

SÉMINAIRE DE PHILOSOPHIE ET MATHÉMATIQUES

PIERRE KERSZBERG

Naissance de la cosmologie relativiste

Séminaire de Philosophie et Mathématiques, 1984, fascicule 8
« Naissance de la cosmologie relativiste », , p. 1-30

<http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1984__8_A1_0>

© École normale supérieure – IREM Paris Nord – École centrale des arts et manufactures,
1984, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Séminaire de philosophie et mathématiques » implique
l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute
utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale.
Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

Pierre Kerszberg

The University of Melbourne
Department of History and Philosophy
of Science
Parkville, Vic.3052
Australia

NAISSANCE DE LA COSMOLOGIE RELATIVISTE

I. Originalité des questions actuelles

Un regard même superficiel sur l'état des recherches en physique aujourd'hui suffit amplement pour en dégager une caractéristique essentielle. Il est frappant, en effet, que ces recherches comportent toute une série de spéculations cosmologiques et cosmogoniques les plus audacieuses ; des conjectures sur les premiers instants de la vie de l'univers, au sortir immédiat du "big bang", sont devenues monnaie courante chez les physiciens. Un tel phénomène est non seulement assez nouveau dans l'histoire de la physique, mais il paraît aussi radicalement original. D'abord, sa nouveauté est largement attestée par le fait que, depuis l'époque des premiers succès de la mécanique newtonienne, et pratiquement jusqu'au début du XXème siècle, la cosmologie n'a pas été conçue comme une partie intégrante de la physique. Tout se passe même comme si les succès de cette mécanique étaient corrélatifs d'une sorte d'oubli de la cosmologie physique ^I. Ayant réussi à intégrer la Terre et les autres planètes dans la cohérence conceptuelle d'un système solaire unique, la doctrine newtonienne semble repousser jusqu'à la périphérie de ce système l'ancienne division entre un cosmos accessible à la science (du moins, la science telle que nous la comprenons depuis l'époque moderne) et un cosmos qui ne l'est pas ; le monde des étoiles doit sa stabilité à un acte divin tout à fait particulier, l'acte par lequel les étoiles fixes ont été disposées "à une distance immense les unes des autres, de peur que ces globes ne tombassent les uns sur les autres par la force de leur gravité" ². Tout au long des XVIIIème et XIXème siècles, et à quelques rares exceptions près, les conjectures qui se rapportent à l'univers comme totalité sont tout au plus les prérogatives d'une réflexion philosophique indépendante. Réflexions sanctionnées par les antinomies cosmologiques de la raison pure, que Kant a promues au rang de limites inflexibles de la pensée.

Ensuite, l'originalité du phénomène contemporain tient dans la mise en

oeuvre d'un concept-clé. Il faut d'emblée y insister : par soi, le concept n'est pas vraiment original. C'est plutôt la manière par laquelle il est perçu et rendu effectif qui est susceptible d'éveiller l'attention du philosophe et du critique des sciences. Il s'agit de la notion d'histoire de l'univers. Comme on sait, Einstein considérait sa grande théorie de la relativité générale comme étant essentiellement incomplète. De fait, la recherche en vue d'une théorie unifiée a immédiatement occupé l'essentiel de son oeuvre ultérieure. Depuis cette époque fondatrice, une telle recherche a pris l'allure suivante : en un premier temps, une combinaison des forces électromagnétiques et des interactions faibles a été réalisée — elle a débouché sur la notion de force électrofaible — ; ensuite, des théories ont été proposées, qui unifient la force électrofaible et les interactions fortes selon une force hyperfaible. Ce qui caractérise essentiellement la nature et la compréhension de cette dernière force, c'est qu'elle est conçue comme ayant régné dans l'univers lorsqu'il était très jeune, i.e. lorsque les concentrations d'énergie étaient extrêmement élevées. Mais à présent, cette force agit d'une manière différente, et cette manière n'est rien d'autre que cela même qui constitue les apparences observées aujourd'hui — trois forces séparées. En ce sens, l'idée d'une histoire singulière de l'univers est présentée comme l'indice ultime qui doit permettre de comprendre tout à la fois l'univers dans son ensemble et la nature des lois physiques. C'est l'exigence conceptuelle même de la physique unifiée qui commande les vues sur cette histoire, qui introduit des limitations dans l'immense multiplicité des déroulements possibles.

2. Retour vers la formation des idées cosmologiques contemporaines

Comprendre la justification de cette idée implique un retour en arrière. En fait, les spéculations cosmologiques de la physique actuelle sont une conséquence assez directe de l'"invention" du concept relativiste d'univers au

tournant des années 1920. Il s'agit d'une période obscure mais capitale pour la science contemporaine de l'univers qui est en train de se former. Dans les années 1920, A.Friedmann, à qui l'on doit la première idée théorique d'une métrique non-statique pour l'univers, a été complètement ignoré, et G.Lemaître, bien connu pour son invention de la notion d'"atome primitif", ne fut guère mieux apprécié. Aujourd'hui, cependant, la situation semble excessivement inversée : les historiens de la cosmologie créditent facilement Friedmann et Lemaître de l'invention de la cosmologie non-statique, alors que les débats fondateurs entre Einstein et l'astronome hollandais Willem De Sitter, tout autant que les étonnantes réflexions qui s'ensuivirent dans la suite immédiate (principalement dans les contributions d'Eddington et de Weyl), sont largement ignorés. Tout au moins, s'ils sont mentionnés, c'est surtout pour les qualifier d'approches naïves et inadéquates : de fait, ils sont prisonniers de ce qui a pu être désigné par le "préjugé statique" de toute l'époque. Une telle négligence n'est rien d'autre qu'un écho de la tendance à assimiler le concept d'histoire de l'univers comme allant de soi.

Vers la fin de l'année 1916 et au début de l'année 1917, Einstein et De Sitter s'engagent dans une discussion épistémologique sur les fondements de la relativité générale. De cette discussion sort le premier modèle relativiste de l'univers, le fameux univers cylindrique d'Einstein. Il constitue une réponse aux doutes émis par De Sitter à l'encontre des présupposés de la relativité. Comme Einstein l'avoue à Michele Besso dans une lettre du 9 mars 1917, à peine un mois après la publication du modèle, le modèle ne constitue rien d'autre qu'"preuve que la relativité générale peut conduire à un système non-contradictoire" ³. Mais le souhait de cette consistance logique n'a pas résisté aux nouveaux assauts de De Sitter. De Sitter est surtout connu pour sa découverte d'une solution vide des équations du champ. Solution inattendue, puisqu'elle tend à montrer que l'espace-temps pseudo-euclidien de Minkowski n'est pas la seule solution vide, donc que la relativité générale n'est peut-être pas l'ex-

tension spontanée du postulat de relativité au cas où des forces de gravitation sont présentes ⁴. Ou, à tout le moins, que la relativité générale telle qu'elle est alors élaborée par Einstein n'est pas l'extension recherchée. L'acharnement mis à construire une nouvelle consistance cosmologique de la relativité générale constitue l'essence des réflexions fondamentales d'Eddington et de Weyl dans les années 1918-1923. Réflexions pionnières mais enfermées dans le préjugé statique, donc en un sens "artificielles" et non adaptées à la vraie nature de l'univers telle que l'observation astronomique commence à la dévoiler. Toutefois — et c'est là le point important — le débat ne paraît pas, et dès cette époque, obscurci par ce préjugé en tant que tel, mais plutôt par le fait même que le nouveau concept d'univers — corrélatif de la nouvelle consistance cosmologique réclamée par la relativité générale — est établi en même temps que le premier projet en vue d'une physique unifiée. La coïncidence est beaucoup plus qu'historique : le concept d'univers et le projet de physique unifiée sont pensés comme étant intrinsèquement solidaires l'un de l'autre. A cet égard, comme nous allons le voir, un simple changement de référence vers des coordonnées non-statiques n'est qu'un problème tout à fait secondaire ; le changement semble même avoir été fort bien perçu par Eddington et Weyl (ainsi, du reste, que par Lanczos ⁵) avant qu'il ne soit exploré analytiquement par Friedmann et Lemaître. Il reste, pour des raisons qui doivent être expliquées, que cette exploration analytique est le point décisif, puisqu'il faut attendre ce simple réarrangement géométrique de quelques variables pour voir surgir l'idée radicalement nouvelle de genèse et d'évolution temporelle de tout l'univers.

Retracer les origines conceptuelles de la cosmologie non-statique est la tâche que nous nous assignons ici. Une telle pièce d'histoire critique doit permettre de comprendre les origines du statut prééminent accordé à la cosmologie dans la physique contemporaine. Par suite, elle doit fournir les linéaments d'une épistémologie critique du projet en vue d'une physique unifiée. En parti-

culier, rétablir l'équilibre et évoquer les contributions d'Einstein, De Sitter, Eddington et Weyl, en tant qu'elles conduisent aux apports de Friedmann et de Lemaître, est le point d'importance historique. Ensuite, il s'agit de montrer que la "redécouverte" des oeuvres de Friedmann et Lemaître au début de l'année 1930 est plus qu'un simple accident chronologique ⁶ : il y a des raisons intrinsèques au statut de la relativité générale et à l'allure que cette théorie imprime à la quête d'une physique unifiée qui doivent rendre compte de cet "accident" ⁷. Ces raisons intrinsèques doivent être dégagées des premiers essais qui n'ont apparemment pas abouti.

3. Premières ébauches en vue d'une cosmologie

Einstein s'est tourné vers la cosmologie presque immédiatement après avoir présenté son premier mémoire de synthèse sur la théorie de la relativité générale, à l'automne 1916 ⁸. Il est pour ainsi dire poussé à traiter la question, De Sitter le pressant sur le statut des fondements de la théorie nouvelle. Ce que De Sitter reproche essentiellement à Einstein, c'est de poser le problème relativiste en termes strictement machiens. Par exemple, si nous imaginons un seul disque en rotation, très éloigné de toute autre matière, il faut dire, en suivant Mach et Einstein, qu'il existe un champ inertial non-homogène (une accélération centrifuge) sur ce disque, et donc aussi un champ de gravitation, précisément parce que le mouvement de ce disque doit être conçu comme un mouvement relatif à une matière très éloignée. Le mouvement relatif étant pris comme cause, les mêmes phénomènes physiques doivent être descriptibles dans deux systèmes de coordonnées, l'un dans lequel le disque est en rotation, l'autre dans lequel la matière lointaine est en rotation. A la limite, dans un univers complètement vide et muni d'un seul disque, il ne devrait pas être possible de distinguer dynamiquement entre un système de coordonnées où cette seule source est au repos et un autre où elle est en mouvement.

Ce qui gêne fondamentalement De Sitter, c'est une apparente confusion sur laquelle reposerait le recours aux masses distantes : la confusion entre les équations différentielles de la relativité générale et leurs solutions ⁹.

La forme intégrée des équations différentielles n'est pas connue tant que des conditions aux limites ne sont pas spécifiées. Or, si le principe de relativité générale impose que la forme des équations reste invariante dans tous les systèmes de coordonnées, il n'en va pas de même des constantes d'intégration qui sont susceptibles de changer d'un système à l'autre. Lorsque les équations de la mécanique newtonienne sont écrites sous forme différentielle, en particulier lorsque l'équation de la gravitation est écrite sous la forme de l'équation de Poisson, on considère, pour des raisons de simple commodité mathématique, que le champ gravifique d'un système local devient nul à l'infini. Cela revient à admettre que la valeur numérique du potentiel en chaque point à distance finie dépend de la totalité des sources matérielles seulement. D'après De Sitter, Einstein étend aveuglément cette manière classique de voir les choses à la relativité générale. L'équivalence de principe entre différents systèmes de coordonnées entraîne la variabilité des constantes d'intégration d'un système à l'autre ; mais la "réalité" des masses distantes provient essentiellement de la croyance que toute valeur non nulle pour une constante, dans un système particulier, doit être "expliquée" par la présence de masses éloignées. De Sitter fait justement remarquer que ces masses n'appartiennent pas au système de référence, tout comme l'ancien espace absolu dans la théorie de Newton.

Pourtant, le traitement "classique" des conditions aux limites en relativité générale reste très tentant à bien des égards. L'argument le plus fort, dans l'esprit d'Einstein, est certainement l'idée que le rattachement de la valeur numérique des potentiels en n'importe quel point aux seules sources matérielles est en parfaite conformité avec l'esprit du principe de Mach. Tous les $g_{\mu\nu}$, c'est-à-dire ces fonctions de coordonnées qui sont interprétées comme les

potentiels de gravitation dans la théorie générale, seront d'origine matérielle si et seulement si leurs valeurs à l'infini sont identiques dans tous les systèmes de coordonnées. On pourrait imaginer qu'à l'infini l'espace-temps redevient euclidien, que les $g_{\mu\nu}$ prennent les valeurs de la métrique de Minkowski :

$$\begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \quad (I)$$

De Sitter fait cependant remarquer que les valeurs (I) ne sont certainement pas généralement covariantes. Einstein s'obstine et propose alors ^{IO} :

$$\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & \infty \\ 0 & 0 & 0 & \infty \\ 0 & 0 & 0 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty^2 \end{array} \quad (2)$$

Ceci constitue une séparation totale de l'espace et du temps ; à l'infini, on pourrait toujours avoir des fonctions arbitraires du temps, mais plus de l'espace. Pourquoi Einstein songe-t-il à des valeurs pareilles ? Ce qu'il vise, c'est que l'infini devienne un véritable "rien" au sens pleinement physique, c'est-à-dire un "rien" qui ne soit ni l'espace-temps vide de Minkowski ni une sorte d'artifice mathématique comme dans la physique classique. Un intervalle élémentaire de temps est d'autant plus grand que la distance vis-à-vis d'un point pris comme centre augmente ; à l'infini, il y a une sorte d'"engloutissement" de l'espace dans le temps. Comme De Sitter l'explique, l'idée d'Einstein revient à admettre que ^{II}

"... dans n'importe quel système de coordonnées les $g_{\mu\nu}$ auraient des valeurs exactement déterminées, étant donné qu'il n'y aurait plus de constantes d'intégration qui devraient s'ajuster aux phénomènes observés".

Telle est donc la dernière parade imaginée par Einstein pour contrecarrer les arguments de De Sitter : toute opération de mesure traduirait immédiatement l'influence de la totalité matérielle de l'univers, quand bien même nous n'avons

aucun moyen de le vérifier. Cette influence est déjà contenue dans les lois elles-mêmes, pourvu que les lois soient écrites sous une forme généralement covariante.

Il n'est pas exagéré de dire que la découverte de la cosmologie relativiste par Einstein vient d'une nouvelle réplique de De Sitter. L'hypothèse (2), dit maintenant De Sitter, est née du désir d'attribuer la totalité des $g_{\mu\nu}$ à des sources matérielles. En particulier, les valeurs (1), qui sont les valeurs observées approximativement par les astronomes jusqu'aux plus grandes distances, doivent être expliquées par des masses distantes. L'infini n'étant pas mesurable, les masses distantes rempliront toujours la même condition, savoir l'explication des valeurs (1) ou de toutes autres valeurs mesurées à l'avenir par des masses plus éloignées que le champ effectif de l'observation. Les valeurs (2) prévoient que le monde matériel est fini, et ceci d'une manière a priori ; pourtant, rien ne permet d'en fixer la limite, ce monde est aussi grand que nous voulons — d'avance plus grand que la limite atteinte par n'importe quelle observation. La conclusion de De Sitter est implacable ¹² :

"Théoriquement, il est certainement important qu'on ait montré une origine entièrement matérielle de l'inertie. Mais, pratiquement, cela ne fait aucune différence d'expliquer une chose par une hypothèse incontrôlable ou de ne pas l'expliquer du tout".

Mais ce qu'Einstein retire de cette première controverse, c'est que l'univers est pensable comme totalité, avant et même en dehors de toute mesure effective, dès l'instant où la physique est munie de lois exprimées sous une forme généralement covariante. Il reste à penser cette notion de totalité pour qu'elle soit aussi accessible à la mesure.

4. De l'univers presque plein à l'univers presque vide

Le premier modèle einsteinien de l'univers répond à cette exigence. Il dote la science d'un moyen pour fixer la limite de l'univers fini, en suppri-

mant l'infini au niveau de la métrique — cet infini était déjà un "rien" au niveau physique. Tel est l'univers cylindrique : l'espace est l'hyper-surface riemannienne d'une sphère à trois dimensions, alors que le temps demeure linéaire (c'est l'axe du cylindre). Le temps n'étant pas affecté par la courbure de l'espace, il s'agit d'un temps cosmique, c'est-à-dire que le temps est identique pour tous les observateurs. Aux yeux d'Einstein, un tel temps linéaire est imposé par les seuls faits d'observation, savoir la faiblesse relative des vitesses stellaires. En outre, pour que la métrique soit celle d'un espace fermé et pour qu'elle représente une matière distribuée selon un tel équilibre statique, il faut ajouter un terme dans les équations originelles du champ : c'est la fameuse constante cosmologique λ , dont une interprétation physique immédiate est celle d'une force de répulsion qui contrebalance aux grandes distances le jeu des forces d'attraction.

A ce moment, De Sitter va devenir cosmologue pour ainsi dire malgré lui. Sa nouvelle réplique, en effet, se place sur le terrain même de la cosmologie, tel qu'Einstein vient de l'ouvrir. L'idée est que la notion de temps cosmique se détache des justifications théoriques de la relativité. En vertu des exigences de Minkowski sur l'équivalence du temps et de l'espace, une cosmologie relativiste entièrement conforme aux visées d'Einstein devrait comporter une courbure du temps. L'univers ne serait pas une sphère, mais un hyperboloïde, puisque la courbure du temps entraîne une "torsion" du cylindre sur son axe. De Sitter ne veut sans doute ici qu'être un avocat du diable. Car en conservant la constante cosmologique dans un tel modèle, on arrive à cette conséquence que la matière n'est plus du tout nécessaire ! Pour reprendre les mots provocateurs de De Sitter ¹³ :

"Cette matière cosmique ... ne sert à rien d'autre qu'à nous rendre en position de supposer qu'elle n'existe pas".

De Sitter vient d'établir que, au moins sur le plan théorique, il n'existe

pas de relation universelle entre la présence de matière et la géométrie de l'espace-temps aux grandes distances. Pour achever sa démonstration et miner définitivement les ambitions qu'Einstein plaçait dans la cosmologie, il montre que sa construction purement théorique est finalement plus proche de la réalité. En effet, le modèle hyperboloïdique, comme le croit De Sitter, n'est sans doute pas tout à fait vide ; si le modèle abolit ce que De Sitter appelle la "matière cosmique", il permet aussi de distinguer entre celle-ci et la "matière ordinaire" que sont les planètes, les étoiles, les nébuleuses. Par là, De Sitter dégage les vrais motifs qui conduisent Einstein à adopter un temps cosmique, non courbé : ces motifs ne couvrent pas seulement des faits, mais aussi une justification théorique, puisque le temps cosmique apparaît solidaire de la matière cosmique, donc aussi du principe de Mach.

De fait, l'absence de temps cosmique dans l'univers de De Sitter le rend tout à fait étrange. Pour n'importe quel observateur, le temps courbé entraîne l'existence d'un point au-delà duquel le temps ne s'écoule plus ; ce point est une sorte d'"horizon du visible". C'est cette propriété particulière qui constitue le point de départ de la réaction d'Einstein. Son objection est que la périphérie n'est rien d'autre qu'une singularité du champ, assez semblable à la singularité rencontrée dans une métrique de Schwarzschild ¹⁴. En vertu de cette discontinuité, le modèle de De Sitter réussit seulement à repousser la matière cosmique dans des régions qualifiées d'inobservables. Nouvelle réaction de De Sitter, qui accuse Einstein de faire de la métaphysique plutôt que de la physique ¹⁵. Un vrai postulat physique de continuité, soutient De Sitter, implique que l'expression "tous les points à distance finie" signifie "tous les points physiquement accessibles". En ce sens, la métrique hyperboloïdique satisfait pleinement l'exigence de continuité. Comme De Sitter le dit d'une manière remarquable, tous les phénomènes paradoxaux de la périphérie sont des négations de phénomènes, puisque le temps ne s'écoule plus, en sorte ¹⁶

"qu'ils peuvent se produire seulement après la fin ou avant le début de l'éternité".

Une autre conséquence remarquable de l'absence de temps cosmique dans le modèle de De Sitter est l'apparition de propriétés de mouvement. Dès l'instant où une particule d'épreuve est plongée dans cet espace-temps vide, elle ne peut pas demeurer au repos. Ceci est dû au maintien de la constante cosmologique, qui joue le rôle d'une force de répulsion non contrebalancée par la force attractive de la matière. Après une série de premiers calculs préliminaires ¹⁷, De Sitter croit en la possibilité d'une sorte d'équilibre entre les mouvements d'attraction et les mouvements de récession. En effet, une particule qui quitte l'origine acquiert une certaine vitesse de récession ; ayant atteint la moitié de son déplacement jusqu'à la ligne polaire (la périphérie), la vitesse doit décroître puisque tout mouvement cesse sur la périphérie même (il n'y a pas de temps qui s'écoule à la périphérie) ; subissant une telle accélération négative, tout se passe maintenant comme si la particule était attirée vers l'observateur à l'origine. L'équilibre vient du fait que la périphérie est quelque chose d'entièrement relatif ¹⁸, i.e. une origine est elle-même la périphérie d'un observateur situé sur la périphérie de cette origine. Autrement dit, l'équilibre dans les mouvements d'approche et de récession est une conséquence du mouvement des particules qui quittent la ligne polaire pour se diriger vers une origine.

5. De l'antinomie au compromis

C'est Lemaître qui explique, dans l'article de 1927 qui devait constituer la source de l'invention de l'"atome primitif" ¹⁹ :

"L'univers de De Sitter est vide, celui d'Einstein a pu être décrit comme contenant autant de matière qu'il en peut contenir ; il est étonnant que la théorie ne puisse fournir un juste milieu entre ces deux extrêmes".

Le cheminement de pensée qui conduit de la controverse entre Einstein et De Sitter à la découverte d'un juste milieu est particulièrement tortueux, souvent abrupt. En tout cas, il reste très révélateur du statut des conjectures cosmo-

logiques dans le cadre de la relativité générale, statut que l'apparente simplicité de la solution de Lemaître a tendance à déformer.

En fait, les deux figures de l'univers, celle d'Einstein et celle de De Sitter, sont la traduction directe de deux conceptions épistémologiques très différentes sur les fondements de la théorie de la relativité générale. La controverse va si loin que, dès 1918, le physicien Hermann Weyl est tenté de donner à ces deux figures une forme antinomique. Il le fait dans la première édition de son livre célèbre, Espace-Temps-Matière²⁰. En fait, Weyl est persuadé qu'il y a une manière de sortir de l'apparente incompatibilité entre le traitement minkowskien de l'espace-temps et le réquisit einsteinien du temps cosmique. Le premier est une exigence formelle, tributaire de toute théorie relativiste cohérente ; le second est plutôt une exigence matérielle, dans la mesure où — ainsi que De Sitter l'a bien montré — le temps cosmique est solidaire d'une matière cosmique, i.e. une matière répartie uniformément qui doit se superposer, dans tout raisonnement cosmologique, à une matière ordinaire par trop chaotique. La démarche de Weyl est très profonde, puisqu'elle semble conduite entièrement a priori : c'est la forme cosmologique la plus générale qu'il recherche, étant entendu que les deux exigences, formelle et matérielle, soient l'une et l'autre satisfaites.

Ceci conduit, en dépit de tout le caractère apparemment artificiel que cela peut comporter, à introduire un temps cosmique dans la métrique de De Sitter. La forme la plus générale est :

$$\Omega(x) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - x_5^2 \quad (3)$$

Weyl introduit le changement de variables suivant :

$$\begin{aligned} x_4 &= z \cosh t \\ x_5 &= z \sinh t \end{aligned} \quad (4)$$

Pour un t fixé, on a $x_4 \gg x_5$ et, pour un z fixé, $x_4^2 - x_5^2 = z^2$. Ainsi, toutes les droites $t = \text{cste}$ et toutes les hyperboles $z = \text{cste}$ ne définissent rien

d'autre que l'hyperboloïde de De Sitter. Son intervalle élémentaire est donné par

$$- ds^2 = (dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dz_4^2) - z^2 dt^2 \quad (5)$$

L'univers de De Sitter est donc maintenant exprimé dans des nouvelles coordonnées (z, t) . La variable t est le temps cosmique d'un univers desitterien statique. Mais le caractère "artificiel" de ce temps cosmique est immédiatement apparent dans les conséquences qu'il entraîne : l'hyperboloïde est coupé en deux régions complètement séparées l'une de l'autre, selon que $x_4 \geq x_5$ ou $x_5 \geq x_4$. Quand $z = 0$, on a les deux droites $x_4 = x_5$ ou $x_4 = -x_5$. Ainsi, sur la séparation proprement dite, le temps cosmique est à vrai dire indéterminé, puisque l'intersection de $z = 0$ et de t a lieu pour n'importe quel t . Weyl en tire cette première conclusion ²¹ :

"Nous avons un monde statique qui ne peut pas exister sans un horizon de masse".

Weyl interprète donc la "singularité" $z = 0$ à la manière d'Einstein, c'est-à-dire que l'indétermination du temps cosmique en cette zone est jugée corrélative d'une discontinuité, i.e. d'un horizon de masse. L'originalité de Weyl, à partir d'ici, est d'ajouter une indication sur ce qu'il en est d'un monde vraiment vide. Il dit qu'un monde parfaitement vide n'est pas statique ²² :

"Le monde ne serait pas statique dans son ensemble, et l'absence de matière serait alors en accord avec les lois physiques".

Le résultat peut s'énoncer sous une forme antinomique : si le monde est statique, il comporte de la matière mais il n'est pas homogène ; si le monde n'est pas statique, il est vide mais homogène. Weyl prend alors la décision de proposer une solution générale à tout le problème ²³. Il suggère que la solution pourrait bien n'être rien d'autre qu'une sorte d'extension de l'horizon de masse à tout l'espace-temps statique ²⁴. La forme originelle du modèle de De Sitter

(telle qu'elle est donnée par De Sitter lui-même) et l'interprétation qu'en fournit Einstein sont donc deux cas-limites, la réalité du monde étant une sorte de mélange des deux. Cette forme intermédiaire est celle de l'intérieur d'une sphère matérielle homogène ; c'est la géométrie riemannienne sphérique qui règne à l'intérieur de cette sphère et c'est une métrique intérieure de Schwarzschild qui l'exprime.

Dans cette remarque de Weyl, le terme "non-statique" fait son apparition sur la scène cosmologique. Weyl est bien loin de soupçonner l'immense destin futur de ce concept. De fait, on ne trouve aucun traitement analytique de l'idée, et la remarque est tout à fait laconique. Les motifs de Weyl ne sont que trop clairs : le terme non-statique est associé à la notion de monde "dans son ensemble" (als Ganzes), c'est-à-dire à cette notion de monde que De Sitter avait déjà qualifiée d'étrangère au postulat physique de continuité. Dans l'esprit de Weyl, les conséquences en sont drastiques, puisque la cosmologie perd le droit à une métrique propre : si elle est une vraie extension de la physique locale, la métrique de l'univers ne peut pas être différente d'une métrique locale comme celle de Schwarzschild. Le terme non-statique paraît désigner un concept étranger à la relativité générale. Par contre, si les équations du champ gravifique sont écrites d'emblée avec la constante cosmologique, ces équations ont une signification immédiatement cosmologique. L'idée que la forme originelle des équations d'Einstein comporte par soi la constante cosmologique constitue un écho des remarquables intuitions physiques de Weyl, et même de toute une philosophie de la nature. En effet, si telle est la forme originelle des équations, non seulement la recherche de conditions aux limites est d'avance privée de sens (un modèle de l'univers n'est plus dépendant d'une suppression préalable d'une telle recherche), mais l'unification même des lois de la gravitation et de l'électromagnétisme est ouverte : très tôt dans son itinéraire intellectuel vers une telle unification, Weyl remarque que l'adjonction d'une constante dans les équations d'Einstein est indispensable pour étendre

la géométrie naturelle du monde aux jauges, i.e. inclure la gravitation et l'électromagnétisme dans une géométrie commune, et cette constante est très similaire à la constante cosmologique ²⁵.

Il faut garder en vue que, tout à fait indépendamment de ces spéculations théoriques, mais exactement à la même époque, l'image concrète de l'univers, telle qu'elle est offerte par les astronomes, subit une transformation exceptionnelle. D'une manière assez inattendue, l'univers se révèle être "dynamique". Dans son livre La Théorie Mathématique de la Relativité, publié pour la première fois en 1923, et avant même que les résultats ne soient diffusés dans les revues astronomiques spécialisées, Eddington ²⁶ communique une liste exhaustive de mesures des vitesses radiales de nébuleuses spirales extra-galactiques ²⁷. Sur 41 mesures, seules 5 semblent indiquer des vitesses d'approche vers l'origine. La grande prépondérance des vitesses de récession est la nouvelle figure de l'univers. En 1917, De Sitter ne faisait état que de trois mesures, dont deux indiquaient une tendance à la récession ²⁸. Or, c'est la solution paradoxale de De Sitter qui seule anticipe un tel fait. Elle l'anticipe pourtant d'une manière qui n'a rien de très "dynamique". La courbure du temps dans cette solution implique un ralentissement des vibrations atomiques avec l'accroissement de la distance depuis une origine, et ce ralentissement se traduit par un décalage vers le rouge des raies spectrales des objets observés. C'est précisément un tel décalage que les astronomes observent, et qu'ils interprètent comme un effet cinématique du déplacement relatif des sources (effet Doppler). L'interprétation du modèle desittérien par Einstein et Weyl offre une troisième manière de comprendre le décalage : cette fois-ci, il est attribué à l'effet gravitationnel produit par l'accumulation de matière (l'horizon de masse).

Un fait astronomique aussi frappant par son caractère systématique entraîne une reprise complète du concept même de totalité, puisque le modèle de De Sitter semble maintenant favorisé par l'observation. La refonte théorique de ce concept

dans le cadre de la solution de De Sitter est l'oeuvre d'Eddington. Eddington se place dans une perspective très différente de Weyl, puisque le terme non-statique n'est plus compris de la même manière ²⁹ :

"On allègue parfois contre le modèle de De Sitter qu'il devient non-statique dès que quelque matière y est introduite ; mais cette caractéristique est plutôt en faveur que contre lui".

Weyl associait plutôt le non-statisme à l'absence de matière. Mais c'était là une conséquence de l'introduction quasi artificielle d'un temps cosmique. Eddington regarde les nouvelles équations du champ plutôt que la forme particulière de la métrique. Il est le premier à tirer clairement la conclusion ³⁰ : dans le modèle de De Sitter,

"Une particule au repos ne demeurera pas au repos à moins qu'elle ne soit à l'origine ; au contraire, elle sera repoussée de l'origine avec une accélération qui croît avec la distance. Un certain nombre de particules initialement au repos vont tendre à se disperser ..."

Cette conclusion est imposée par le maintien de la constante cosmologique dans un espace-temps vide ; elle autorise l'interprétation de mouvements systématiques de récession. Dans l'esprit d'Eddington, la transformation conceptuelle entraînée par là n'a rien à voir avec une manière ad hoc de rassembler faits et théorie. En effet, que se passe-t-il à la périphérie du visible, là même où De Sitter voyait l'arrêt de tout mouvement ? A la périphérie, dit Eddington ³¹,

"Nous sommes supposés observer un système qui a maintenant la vitesse de la lumière, ayant acquis cette vitesse pendant le temps infini qui s'est écoulé depuis le moment où la lumière a été émise".

En d'autres termes, l'horizon d'observabilité dans le modèle de De Sitter est parfaitement consistant, puisqu'il n'est rien d'autre que l'horizon même de la physique relativiste — la vitesse de la lumière comme limite infranchissable. C'est en ce sens que le modèle de De Sitter stricto sensu apparaît comme la clé d'une unification de tous les concepts de la physique. Pour Eddington,

en effet, l'unité de la physique passe par un préalable épistémologique ³².

L'idée directrice est que le fondement ultime de toute unité doit être dégagé des conditions à la fois communes et indépassables de toute opération de mesure dans et de l'univers ³³. A partir de cette analyse, le modèle de De Sitter gagne une autonomie théorique qu'il n'avait sans doute pas jusqu'alors ; autonomie qui va de pair avec la négation d'un compromis entre ce modèle et celui d'Einstein, ce qui ne va pas sans soulever d'autres problèmes, non strictement cosmologiques ³⁴.

Il reste que le point de vue cosmologique de la solution de De Sitter offre non seulement une interprétation consistante de l'horizon, mais aussi de tous les décalages vers le rouge effectivement observés. Eddington procède à un calcul relativement simple qui permet d'établir la grandeur numérique des décalages, étant entendu que la tendance à la dispersion des particules est une prédiction incontestable. Le résultat majeur est que la valeur numérique de l'effet Doppler est pratiquement celle qui est anticipée par la métrique elle-même ³⁵. En conséquence, si l'interprétation de De Sitter est correcte ³⁶,

"il n'est pas obligatoire de considérer les importants mouvements de récession qui sont déduits comme étant entièrement trompeurs ; il est vrai que les nébuleuses n'avaient pas ces mouvements lorsqu'elles ont émis la lumière qui est maintenant examinée, mais elles les ont acquis entretemps".

A la limite, il semble toujours possible de considérer que l'univers est au repos ; les mouvements n'ont lieu qu'entre les moments de l'émission et de la réception de la lumière, et c'est pourquoi la métrique est malgré tout statique. Il est vrai ^{que} l'horizon proprement dit n'échappe pas aux propriétés systématiques de mouvement, ce qui fait dire à Eddington que l'horizon n'est rien d'autre qu'une illusion de l'observateur à l'origine : il recule au fur et à mesure que nous essayons de nous en approcher, en sorte que toute comparaison avec une quelconque singularité impénétrable (comme dans la métrique de Schwarzschild) est dénuée de signification. D'où il vient que des objets

célestes sont parfaitement libres d'entrer dans cet horizon et d'en sortir, de franchir les limites de l'observabilité dans un sens ou l'autre. C'est seulement l'observateur à l'origine qui, dans l'histoire infinie de l'univers, reste confiné dans les limites de l'observabilité ; tout autre objet, à un certain moment de son histoire, franchit ces limites, soit temporairement soit définitivement. Comme c'est aussi l'observateur à l'origine qui définit ce qu'il y a lieu d'entendre par temps universel, il y a autant de temps universels que d'observateurs qui se considèrent à l'origine. En principe, muni d'un puissant télescope, un observateur pourrait bien voir, dit Eddington, des événements "extra-temporels", c'est-à-dire des événements qui ne croisent pas même une fraction du temps universel de cet observateur. On arrive à cette situation invraisemblable qu'une multiplicité d'univers différents pourraient parfaitement co-exister, i.e. que la métrique de De Sitter ne représente pas du tout un seul univers. C'est pour surmonter cette difficulté qu'Eddington introduit une sorte d'opérationalisme : chaque observateur doit rendre compte de sa description de l'univers à un autre observateur, en tant que chaque description chevauche une autre, mais partiellement seulement. Ainsi, de point en point, une vision complète pourrait être obtenue. Eddington perçoit la source de toute la difficulté ³⁷, puisque

"Un système de référence statique est un pis-aller artificiel, et conduit à des événements extra-temporels",

mais sa solution est décidément anti-copernicienne, l'univers n'étant pas a priori le même pour tous les observateurs. C'est seulement "en soi" qu'il est unique. La solution n'est pas véritablement cosmologique, elle ressemble plutôt à une sorte de "monadologie" fondée sur le caractère opératoire des lois physiques.

C'est encore dans l'année 1923, peu après la publication du livre d'Eddington, que Weyl s'attaque à nouveau au problème. Confronté à un problème aussi ultime

que celui d'Eddington, il le fait d'une manière radicale ³⁸. Comment éliminer ces encombrants événements extra-temporels ? Telle est la question dont la solution doit restaurer à la fois l'unité de l'univers et l'équivalence de tous les points de vue. Weyl prend maintenant l'exigence formelle de Minkowski à sa racine, savoir que seule la coïncidence de points-événements constitue en dernière analyse la seule "réalité" pour le physicien. L'extension de ce critère à l'échelle cosmique forme le fondement d'un principe universel de causalité, qui sera dénommé plus tard principe de Weyl. Il s'agit d'une sorte de "décret" qui abolit l'existence d'entités qui n'ont jamais coïncidé avec aucune mesure possible ou qui n'ont pas d'interaction causale avec l'univers observable. Evidemment, pour que le principe soit pleinement universel, il faut éviter de considérer l'univers observable depuis n'importe quelle origine. Il y a, de fait, une origine qui doit rassembler causalement tout ce qui est observable : c'est le point à l'infini dans le passé. Imaginons que le point en question, tout comme le point dans le futur infini, soient ramenés à distance finie, comme sur la Figure 1. Sur cette figure, les deux lignes $L_{-\infty}$ définissent le cône de lumière futur pour un observateur O à $t = -\infty$. Ce cône s'ouvre sans cesse au cours de l'histoire infinie de l'observateur O ; il est ^{le} domaine d'observabilité, tel qu'Eddington le conçoit. Par contre, ce qui se trouve dans le passé du point $t = +\infty$ constitue la limite de l'univers proprement dit, i.e. tout ce qui sera jamais observé par un observateur donné. Un observateur O pourrait fort bien voir un événement comme P entrer dans son cône. Mais le principe de Weyl décrète que, n'ayant pas d'action causale sur O (il ne coïncidait pas avec lui dans le passé infini), il n'existe tout simplement pas. Si, cependant, on peut l'observer, c'est qu'il a subi une interaction avec un autre événement, et cette interaction l'a projeté au dehors de sa trajectoire inertielle. On voit comment l'adoption du principe de Weyl restreint inéluctablement la classe des objets qui entrent en compte dans le modèle cosmologique ; la cosmologie ne s'occupe plus, a priori, de n'importe quels objets.

Weyl entoure son principe d'affirmations dont le style est manifestement de portée métaphysique. Ainsi ³⁹,

"Le passé demeure fermé derrière nous. Personne n'est susceptible d'entrer dans la force de rassemblement (bindenden Kraft) qui l'anime".

Pas de surprise, dès lors, que les contemporains de Weyl aient été complètement décontenancés. Ainsi, le physicien et astronome L. Silberstein exprime son étonnement en des termes peu flatteurs ; il évoque l'hypothèse de Weyl comme ⁴⁰

"cette hypothèse arbitraire ... qui donne toujours une vitesse radiale positive. Le Dr. Weyl lui-même insiste sur cette caractéristique comme le résultat de sa sublime conjecture sur le passé éloigné de toutes les étoiles".

Or, pour Weyl, cette hypothèse est précisément susceptible d'étayer d'une manière décisive le projet en vue d'une physique unifiée ; le principe en constitue la pierre de touche fondatrice. En effet, en l'absence de matière, le champ électromagnétique s'annule. Ceci ne signifie pas que le champ n'existe pas, mais plutôt qu'il est au repos ; c'est la matière qui est responsable du mouvement des charges. L'état de repos est justement l'état de l'infini passé, lorsque les cônes de lumière de tous les observateurs n'étaient que lumière. Le destin temporel de l'univers, par suite, est le remplissement de la lumière par l'"Esprit du Non-Repos" (Geist der Unruh), c'est-à-dire l'ouverture progressive du cône de lumière à autre chose que la lumière — c'est la matière. Corrélativement, la physique unifiée admet, de fait, une seule condition limite, en tant qu'il s'agit d'une condition donnée par la nature elle-même : cette condition limite, c'est l'infini passé, le moment où les champs électromagnétique et gravifique ne constituaient qu'un même et unique champ.

6. Statut de la cosmologie non-statique

Le principe de Weyl fournit une synchronisation universelle de tous les

événements à l'infini dans le passé, révoquant de la sorte les événements extra-temporels dont Eddington faisait état. En ce sens, le principe a une portée physique. En un autre sens, toutefois, il n'est pas du tout physique, puisqu'il décrète comme étrangers à la science de l'univers les objets étrangers à la "genèse". Rien n'empêche pourtant ces objets d'exister. A la monadologie "opératoire" d'Eddington, le principe de Weyl semble substituer finalement une monadologie plus forte encore, où l'infini passé (conçu comme origine) confère une sorte d'harmonie pré-établie entre les diverses parties observables de l'univers.

Weyl continue à traiter l'univers de De Sitter en termes de métrique statique. Pourtant, dans une contribution de 1930, au moment où les solutions de Friedmann et de Lemaître sont enfin redécouvertes ^{4I}, Weyl est sans doute le premier à attirer l'attention sur le fait que les coordonnées non-statiques sont l'expression naturelle du principe établi en 1923. De fait, les coordonnées non-statiques permettent d'adopter le principe de Weyl d'une manière qui ne laisse plus de doute sur sa signification physique. Si, dans l'infini passé, l'univers n'était qu'un point, alors seulement on peut dire que des événements comme P sont absolument inexistants puisque rien ne pouvait exister en dehors de ce point. Par suite, l'"Esprit du Non-Repos" n'est pas un processus de remplissement dans l'espace, mais plutôt l'expansion, la dilatation de ce point même. Les coordonnées non-statiques permettent de parler d'une telle expansion de l'espace ; les objets matériels sont passivement entraînés par ce mouvement. Dès 1923, il faut le souligner, Weyl apercevait que la synchronisation universelle à $t = -\infty$ fournissait une nouvelle expression pour le décalage vers le rouge, telle que l'égalité des décalages métrique et Doppler n'était plus tout à fait respectée comme l'imaginait Eddington. Il y a un effet de distance : plus l'objet est éloigné, plus la différence entre les deux décalages est importante (l'effet Doppler devient de plus en plus important). Cet effet de distance, comme Lemaître devait le voir en 1925, peut être compris physi-

quement comme un effet de l'expansion de l'espace ⁴². Le renversement est total : alors que la métrique statique d'Eddington élimine les mouvements entre l'émission et la réception de la lumière, attribuant aux décalages la cause de notre perception de l'univers comme s'il était en mouvement, la métrique non-statique intègre les décalages comme un effet **de** ce qui se passe entre l'émission et la réception, savoir l'expansion de l'espace. Lemaître remarque que les coordonnées statiques dans l'univers de De Sitter donnent au centre un statut privilégié, i.e. elles engendrent un horizon comme illusion du centre. Tout cela s'évanouit dans les nouvelles coordonnées : l'univers est réduit à n'être qu'une sorte de centre par lui-même, et la délicate question de la périphérie est absorbée dans la notion nouvelle d'histoire de l'univers.

C'est ainsi que le difficile problème de comprendre la possibilité de la matière dans la solution paradoxale de De Sitter a subi un destin étonnant. La clé du mystère est la notion de temps cosmique. Notion que Weyl introduit tout d'abord subrepticement, aux seules fins de rendre l'univers de De Sitter comparable à celui d'Einstein. L'univers de De Sitter muni d'un temps cosmique s'en trouve tout "artificiel" ; ou plutôt, son caractère artificiel devient enfin clair et la solution générale peut être recherchée selon des voies différentes. Comme Weyl le suspectait dès 1918, il n'y a pas, de la sorte, de clivage irréductible entre les deux modèles en présence. Mais le compromis n'est pas du tout passé par une sorte de réduction de la cosmologie à une physique locale étendue. C'est Weyl en personne qui, en 1923, donne les moyens de penser le temps cosmique comme quelque chose de "réel", percevant que là tient la possibilité de restaurer une authentique vision copernicienne dans un modèle que la nature semble avoir choisi. Il s'ensuit, dans l'interprétation de Lemaître ⁴³, que le modèle d'Einstein et celui de De Sitter sont effectivement deux cas limites, mais il s'agit des deux cas limites d'une métrique spécifiquement cosmologique — pourvu que la métrique soit temporalisée.

Il est intéressant de souligner la puissance logique de la nouvelle cosmologie.

Le statut particulier de la cosmologie scientifique a toujours résidé dans quelque chose d'assez simple ⁴⁴ : par définition, l'univers est un objet ou système unique et il ne peut donc pas être traité comme l'instance de quelque phénomène récurrent ; c'est la raison pour laquelle il échappe d'avance aux méthodes et techniques habituelles d'investigation scientifique. L'univers "historique", tel qu'il est révélé par l'adoption du principe de Weyl en termes d'une métrique non-statique, s'ouvre précisément à la récurrence, en tant que l'univers passe désormais par une série d'états théoriquement prédictibles. En ce sens, l'univers "unique" est divisé en cette multiplicité qui s'ajuste à la pratique scientifique et qui élève la cosmologie au rang d'un domaine légitime de la physique. La solution relativiste au problème de l'univers en mouvement n'est pas passé par une extension de la physique locale en tant que telle, mais plutôt par une extension de la méthodologie de cette physique.

Par suite, au niveau des solutions qui suivent l'application des lois, la cosmologie non-statique est loin de constituer l'expression des fondements de la relativité. Il est remarquable que le principe de Weyl, dans la mesure même où il est inventé dans le cadre de la cosmologie statique, révèle en tant que tel une dimension essentielle qui traverse toute la cosmologie "orthodoxe". Ce principe n'est pas physique dans le cadre statique, mais comment l'est-il dans le cadre non-statique ? Au moment de son invention, il tend à montrer qu'il n'y a pas de cosmologie relativiste sans une "idée" préalable et indépendante qui fixerait des conditions générales pour l'univers. Or, il n'en va pas fondamentalement autrement lorsque la métrique non-statique est adoptée. On l'a bien vu : dès 1918, le critère d'homogénéité est déjà si fort pour Weyl qu'il le décrit comme "accord avec les lois physiques" dans un modèle qui, parce qu'il est complètement vide, n'a justement rien de physique. Lorsqu'est établie, dans les années 1930-1933, la classe des différentes solutions dites de Friedmann, il apparaît qu'un "principe cosmo-

gique" fixe la structure du cosmos d'une façon particulièrement contraignante ⁴⁵.

L'état moyen du mouvement de la matière dans l'univers peut être décrit par un système co-mobile de coordonnées avec la métrique dite de Robertson-Walker :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \frac{dr^2}{(1 + Kr^2/4)} \quad (6)$$

Cette métrique s'applique à tous les univers homogènes et isotropes : ils ont un espace-temps qui se scinde en espace courbé et en temps cosmique commun à tous les observateurs co-mobiles, i.e. tous les observateurs qui participent à l'expansion et qui se laissent pour ainsi dire transporter par elle. La théorie relativiste de la gravitation ne joue plus un rôle que dans les différentes formes de la fonction $R(t)$ qu'elle suggère. La géométrie, i.e. la constante K , est fixée indépendamment. Il semble se présenter une impossibilité de principe : une mesure de décalage vers le rouge renseigne directement sur la question de savoir combien l'univers s'est dilaté entre le moment de l'émission et celui de la réception d'un signal lumineux, mais pour déterminer les distances, les vitesses de récession et le temps mis par la lumière pour parvenir à l'observateur, il faut également connaître la géométrie de l'espace et la manière dont R change avec le temps. C'est l'indétermination de la "solution" relativiste au problème de l'univers en expansion qui fait dire à De Sitter, dans l'une de ses dernières contributions ⁴⁶, que l'univers n'est plus rien d'autre qu'une hypothèse.

En 1928, et indépendamment de Lemaître, H.P. Robertson trouve également l'expression non-statique qui convient à la solution de De Sitter. Dans son langage ⁴⁷, l'univers est posé comme concept a priori. C'est ainsi que l'interprétation finale tend à confondre les notions d'a priori et d'hypothétique. Confusion révélatrice, puisque l'assimilation va à l'encontre du projet cosmologique initialement conçu comme expression et traduction des fondements de la relativité ; a priori ne devrait pas signifier hypothétique, mais préalable. De fait, l'inconditionné qui sous-tend cette hypothèse n'est plus celui de

la relativité générale : les coordonnées de l'univers en mouvement "accompagnent" le mouvement des galaxies, en sorte que l'inconditionné n'est rien d'autre que ce mouvement même de l'espace. Les coordonnées co-mobiles "épousent" à la fois l'espace et son mouvement ; de ce fait, elles confèrent à la fois à l'espace et au temps cosmiques le statut de réalités indépendantes.

De Sitter avait immédiatement senti que les ambitions placées par Einstein dans la cosmologie ne peuvent être satisfaites. Il dégage explicitement, dès 1916/1917, les prédilections philosophiques qui sous-tendent toute cosmologie contemporaine. Ce qui ne se démentira jamais, c'est que ces prédilections se confondent avec les présupposés plus ou moins latents de toute vision scientifique. Toujours nous en revenons à cette critique de De Sitter à l'égard de la "consistance cosmologique" de la relativité générale : cette critique donne à penser, soit que la relativité est pour ainsi dire "trop" mathématique, soit que cette consistance doit être recherchée selon des voies très différentes. Chacune de ces deux approches demande tout à fait autre chose qu'un simple changement de référence. Dans le premier cas, on s'oriente vers une nouvelle physique, une physique qui unifie des phénomènes d'ordre très variable ; tel est l'itinéraire déjà tracé par Eddington et Weyl lors de leurs premières recherches cosmologiques, et telle est aussi, poussée à l'extrême, la tendance de la physique actuelle. Dans le second cas, on substitue au caractère hypothético-déductif de ces constructions un ensemble de présupposés de nature explicitement épistémologique ; ces préalables doivent répondre à la question du pourquoi de telle ou telle loi : telle est la voie prise par la cosmologie déductive, qui est fondée par E.A.Milne en 1934 et qui répond d'une manière radicale au problème même que soulève la "solution" relativiste à l'univers en mouvement.

Notes

- (1) Cf. l'analyse historique et épistémologique détaillée dans le dernier livre de J.Merleau-Ponty, La Science de l'Univers à l'Age du Positivisme, Paris, J.Vrin, 1984.
- (2) I.Newton, Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle, trad. M. du Châtelet, Paris, rééd. Blanchard, 1966, tome II, p.175
- (3) A.Einstein-M.Besso, Correspondance 1903-1955, trad. P.Speziali, Paris, Hermann, 1972, p.104. C'est une lettre du 9 mars 1917. Einstein a publié son mémoire cosmologique le 8 février 1917.
- (4) W.De Sitter, On the Relativity of Inertia. Remarks on Einstein's latest Hypothesis, Proc.Kon.Akad.Wetensch.Amsterdam, 19, (1917), 1217-1225. Le travail est présenté le 30 mars.
- (5) La place nous manque ici pour évoquer les contributions de Lanczos en 1922-1923. Elles ont pourtant directement influencé Lemaître.
- (6) Sur le problème historique en tant que tel, cf. le dernier chapitre du livre de R.W.Smith, The Expanding Universe. Astronomy's Great Debate 1900-1931, Cambridge, Cambridge University Press, 1982.
- (7) Les détails techniques de la redécouverte sont donnés par N.S.Hetherington, The Delayed Response to Suggestions of an Expanding Universe, J.Brit.Astr. Assoc., 84, (1973), 22-28
- (8) Traduction anglaise sous le titre "The Foundation of the General Theory of Relativity", in : The Principle of Relativity, transl. W.Perrett et G.B.Jeffery, New York, Dover, 1952.
- (9) W.De Sitter, On the Relativity of Rotation in Einstein's Theory, Proc.Kon.Akad.Wetensch.Amsterdam, 19, (1916), 527-532. Cet article a été communiqué le 30 septembre.
- (10) Dans un addendum à son article sur la relativité de la rotation, De Sitter relate que cette proposition a été faite au cours d'une conversation avec Einstein.

- (II) W.De Sitter, On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences, Monthly Not.Roy.Astr.Soc., 77, (1916), 182. Cet article est publié en décembre ; il est le deuxième d'une série de trois sur la question.
- (I2) On the Relativity of Rotation, art.cit., pp.531-532
- (I3) W.De Sitter, On the Relativity of Inertia, art.cit., p.1224. Notons que le mémoire cosmologique d'Einstein est publié le 8 février 1917 dans les Sitz.Ber.Preuss.Akad.Wiss.Berlin (trad.anglaise dans The Principle of Relativity, pp.177-188).
- (I4) A.Einstein, Kritisches zu einer von Hrn.De Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen, Sitz.Ber.Preuss.Akad.Wiss.Berlin, (1918), 270-272.
- (I5) W.De Sitter, Further Remarks on the Solutions of the Field-Equations of Einstein's Theory of Gravitation, Proc.Kon.Akad.Wetensch.Amst., 20, (1917), 1309-1312.
- (I6) On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences, Monthly Not.Roy.Astr.Soc., 78, (1917), 17-18.
- (I7) Ibid., pp.15-17.
- (I8) C'est seulement en 1920, dans son livre Space, Time and Gravitation, Cambridge, Cambridge University Press, p.162, qu'Eddington reconnaîtra ce fait d'une manière définitive.
- (I9) G.Lemaître, Un Univers Homogène de Masse Constante et de Rayon Croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques, Ann.Soc.Sci.Bruxelles, 47 (A), (1927), 50.
- (20) H.Weyl, Space, Time, Matter, transl.H.Brose (sur la quatrième édition allemande), New York, Dover, 1952, pp.273-282.
- (21) Ibid., p.282
- (22) Ibid.
- (23) H.Weyl, Über die Statischen Kugelsymmetrischen Lösungen von Einsteins "Kosmologischen" Gravitationsgleichungen, Phys.Zeitschr., 20, (1919), 31-34.

- (24) Nous dirions aujourd'hui : l'univers est l'intérieur d'un trou noir.
- (25) Space, Time, Matter, pp.282 sq.
- (26) A.S.Eddington, The Mathematical Theory of Relativity, Cambridge, Cambridge University Press, 1923, p.162
- (27) La liste est fournie par V.M.Slipher, l'astronome du Lowell Observatory.
- (28) W.De Sitter, On the Curvature of Space, Proc.Kon.Akad.Wetensch.Amst., 20, (1917), 235-236.
- (29) The Mathematical Theory of Relativity, p.161
- (30) Ibid.
- (31) Ibid., p.164
- (32) Ces considérations épistémologiques constituent la première partie du chapitre cosmologique dans le livre d'Eddington, pp.151 sq.
- (33) Par exemple, Eddington considère que l'homogénéité et la symétrie du monde ne sont rien d'autre qu'une propriété des lois einsteiniennes, non pas une propriété du monde extérieur (pp.154-155).
- (34) Comme on le sait, Eddington s'est très tôt intéressé à la possibilité d'une unification de la physique au moyen des nombres purs. Or, seul le modèle d'Einstein fournit des corrélations satisfaisantes, comme par exemple le rapport du rayon de l'électron à sa masse gravitationnelle et le nombre de particules élémentaires dans cet univers (pp.167-168).
- (35) Ibid., p.164
- (36) Ibid.
- (37) Ibid., p.166
- (38) Il s'agit de la cinquième édition du livre Espace-Temps-Matière, celle de 1923, immédiatement suivi de l'article fondamental de Weyl, Zur Allgemeinen Relativitätstheorie, Physik.Zeitschr., 24 (1923), 230-232
- (39) Raum-Zeit-Materie, 5.Aufl., Berlin, J.Springer, 1923, § 39, p.297
- (40) L.Silberstein, Determination of the Curvature Invariant of Space-Time, Philos.Mag., 47 (1924), 909.

- (41) H.Weyl, Redshift and Relativistic Cosmology, Philos.Mag., 7 (1930), 936-943.
- (42) G.Lemaître, Note on De Sitter's Universe, J.Math.Phys., 4 (1925), 37-41.
- (43) Un Univers Homogène ..., art.cit., p.55
- (44) Cf. M.Munitz, The Logic of Cosmology, Brit.J.Phil.Sci., 13, (1962), 34-50.
- (45) Notons que c'est Milne, le premier, et pas avant 1935, qui introduit explicitement le terme "principe cosmologique" dans son livre Relativity, Gravitation and World-Structure, Oxford : Clarendon Press. Milne l'attribue d'ailleurs à Einstein. Ceci montre à quel point le principe en question jouait un rôle à la fois latent et très puissant depuis les premières spéculations d'Einstein.
- (46) W.De Sitter, On the Expanding Universe, Proc.Kon.Akad.Wetensch.Amst., 35, (1932), 604. De Sitter est décédé en 1934.
- (47) H.P.Robertson, On Relativistic Cosmology, Philos.Mag., (1928), 835-848.

Figure 1

