture du ciel

Si le diamètre de l'antenne ou du miroir utilisé limite, en fonction de la fréquence, la résolution maximale accessible (et donc la valeur maximale du multipôle l pour lequel il est possible de mesurer le spectre de puissance C_l), la taille angulaire de la zone de ciel observée limite la taille maximale des anisotropies observables. L'observation d'une zone de 10 degrés sur le ciel ne permet pas de contraindre utilement la quantité de structures de taille supérieure à quelques degrés, et donc ne permet pas de mesurer le spectre C_l pour des valeurs de l inférieures à 40. Ceci donne peu de contraintes sur les paramètres du spectre primordial de fluctuations, et donc peu de contraintes sur la physique de l'inflation, par exemple.

Le problème des avant-plans

Outre l'atmosphère, d'autres sources, d'origine astrophysique mais étrangères aux fluctuations du CMB, émettent dans le millimétrique. Les plus notablement gênantes sont les émissions galactiques basse fréquence (rayonnement synchrotron des électrons libres dans le champ magnétique galactique, Bremsstrahlung dans les nuages ionisés) et haute fréquence (émission des poussières). Ces sources sont essentiellement concentrées dans le plan de la Galaxie, où elles sont très fortes, mais leur émission n'est pas rigoureusement nulle à haute latitude galactique. Une expérience destinée à des mesures précises devra en tenir compte.

Miraculeusement (?) il y a une gamme de fréquence autour de 100 GHz où les anisotropies du CMB dominant, même à latitude galactique moyenne. C'est une chance! Un peu plus d'émission d'avant-plan et les anisotropies du CMB n'étaient pas vraiment détectables avant longtemps !

Il est à noter de toute façon que, pour une mesure précise des anisotropies, il conviendra d'essayer de soustraire au mieux la contribution des avant-plans des observations du CMB, en exploitant des mesures prises à différentes longueurs d'onde. Ceci est d'autant plus vrai que l'on souhaiterait observer une grande fraction du ciel, puisqu'il est alors nécessaire de mesurer aussi les anisotropies à proximité du plan galactique, où les avant-plans galactiques émettent beaucoup. Ce travail va nécessiter de mesurer l'émission du ciel à plusieurs fréquences différentes, et d'utiliser les différences d'émission aux différentes longueurs d'onde pour permettre, par la mise en œuvre des méthodes de traitement de données (séparation de composantes) assez sophistiquées, de séparer l'émission du fond cosmologique des émissions d'avant-plan.

Technologie de détecteurs

Le rayonnement électromagnétique peut être observé avec une large gamme de détecteurs divers. Dans le domaine de longueurs d'onde qui s'étend du centimétrique au submillimétrique, les détecteurs appropriés sont soit des radiomètres dotés d'amplificateurs à haute mobilité électronique (des techniques radios semblables à celles utilisées en télécommunications, efficaces en dessous de 100 GHz), soit des bolomètres, détecteurs ultra sensibles au dessus de 100 GHz, mais qui nécessitent d'être refroidis à une température proche du zéro absolu, entre 100 et 300 mK. Aujourd'hui, les deux sont utilisés, dans des instruments regroupant de quelques détecteurs à quelques dizaines de détecteurs. Les premiers instruments regroupant plusieurs centaines de détecteurs sont actuellement en phase de développement et de tests, mais représentent un gros travail d'intégration car chaque détecteur doit être construit indépendamment, puis l'ensemble doit être assemblé en un seul instrument, tâches de haute technicité extrêmement délicates à réaliser. Ainsi, seuls quelques laboratoires de recherche au monde maîtrisent les technologies clés permettant de fabriquer un instrument pour la mesure des anisotropies du fond diffus.

Sol, ballon, ou satellite ?

L'observation du fond cosmologique peut se faire depuis le sol, depuis un ballon stratosphérique volant à 35 km d'altitude environ, ou depuis l'espace. Chacun de ces lieux d'observation a des avantages et des inconvénients.

Les observations depuis le sol, en raison de la présence de l'atmosphère, ne peuvent se faire qu'à certaines longueurs d'onde. Elles ne permettent donc pas d'obtenir une couverture en longueur d'onde suffisante pour soustraire des observations l'émission des avant-plans. Par ailleurs, les fluctuations d'émission des résidus d'atmosphère, même dans les fenêtres

d'observation, sont source d'excès de bruit, et diminuent la sensibilité des mesures. En raison de contraintes liées à l'environnement terrestre, il n'est pas possible d'observer de très grandes régions du ciel, ce qui limite la taille des plus grandes échelles observables.

Par contre, les mesures depuis le sol présentent l'avantage d'être sensiblement plus simples à mettre en œuvre que les mesures embarquées. Il est relativement facile d'améliorer le dispositif expérimental en fonction des besoins. Il est facile d'obtenir une bonne résolution angulaire en construisant ou en utilisant de grandes antennes, comme l'antenne de 30m de l'IRAM, ou les antennes de 7 à 12 m prévues pour les expériences CMB futures au sol.

Les observations spatiales permettent de mesurer l'émission dans une large gamme de fréquences, avec une couverture complète du ciel, avec une excellente sensibilité en raison des avantages de l'environnement spatial. L'atmosphère n'est pas un problème, et il est possible d'observer longtemps, avec des durées de mission de plusieurs années. Par contre, une mission spatiale est coûteuse et risquée. Elle demande de nombreuses années de préparation (10 à 15 ans typiquement), ce qui a pour conséquence que les détecteurs embarqués ne sont pas, en général, à la pointe de la technique. Elles nécessitent des préparations préliminaires avec des expériences plus modestes, en ballon ou au sol, pour valider les techniques et les concepts. Malgré ces désavantages, les meilleures mesures dans le domaine sont toujours faites depuis l'espace. Le satellite COBE a réalisé la première détection des anisotropies, et le satellite WMAP la meilleure mesure de ces anisotropies à ce jour. La mission spatiale Planck à venir en 2007 est considérée par beaucoup comme l'expérience « ultime » pour la mesure des anisotropies de température du fond diffus.

Enfin, l'expérience ballon est un intermédiaire entre la mission spatiale et l'observatoire au sol. Elle peut être construite rapidement, permet de s'affranchir d'une bonne partie des effets néfastes liés à l'atmosphère, et n'est pas très coûteuse par rapport à une mission spatiale. Par contre, elle présente toujours un risque au lancement, et ne permet pas une très bonne résolution angulaire en raison du poids des grandes antennes. Enfin, elle ne permet pas de très longs temps d'observation, typiquement de quelques heures à quelques jours, pas plus. Cette option, toutefois, reste un bon compromis.

Nous avons maintenant presque tous les éléments pour fabriquer un instrument destiné à la mesure des anisotropies du fond diffus. Il ne nous reste plus qu'à décider des priorités... en fonction de notre budget...

Les mesures actuelles

Pour l'instant, les meilleures mesures à très petite échelle angulaire ont été obtenues depuis le sol, où il est possible d'utiliser de grandes antennes ou de mettre en œuvre des techniques d'interférométrie. Les meilleures mesures sur l'ensemble du ciel ont été obtenues par les satellites équipés de technologies radiométriques. Enfin, les expériences ballon avec des détecteurs bolométriques ont fourni les mesures les plus spectaculaires aux échelles intermédiaires.

COBE et la première détection des anisotropies

Au début des années 1990, le satellite COBE, lancé par la NASA, emportait à son bord trois instruments destinés à sonder les propriétés du fond cosmologique. Le premier de ces instruments, le Spectromètre FIRAS, a mesuré avec précision la loi d'émission du corps noir cosmologique, confirmant son origine cosmologique. Le second, DIRBE, était dédié à la détection d'un fond infrarouge lié à la formation des premières galaxies. Le troisième, DMR,

a détecté, pour la première fois, de petites anisotropies du fond cosmologique à grande échelle angulaire. Toutefois, la résolution et la sensibilité de DMR ne lui permettaient pas de détecter les structures causalement connectées à la dernière diffusion. Il était nécessaire de compléter ces mesures par des mesures à plus petite échelle angulaire.

Les missions ballon Archeops, Boomerang, Maxima

Toute une génération d'instruments destinés à détecter les anisotropies à petite échelle a fait suite à COBE. Parmi les plus remarquables, les ballons stratosphériques Boomerang, Maxima, et Archeops, ont clairement détecté le premier pic acoustique dans le spectre C_l des anisotropies. La courbure spatiale de l'Univers, mesurée par la position de ce premier pic acoustique, s'est avérée compatible avec zéro. Soit l'Univers est spatialement plat, soit sa courbure est si faible qu'elle n'est pas mesurable à l'échelle de notre Univers observable aujourd'hui.

Le satellite WMAP

Les mesures les plus spectaculaires à ce jour ont été effectuées par le satellite américain WMAP, lancé en juin 2001 depuis Cap Canaveral en Floride. WMAP a cartographié avec une résolution de 15 minutes d'arc environ l'ensemble de la voûte céleste à cinq longueurs d'onde entre 20 et 90 GHz. Ces mesures ont permis d'estimer la valeur actuelle de plusieurs paramètres cosmologiques, et en particulier :

- L'âge de l'Univers : 13,7 milliards d'années
- La courbure de l'espace : compatible avec 0 (paramètre de densité totale $\Omega_{\text{total}} = 1$, à deux pour cent près)
- La teneur en baryons : $\Omega_B = 4,4\%$
- La quantité de matière noire : $\Omega_{DM} = 22,6\%$
- La densité d'énergie du vide : $\Omega_\Lambda = 73\%$

Conclusions et perspectives

Pour finir cette introduction au fond diffus cosmologique, il convient de passer quelques instants à se poser deux questions fondamentales :

- Sommes-nous bien sûrs de comprendre les mesures, et de ne pas nous tromper dans l'interprétation des mesures actuelles ? Quel est notre degré de confiance ?
- Quel est le futur de ce domaine de la recherche en Cosmologie ? Faut-il continuer à faire des mesures plus précises ? avec une meilleure résolution ? quel est l'instrument de demain ?

Interprétation ?

Si l'on analyse le cheminement qui nous a conduits à nos conclusions sur les paramètres cosmologiques qui décrivent notre Univers, force nous est de constater que celui-ci est loin d'être direct. De plus, il repose sur des hypothèses qui, bien que plausibles, ne sont aucunement démontrées à ce jour. Il convient donc toujours de le remettre en question.

La mesure des paramètres cosmologiques, à partir des observations, nécessite en particulier l'utilisation de simulations numériques pour réaliser la connexion entre les observations et les

paramètres qu'elles sont censées contraindre. Pouvons-nous vraiment faire confiance à ces simulations ? Pour tester cela, plusieurs groupes de recherche développent chacun indépendamment leur version de ces codes de simulation, et comparent leurs résultats afin de les valider.

Sur le plan des hypothèses, par exemple, nous supposons que l'Univers dans son ensemble est homogène et isotrope à grande échelle. Malheureusement, nous n'avons pas la possibilité de vérifier cette hypothèse au-delà d'une certaine distance. Est-ce grave ? Probablement pas, car si l'Univers était différent bien au-delà de la distance limite observable, ceci n'aurait pas d'impact sur la physique dans notre Univers local.

Nous supposons aussi que les lois de la physique sont invariantes dans l'espace et dans le temps, autrement dit, nous supposons que les forces fondamentales qui gouvernaient les interactions quand l'Univers était âgé de quelques minutes étaient les mêmes que celles que nous observons en laboratoire aujourd'hui. Est-ce plausible ? Certainement, mais ce n'est nullement démontré. Toutefois, aucune observation ne nécessitant aujourd'hui clairement une variation des lois de la physique dans le temps ou dans l'espace, les cosmologistes s'en tiennent à l'hypothèse minimaliste, qui consiste à supposer que les lois sont les mêmes partout tant qu'il n'y a pas de bonne raison de penser autrement.

Nous avons également supposé que les perturbations initiales de densité sont apparues avec un spectre invariant d'échelle, où toutes les tailles de fluctuation sont équivalentes. C'est là une hypothèse critique, car si le spectre initial était complètement arbitraire, il ne serait pas possible d'utiliser la façon dont il a été déformé lors des oscillations acoustiques dans l'Univers entre $t=0$ et $t=380.000$ ans pour en déduire les propriétés du fluide baryons-photons à cette époque. Toutefois, un spectre initial complexe n'est pas exigé ni par les théories d'inflation (qui tendent plutôt à favoriser un spectre simple). Par ailleurs, l'hypothèse de simplicité n'étant pas démentie par les observations (un spectre initial complexe n'aurait aucune raison d'aboutir à la présence de pics acoustiques dans le spectre C_l), les cosmologistes font, là encore, naturellement l'économie de la complexité tant qu'elle n'est pas exigée par les observations.

Le seul bémol réel tient dans les conclusions obtenues. Quelque peu déroutantes, elles nous conduisent à examiner tout ceci avec circonspection. L'Univers serait constitué pour 5% seulement de matière ordinaire comme nous la connaissons, pour 25%, de matière noire de nature inconnue, qui échappe jusqu'ici à toute détection, et pour 70% d'énergie noire, encore plus mystérieuse, une forme d'énergie du vide qui ne se dilue pas lorsqu'on augmente le volume, et dont la pression serait négative !?

Face à cette situation, le cosmologiste adopte une attitude pragmatique :

Tout d'abord, il s'en tient aux hypothèses qui lui semblent les plus plausibles. Ainsi, il est plus facile d'admettre aujourd'hui qu'il existe de la matière qui ne rayonne pas (la fameuse matière noire) plutôt que de remettre en question la relativité générale ou le modèle général du Big-Bang, qui sont bien établis par ailleurs, et ont permis de prédire de nombreuses observations qui ont été faites par la suite...

Ensuite, il ne développe pas de théories ou d'hypothèses plus compliquées que nécessaire pour expliquer les observations. Ainsi, la matière noire pourrait vraisemblablement être expliquée par la présence de particules nouvelles, les particules supersymétriques, dont l'existence a été proposée par les physiciens pour résoudre des problèmes du modèle standard de physique des particules, et qui ont donc déjà une bonne raison d'exister indépendamment de la cosmologie (même si elles n'ont pour l'instant jamais été observées). L'énergie noire, quant à elle, s'explique par la présence d'une constante cosmologique dans l'équation d'Einstein, et n'exige qu'une toute petite modification de la théorie existante.

Enfin, il valide (ou invalide) les modèles et théories en utilisant ceux-ci pour prédire ce qui serait observé dans des conditions non encore testées. Par exemple, la première validation de la relativité générale s'est faite en prédisant une observation (la déflexion de la lumière par le soleil) que l'ancienne théorie ne prédisait pas. Dans notre cas, le modèle a été testé dans de nombreuses circonstances. Il a permis, par exemple, de prédire l'existence du fond diffus cosmologique et son spectre de corps noir. Il a permis de prédire l'existence de pics acoustiques dans le spectre C_l des anisotropies du fond diffus, et ces pics ont été observés par la suite. Il est difficile d'imaginer que ce soient là des coïncidences...

Bien sûr, le cosmologiste recherche aussi, par d'autres méthodes, confirmation de ces mesures, afin de s'affranchir de l'impact des hypothèses nécessaires pour une mesure particulière. Dans le cas particulier qui nous intéresse, l'existence de matière noire est confirmée par les courbes de rotation des galaxies spirales, par les lentilles gravitationnelles, et par la quantité de baryons dans les amas de galaxies. L'existence d'énergie noire, par ailleurs, est confirmée par l'observation de la luminosité de supernovae distantes. Il semble bien que les conclusions soient assez robustes...

Pour reprendre la comparaison de l'introduction, nous pouvons imaginer que du temps d'Ératosthène, des collègues lui auraient peut-être fait remarquer qu'il ne mesure qu'une fonction de plusieurs paramètres (e.g. rayon de la terre et distance du soleil). Cette remarque mérite, bien sûr, d'être considérée. Par exemple, si Ératosthène avait supposé que la terre était plate, il aurait imaginé mesurer par la même expérience la distance du soleil. Il aurait obtenu une distance complètement fautive, bien évidemment, l'hypothèse de départ étant erronée.

Ératosthène aurait pu aussi, se basant sur l'existence de collines, de montagnes, supposer que la terre n'a pas une forme simple, et en aucun cas sphérique. Il n'aurait alors rien pu mesurer du tout. Malgré ces fausses routes possibles, il a adopté les hypothèses les plus simples et les plus plausibles. Ces hypothèses se sont avérées correctes, et lui ont permis d'accéder à une connaissance qu'il n'aurait pas pu obtenir autrement.

Et demain ?

Les mesures du fond de rayonnement cosmologique n'ont pas encore fini de nous apporter de nouvelles informations. Tout d'abord, le lancement de la mission spatiale Planck par l'agence spatiale européenne, en 2007, nous permettra de gagner encore un ordre de grandeur en précision sur la cartographie des anisotropies de température, et de contraindre avec encore plus de précision le modèle et les paramètres cosmologiques. Ceci est crucial pour avancer, en testant la cohérence de mesures de plus en plus précises et contraignantes sur les paramètres du modèle.

Enfin, outre les anisotropies de température, le fond cosmologique nous apporte encore plus d'informations par le biais de sa polarisation. Le signal de polarisation, selon le modèle actuel dépend, lui aussi de façon prévisible des paramètres cosmologiques. Qui plus est, il doit porter, si le modèle est correct, la signature indubitable de la présence d'ondes gravitationnelles primordiales générées au moment de l'inflation. Sa mesure permettra donc de mettre à rude épreuve les modèles d'univers à $t=10^{-32}$ s, une aubaine pour mieux comprendre la physique à des énergies extrêmes, mal décrite par les théories actuelles basées sur la relativité générale et sur la théorie quantique des champs... Toutefois, l'amplitude de ces signaux de polarisation, plusieurs ordres de grandeur plus faibles que les anisotropies de température, nécessitent le développement d'instruments encore 100 à 1000 fois plus sensibles que les instruments actuels. Pour cela, il faut développer de nouveaux détecteurs, plus sensibles, et pouvant être fabriqués de façon industrielle pour créer des instruments de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de détecteurs... C'est là le nouveau défi

expérimental lancé par le fond diffus. Il occupera les chercheurs pendant les deux prochaines décennies, jusqu'au lancement d'un futur satellite encore 100 fois plus sensible que le satellite Planck, qui parviendra à décortiquer jusqu'au plus ténu des signaux qu'il renferme le foisonnement d'information que constitue ce Graal du cosmologiste : le fond de rayonnement cosmologique fossile.