Stephen HAWKING and Roger PENROSE. – **The Nature of Space and Time.** Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995, 141p.

par **Joël Merker**

Selon un aphorisme bien connu d'Einstein, la chose la plus incompréhensible au sujet de l'univers, c'est qu'il soit compréhensible. Et pourtant, pourra-t-on unifier la théorie quantique des champs et la théorie einsteinienne de la relativité, les deux théories physiques les plus puissantes, sophistiquées et performantes, en ce tout cohérent que l'on a déjà souvent nommé, une théorie quantique de la gravitation, ou réciproquement une *gravitation quantique*? Cosmologie et quantas sauront-ils s'associer, trouver l'interexpressivité qui domine enfin l'irréductibilité de leurs problèmes d'origine?

Dans ce livre exceptionnellement dense, deux des plus célèbres physiciens du monde – Stephen Hawking (auteur notamment de *A Brief History of Time*) et Roger Penrose (*The Emperor's New Mind* et *Shadows of the Mind*) résument leurs travaux scientifiques et expriment leurs divergences. Ils y expliquent leurs thèses dans un travail constitué de six leçons et d'un débat final, présentés à l'Institut Isaac Newton pous les Sciences Mathématiques (Université de Cambridge). Point culminant d'un programme de six mois, cette discussion sur la nature fondamentale de l'univers s'expose aussi avec ses incertitudes et un répertoire d'arguments cosmologiques controversés.

La lecture présuppose – hélas! – une connaissance de base de la relativité générale et de la théorie quantique. Ce serait une injustice flagrante que d'un niveler la technicité dans ce compte rendu, en se limitant aux aspects épistémologiques. Si ces derniers s'avèrent décevants, lorsqu'on les compare avec le débat Einstein-Bohr, il n'en reste pas moins que les trois présentations de chacun des deux auteurs s'articulent sur la base de vingt-cinq années de recherches scientifiques, condensées en un peu plus d'une centaine de pages. On ne peut que saluer cette vertu – proprement scientifique – de concision. Les grandes idées sont courtes, malheureusement. Mais venons-en à leur restitution.

Pour le lecteur non familier des concepts géométriques mis en oeuvre, signalons d'emblée que deux idées essentielles sont à retenir des travaux de Penrose et de Hawking: 1) ils ont établi mathématiquement l'hypothèse physique de l'existence de *régions singulières* dans l'univers (trous noirs) 2) Hawking a soutenu sur le plan théorique que ces trous noirs doivent émettre des *radiations thermiques*, énoncé qui prévaut de la contradiction entre cosmologie singulière et thermodynamique. A ce jour, aucune de ces hypothèses n'a été confirmée par l'observation de manière indubitable ni, d'ailleurs, semble pouvoir l'être.

En géométrie relativiste, rappelons que la gravité façonne la localité (le lieu, le champ, l'espace) sur laquelle elle se joue. À chaque point de l'espace-temps est attachée une métrique de signature $(3, 1)$ créée par les masses physiques et que l'on calcule (explicitement, dans certains cas) à l'aide des équations d'Einstein. Suivant les principes physiques de l'approche hamiltonienne, le parcours des particules s'effectue le long de géodésiques. Alors, en relativité, deux types se singularisent: les géodésiques de genre temps, ou courbes temporelles pures (*timelike geodesics*), qu'empruntent des particules de matière qui suivent l'écoulement du temps, et les géodésiques de genre lumière, ou géodésiques isotropes (*null geodesics*), celles qu'empruntent les photons. À tout point p de l'espace-temps est associé son futur chronologique $I^+(p)$, cône de lumière lorentzien déformé par la structure gravitationnelle de l'espace, et qui est engendré par des géodésiques isotropes. La géométrie globale du futur $I^+(S)$ d'une région S dépend a priori de celle de l'univers. D'ailleurs, il est possible d'en éliminer (artificiellement) un pan entier pour se convaincre de leur possible incomplétude. Voici maintenant introduite la question inaugurale de toute cosmologie:

L'espace-temps relativiste est-il globalement hyperbolique?

C'est-à-dire: il n'existe pas de courbes temporelles pures fermées dans U et le problème de Cauchy est toujours résoluble? L'enjeu d'une telle question a trait à la structure causale *globale* de l'univers, puisque le principe de causalité ne s'accorde pas de la possibilité pour une particule de faire retour sur son propre passé. La signification physique de l'hyperbolicité est la suivante: l'univers pourrait inscrire des surfaces de genre espace Σ et de dimension trois, de taille quelconque, de telle manière que des données différentielles sur Σ sont suffisantes pour déterminer leur évolution en tout temps (résolubilité du problème de Cauchy). Bien entendu, l'hyperbolicité locale n'aide en rien pour la question, qui dépend d'*hypothèses physiques* supplémentaires.

Le théorème de Penrose-Hawking (1965-1970), qui conduit au rejet des structures d'espace-temps non singulières, répond par la négative à cette question. La raison en est que la gravité courbe fortement l'espace-temps au voisinage des masses et qu'ainsi les géodésiques voisines sont récurvées sur elles-mêmes, donnant nécessairement naissance à des paires de points conjugués. Au fond, l'existence des singularités implique qu'il peut y avoir des particules dont l'histoire possède une fin en un temps fini. Ce théorème géométrique, de type «Analyse sur les variétés», prédit des singularités sous différentes associations d'hypothèses *relativement faibles* sur l'énergie et la structure globale de l'univers. Une telle prédiction entraîne que la relativité générale n'est pas une théorie complète: en effet, si les points singuliers doivent être éliminés de l'espace-temps, on ne peut plus y définir les équations des champs et il devient impossible de prédire l'influence d'une singularité. Deux types sont thématisés: dans le futur, sous l'effet de l'effondrement gravitationnel d'une étoile très massive par exemple (Chandrasekhar et Landau), on les appelle «trous noirs» (*black holes*, à défaut de la dénomination plus décente, mais passée à la trappe, d'«astres occlus») et dans le passé, il s'agit du fameux Big Bang.

Mais les singularités qui sont prévues dans le futur semblent posséder une propriété que Penrose a appelée *Cosmic Censorship*, d'après laquelle ces singularités sont invisibles et cachées pour les observateurs extérieurs. Le premier exemple explicite des équations d'Einstein décrivant un trou noir, dû à Oppenheimer et Snyder (1939), a été l'effondrement d'un nuage de poussière. Penrose a généralisé ce modèle en montrant qu'un trou noir est entouré d'un «horizon événementiel» (*event horizon*), surface d'espace-temps qui 1) doit être engendrée par des géodésiques isotropes, *i.e.*

des géodésiques en tout point tangentes au cône isotrope de la pseudo-métrique locale (*null geodesics*) ou géodésiques de genre lumière et 2) contenir une géodésique isotrope infinie issue de chaque point non lisse et telle enfin que 3) l'aire de ses sections spatiales augmente avec le temps. Il a aussi été prouvé (Israel 1967, Carter 1971, Hawking 1972) que la limite asymptotique d'un tel espace-temps est donnée par la solution de Kerr (*cf. infra*). D'après Penrose 1972, l'hypothèse de *strong cosmic censorship* correspond à l'exclusion d'une singularité *nue*, locale, ponctuelle, apparaissant *au milieu* de l'espace-temps, de telle manière qu'elle soit observable à distance finie, et équivaut à l'hypothèse d'hyperbolicité globale de l'espace-temps. C'est justement l'hypothèse que Stephen Hawking rejette sous sa forme forte, en s'attaquant à une *théorie quantique des trous noirs* et à une cosmologie quantique.

Sa version du *weak cosmic censorship* l'amène à poser seulement que le bord d'un trou noir est engendré par des géodésiques isotropes qui peuvent posséder une origine, mais sont illimitées dans le futur. Il en découle, sous une hypothèse faible d'énergie, que les génératrices de l'horizon événementiel divergent, et par conséquent une loi d'*entropie gravitationnelle*: l'aire cumulée des horizons événementiels ne peut qu'augmenter qvec le temps.

Cette loi, Hawking la rapporte à la deuxième loi fondamentale de la thermodynamique pour en renforcer les similarités. Si l'aire de l'horizon événementiel est analogue à l'entropie, $S = A/4$, alors le coefficient κ qui y mesure l'intensité (constante si la symétrie est sphérique) du champ gravitationnel, correspond, par analogie, à la température T, dans les deux premières lois fondamentales, $\delta E = \frac{\kappa}{8\pi}\delta A$ pour la mécanique des trous noirs et $\delta E = T\delta S$ pour la thermodynamique. Classiquement, c'est-à-dire avant les découvertes de Hawking, un trou noir en contact avec des radiations thermiques en absorbera une partie sans en émettre aucune, puisque rien ne peut sortir d'un trou noir, conséquence qui viole le second principe généralisé de la thermodynamique. Ainsi, *pour rétablir la cohérence entre relativité et théorie quantique*, il fallait montrer que les trous noirs émettent des radiations qui sont exactement thermiques. Exigence, nécessité ou découverte, l'existence de ces radiations (non attestée expérimentalement, loin s'en faut) a été défendue par Hawking sur un plan théorique dans les années soixante-dix. Cette confrontation ou harmonisation de la théorie physique de l'espace et de la thermodynamique quantique permet à l'ardent fondateur de la cosmologie quantique d'avancer au terme de sa première leçon: «*Ainsi, Einstein avait tort de croire que «Dieu ne joue pas aux dés». La considération des trous noirs suggère non seulement que Dieu joue bel et bien aux dés, mais encore qu'il sème le trouble dans notre esprit en les jetant là où nul ne peut les voir.*»

En effet, d'après la théorie quantique, un observateur extérieur ne peut plus mesurer l'état d'un trou noir, l'information s'effondre réellement avec lui. En 1973, Hawking a étudié l'évolution d'un champ scalaire lors de l'apparition d'une singularité à symétrie sphérique (diagramme de Carter-Penrose) et soutenu (sur la base d'un «*messy calculation*») qu'après l'explosion persistait une *création particulaire* accompagnée d'une émission thermique, de température $\frac{\kappa}{2\pi}$. Ce premier calcul a suscité ensuite un seconde approche, plus conceptuelle, basée sur l'emploi de la *rotation de Wick*. Le procédé, habituellement utilisé en théorie quantique des champs, transforme un espace plat de Minkowski en un espace euclidien. Il consiste tout simplement à complexifier la variable de temps t en $\tau = it$, où τ est identifiée périodiquement. Consacrons quelques lignes à l'exposition des arguments élémentaires qui soutiennent l'idée des radiations thermiques.

Pour fixer les idées, partons d'un champ gravitationnel engendré par un corps stationnaire à symétrie sphérique, de rayon R, de masse M et dépourvue de rotation, donné par une métrique de Schwarzschild, solution des équations d'Einstein dans le domaine $\{r > R\}$:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2).$$

(Sans supposer les constantes fondamentales G et c égales à 1, les deux premiers termes s'écrivent

$$-\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2.$$

Même pour une naine blanche, résidu stellaire dont la masse est de l'ordre de celle du soleil (2.10^{30} kg) mais dont le rayon est extraordinairement petit ($\simeq R_{terrestre} = 6400 km$), on a encore $\frac{2GM}{c^2} < R$, donc le domaine de validité s'étend jusqu'à la surface de l'astre. À l'intérieur, la solution sera exempte de singularité, car l'équation, modifiée, tient compte du tenseur énergie-impulsion en présence de matière (*cf.* H. Andrillat, *Introduction à l'étude des cosmologies*, A. Colin, 1970). Dans le cas d'un trou noir, le rayon de Schwarzschild $R_S = 2GM/c^2$ est celui de l'horizon événementiel, $R_S > R$. C'est encore la taille critique en dessous de laquelle les rayons lumineux émis à la surface de l'astre sont piégés.)

En remplaçant t par $i\tau$, on obtient une métrique d'Euclide-Schwarzschild, *i.e.* définie positive, mais apparemment singulière à la distance finie $R_S = 2M$. Artifice de calcul ou renormalisation de l'horizon événementiel, Hawking se débarasse de la singularité par le changement de coordonnées radiales $x = 4M(1 - 2M/r)^{1/2}$ qui régularise son expression

$$ds^2 = x^2 \left(\frac{d\tau}{4M}\right)^2 + \left(\frac{r^2}{4M^2}\right)^2 dx^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2). \tag{1}$$

Le procédé est controversé. Ou alors le sens physique est banal: l'infini gît vraiment à $r = R_S$, *i.e.* $x = \infty$, pour des observateurs vivant hors du trou noir. Reste que *le saut capital de Hawking* réside dans l'application de la rotation de Wick et sa périodisation. L'expression (1) suggère que l'origine, dans le plan des (x, τ), se comporte comme l'origine dans les coordonnées polaires si l'on identifie la coordonnées τ avec la période $\beta = 8\pi M$. De manière similaire, la transformation euclidienne d'une métrique d'un trou noir introduira une période temporelle $\beta = 2\pi/\kappa$.

Penrose l'aura bien noté lors du débat final: la rotation de Wick possède l'avantage de donner un sens aux intégrales de chemin, quoique son emploi en gravité suscite encore sa réserve. Hawking calcule alors la fonction de partition du système à la température $T = \beta^{-1}$, donnée par l'intégrale sur tous les champs ϕ sur un espace-temps euclidien périodique dans le temps. Dans le cas d'un espace plat, on retrouve le résultat usuel pour la fonction de partition du corps noir de Planck. Par conséquent, ces analogies signifient que les champs agissant au voisinage d'un trou noir se comportent exactement comme s'ils se trouvaient dans un état thermique de température $\kappa/2\pi$.

Ainsi est née la gravité quantique. Se démarquant du réalisme de Penrose, Hawking aura porté l'inventivité quantique bien au-delà en cosmologie. On connaît les réserves de la communauté scientifique internationale quant aux spéculations parfois déroutantes de l'émule de Penrose. Si la théorie classique de la relativité générale conduit naturellement à ses insuffisances, la question reste ouverte de savoir jusqu'où les exigences positivistes et contextualistes de la théorie de la mesure physique porteront les lois de l'espace-temps. Bien entendu, pour Hawking, la métrique spatio-temporelle fluctue, conséquence que Penrose n'accepte pas. Ces termes obligés du débat physique contemporain que sont la question de la réalité et la réduction du paquet d'onde constituent ses deux positions de repli en réponse aux travaux et à la conviction de Hawking. Mais faut-il vraiment invoquer un processus de réduction objective (*Objective Reduction*) pour *expliquer* le fait qu'on n'observe qu'un seul espace-temps au niveau macroscopique? Penrose, comme Einstein, refuse de croire que la mécanique quantique est une théorie finale. Hawking, jouant le positiviste contre le platoniste, pense que l'univers est borné et que seule une théorie quantique accompagnée de l'hypothèse de métriques compactes sans bord (*No Boundary Proposal*) peut rendre compte adéquatement de l'observation. Argumentant d'abord contre la flèche du temps, Hawking se range ensuite (modulo une fluctuation quantique) à l'hypothèse classique de courbure de Weyl due à Penrose: les singularités initiales de type Big Bang ont un tenseur de Weyl nul (le tenseur de Weyl est la partie de la courbure de l'espace-temps qui n'est pas localement déterminée pas la matière à travers les équations d'Einstein).

Il est difficile d'évaluer jusqu'à quel point le dialogue et son développement scientifique sont dominés par des options préalables diamétralement opposées. Hawking s'avère théoricien d'une cosmologie *compacte*, qui envisage naissance, vie et mort d'un univers sans bord. Penrose préfère la richesse infinie et l'ouverture des structures hyperboliques, il rejette l'idée de symétrie temporelle et oppose une résistance expérimentée aux spéculations de Hawking, portant par exemple sur les créations par paires de trous noirs et de trous blancs. Ces hypothèses seraient en désaccord avec le deuxième principe de la thermodynamique, et probablement aussi avec l'observation. Au moins est-il nécessaire que la théorie soit *asymétrique temporellement* dans ses implications.

Ainsi, la question gaussienne de la validité des hypothèses de la géométrie dans les sciences de la nature n'a pas faibli. Le sort d'une cosmologie singulière et la pertinence prédictive de la gravité quantique demeurent pour nous suspendus.