

Relativité

La contribution paradoxale et sous-estimée de Kurt Gödel

La publication du présent essai de Kurt Gödel fait suite au dossier concernant la relativité de notre précédent numéro (*Fusion* n°107). Nous expliquions, dans l'article central de ce dossier, comment Leibniz avait

réfuté, en vertu du principe de raison suffisante, l'espace et le temps absolus de Newton, et défendu un certain type d'espace-temps relatif. Nous montrions également comment, au prix de maints artifices et sophistications, Kant avait rétabli une forme d'espace et de temps absolus (quoique subjectifs), et comment son approche avait pu jouer le rôle de camisole de force pour les générations suivantes. En particulier, l'influence de la démarche kantienne sur les concepteurs de la théorie de la Relativité semble manifeste et empêche cette théorie d'atteindre la notion riemannienne d'espace-temps physique.

En outre, nous signalions dans l'article en question que le logicien Kurt Gödel, un ami d'Einstein, avait été un des premiers à signaler la parenté entre la philosophie kantienne et la théorie de la Relativité. C'est dans le texte que nous présentons aujourd'hui au lecteur de *Fusion*, que Gödel développe et étaye ce point de vue. Cet essai a été publié initialement en 1949, dans le volume dédié à Albert Einstein de la série *Library of Living Philosophers*, éditée par Paul Arthur Schilpp. Nous présentons à la suite la réponse d'Einstein à Gödel.

QUEL IDÉALISME ?

Un survol trop rapide de ce texte dense pourrait induire le lecteur en erreur quant aux positions réelles de Gödel, et il nous faut l'inviter à la prudence. Les notes de bas de page sont en particulier indispensables à la compréhension. Le premier point nécessitant un éclaircissement est la référence, dans le titre et dans le texte, à la « philosophie idéaliste ». Généralement, dans l'usage consacré, cette dénomination englobe des penseurs tels Platon, Leibniz, Kant... Mais, ceux-ci peuvent en fait difficilement être amalgamés, comme nous l'avons vu dans notre précédent dossier. Gödel, d'ailleurs, en avait bien conscience puisqu'il était un ardent défenseur de Leibniz, alors qu'il avait, comme Einstein, beaucoup plus de réserves sur la philosophie kantienne. Toute personne connaissant Leibniz et Kant comprend ainsi, dès le second paragraphe du texte de Gödel, que ce dernier parle bien d'une relation entre l'idéalisme de Kant et la Relativité.

HENRY JOUVE

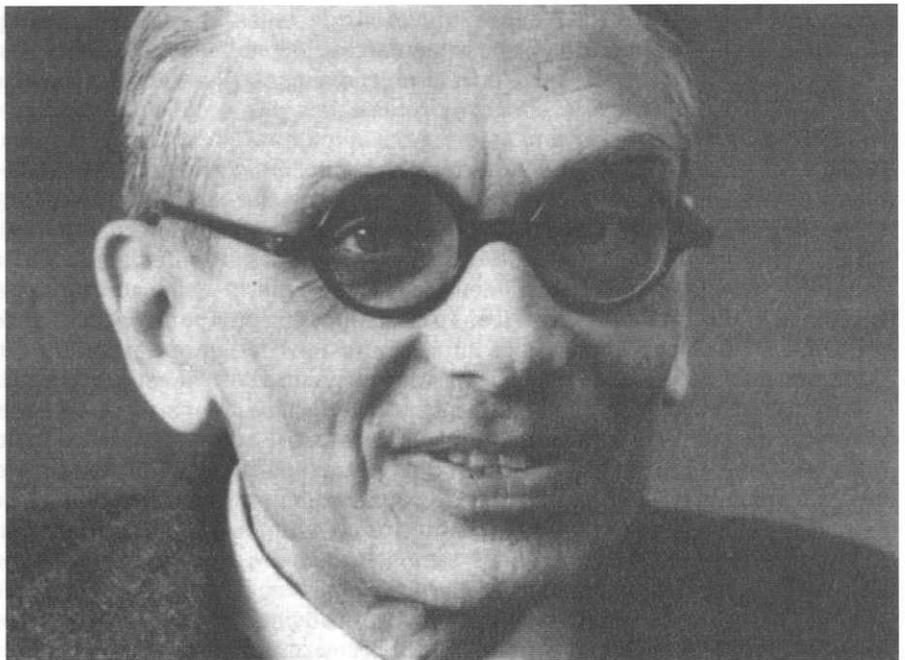
**UN LOGICIEEN
CHEZ LES PHYSICIENS...
ET CHEZ LES PHILOSOPHES**

A travers cet écrit, le logicien Gödel s'aventure dans deux domaines, la philosophie et la physique théorique, qui sont, d'un point de vue académique, assez éloignés de ses terres d'origine. Certains « spécialistes » ont saisi ce prétexte pour ne pas prendre au sérieux sa contribution, alors qu'indéniablement, elle le mérite, comme en témoigne d'ailleurs le jugement élogieux d'Einstein.

Consacré à la question du temps, cet essai suit le fil conducteur suivant. Gödel explique d'abord que la notion de laps de temps objectif, ou de temps objectif, est a priori incompatible avec la théorie de la Relativité. Il revient ensuite sur les arguments de ceux, comme James Jeans, qui tentent de « sauver » le temps objectif, et termine en présentant ses propres travaux en la matière, la découverte des fameux « univers en rotation », d'où il déduit l'incompatibilité définitive entre la Relativité et toute espèce de temps objectif. Par cette conclusion, il est important de signaler que Gödel tend plutôt à renforcer le lien entre Relativité et doctrine kantienne. Pour être plus juste et ne pas impliquer le concept d'espace-temps relatif, il serait d'ailleurs plus juste de parler de la relation entre les *équations de la Relativité générale* et la doctrine kantienne... Avant de revenir sur le texte en lui-même, disons quelques mots de sa postérité.

Quelques mois après la parution de l'ouvrage édité par Paul Arthur Schilpp, Kurt Gödel présentait en détail ses « univers en rotation » dans la *Reviews of Modern Physics*. Dès lors, la communauté des astrophysiciens et des cosmologistes, qui acceptait mal l'incursion de Gödel dans son pré-carré, allait tenter de montrer que les modèles d'univers de Gödel n'étaient pas valides. En 1961, Subrahmanyam Chandrasekhar et James Wright prétendirent avoir trouvé la faille dans le raisonnement du logicien : une erreur s'était glissée dans les prémisses physiques de Gödel. Mais, leur article fut réfuté peu après par Howard Stein. Décidément, les univers de Gödel demeuraient embarrassants... Et c'est manifestement la raison qui poussa « l'éminent » Stephen Hawking à vouloir s'en débarrasser en introduisant de manière complètement arbitraire une « conjecture de préservation de la chronologie », au cours des années 1990.

complète de tous les observateurs se mouvant avec des vitesses différentes (mais uniformes), ce qui est le point essentiel, subsiste seulement dans le cadre de l'espace-temps abstrait de la théorie de la Relativité restreinte et dans certains univers vides de la Relativité générale. Cependant, l'existence de la matière, tout comme le type particulier de courbure de l'espace-temps qu'elle produit, détruit en grande partie l'équivalence entre les différents observateurs⁶ et distingue manifestement certains d'entre eux du reste, à savoir ceux qui suivent dans leur mouvement le mouvement moyen de la matière⁷. Et, dans toutes les solutions cosmologiques des équations gravitationnelles (c'est-à-dire dans tous les univers possibles) connues à ce jour, les temps locaux de tous ces observateurs



NOTES

1. Voir par exemple J.M.E. McTaggart, « The Unreality of Time », *Mind*, 17, 1908.

2. Il en est tout au moins ainsi si on requiert que deux événements ponctuels quelconques soient ou simultanés ou successifs, c'est-à-dire si la succession temporelle définit un ordonnancement linéaire complet de tous les événements ponctuels. Il existe alors un ordre partiel absolu.

3. Kant (dans la *Critique de la Raison Pure*, 2^e édition, 1787, p. 54) exprime ce point de vue dans les termes suivants : « Ces affections, que nous nous représentons comme des changements, en coexistant avec d'autres formes de cognition, susciteraient une perception dans laquelle l'idée de temps, et donc aussi celle de changement, n'aurait plus du tout lieu ». Cette formulation s'accorde bien avec la situation découlant de la théorie de la Relativité.

4. On peut prendre le point de vue selon lequel l'idée d'un laps de temps objectif (dont l'essence est que seul le présent existe réellement) n'a pas de sens. Mais ce n'est pas un moyen de sortir du dilemme, car, par cette même opinion, on adopterait le point de vue idéaliste vis-à-vis de l'idée de changement, comme ces philosophes qui le considèrent comme auto-contradictoire. En effet, dans les deux approches, on nie qu'un laps de temps objectif soit un état des choses possible, et à *fortiori* qu'une telle entité existe dans la réalité, et cela fait une très mince différence dans ce contexte de le considérer comme sans signification ou comme auto-contradictoire. Bien sûr, pour ceux qui n'adoptent qu'un seul de ces deux points de vue, l'argument ci-dessus tiré de la théorie de la Relativité n'est pas nécessaire. Mais, même pour eux, il pourrait être intéressant qu'il existe possiblement une seconde preuve de la non-réalité du changement basée sur des fondements entièrement différents, en particulier compte tenu du fait que l'assertion à prouver va complètement à l'encontre du sens commun. Une discussion sur ce sujet particulièrement claire et indépendante de la théorie de la Relativité peut être trouvée dans : Paul Mongré, *Das Chaos in kosmischer Auslese*, 1898.

5. On peut objecter que cet argument montre seulement que le laps de temps est quelque chose de relatif, ce qui

n'exclut pas qu'il soit quelque chose d'objectif, bien que les idéalistes maintiennent qu'il est simplement imaginaire. Cependant, un laps de temps relatif, même si des sens très variés peuvent être donnés à cette locution, serait à coup sûr quelque chose de très différent du laps de temps dans le sens ordinaire, qui relève d'un changement dans l'existant. En revanche, le concept d'existence ne peut pas être relativisé sans perdre complètement son sens. De plus, on pourrait objecter que l'argument considéré prouve seulement que le temps s'écoule différemment pour des observateurs différents, alors que le laps de temps en lui-même peut être néanmoins une propriété intrinsèque (absolue) du temps ou de la réalité. Toutefois, un laps de temps qui n'est pas une durée d'une certaine manière définie me semble aussi absurde qu'un objet coloré qui n'aurait pas de couleur définie. Et même si une telle chose était concevable, on aurait à nouveau quelque chose de totalement différent de l'idée intuitive d'un laps de temps à laquelle se réfère l'affirmation idéaliste.

6. Bien entendu, d'après la théorie de la relativité, tous les observateurs sont équivalents dans la mesure où toutes les lois du mouvement et de l'interaction pour la matière et le champ sont les mêmes pour chacun d'entre eux. Mais cela n'exclut pas que la structure du monde (c'est-à-dire la véritable disposition de la matière, du mouvement et du champ) puisse offrir des aspects différents à des observateurs différents, et qu'elle puisse offrir un aspect plus « naturel » à certains d'entre eux et plus distordu à d'autres. Soit dit en passant, l'observateur ne joue pas un rôle essentiel dans ces considérations. Le point principal est bien sûr que le monde, lui-même, a certaines directions distinctes qui définissent directement des temps locaux distincts.

7. La valeur du mouvement moyen de la matière peut dépendre essentiellement de la taille des régions dans lesquelles cette moyenne est considérée. Ce qu'on peut appeler le « vrai mouvement moyen » est obtenu en prenant des régions si larges qu'une augmentation supplémentaire de leur taille n'occasionnerait plus de variations de la valeur obtenue.

s'accordent ensemble en un temps universel, de telle sorte qu'il devient apparemment possible de considérer ce temps comme le « vrai », qui s'écoule objectivement, tandis que les différences avec les mesures faites par d'autres observateurs peuvent être regardées comme dues à l'influence qu'exerce un mouvement relatif à l'état moyen de mouvement de la matière sur les processus de mesure et physiques en général.

De cet état des choses et attendu du fait que certaines solutions cosmologiques connues semblent représenter correctement notre monde, James Jeans a conclu⁸ qu'il n'y a aucune raison d'abandonner l'idée intuitive d'un laps de temps absolu et objectif. Je ne pense pas que la situation justifie cette conclusion et je fonde mon point de vue principalement⁹ sur les considérations et faits suivants :

Il existe des solutions cosmologiques d'un autre type¹⁰ que celles connues jusqu'à présent, et pour lesquelles la procédure susmentionnée de définition d'un temps absolu n'est pas applicable, car les temps locaux des observateurs spéciaux utilisés précédemment ne s'accordent plus ensemble en un temps universel. Et aucune procédure accomplissant ce but ne peut exister pour ceux-ci, car ces mondes possèdent de telles propriétés de symétrie que, pour tout concept de simultanéité et de succession envisageable, il en existe d'autres qui ne peuvent s'en distinguer par aucune propriété intrinsèque,

mais seulement par la référence à des objets individuels, comme, par exemple, un système galactique particulier.

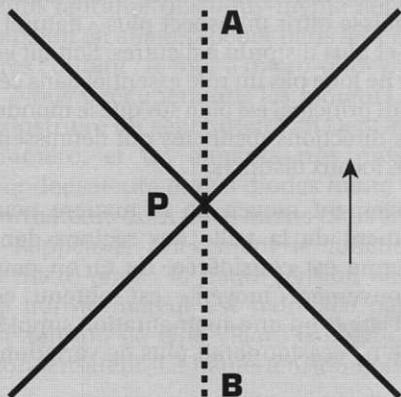
En conséquence, l'inférence évoquée ci-dessus pour la non-objectivité du temps s'applique sûrement à ces mondes. De plus, il arrive que les conditions temporelles dans ces univers (au moins dans ceux évoqués à la fin de la note 10) aient d'autres caractéristiques surprenantes, renforçant encore le point de vue idéaliste. En effet, en effectuant dans une fusée un voyage circulaire suivant une courbe suffisamment large, il est possible, dans ces univers, de se rendre dans toute région du passé, du présent et du futur, et d'en revenir, exactement comme il est possible, dans d'autres univers, de voyager d'une partie de l'espace à une autre.

Cet état de fait semble impliquer une absurdité, car il permet à une personne de voyager, par exemple, dans un passé proche dans lequel elle a elle-même vécu. Ainsi, elle rencontrerait quelqu'un qui serait elle-même à une période antérieure de sa vie. Elle pourrait faire à cette personne quelque chose qu'elle sait, grâce à sa mémoire, ne pas s'être produit. Cependant, utiliser ceci et des contradictions similaires pour prouver l'impossibilité des univers considérés présuppose la faisabilité concrète du voyage dans son propre passé. Mais les vitesses nécessaires pour accomplir ce déplacement dans une durée raisonnable¹¹ sont bien au-delà de tout ce qu'on pourrait penser devenir

Réponse d'Albert Einstein à Kurt Gödel :

(...) L'essai de Kurt Gödel constitue, à mon sens, une contribution importante à la théorie générale de la relativité, et en particulier à l'analyse du concept de temps. Le problème abordé ici me dérange depuis la conception de la théorie générale de la relativité, sans que j'aie réussi à le clarifier. Complètement à côté de la relation entre la théorie de la relativité et la philosophie idéaliste ou toute autre formulation philosophique des questions, le problème se présente comme suit :

Si P est un point-univers, un « cône de lumière » ($ds^2=0$) lui est associé.



Nous dessinons une ligne-univers comparable au temps et passant par P , et sur cette ligne, nous observons les points-univers proches A et B , séparés par P . Cela a-t-il un sens de poser une ligne-univers sans flèche, et d'affirmer B est *avant* P , A *après* P ? Est ce que ce qui subsiste de la connexion temporelle entre deux points-univers dans la théorie de la relativité est une relation asymétrique ou ne serait-il pas autant justifié, d'un point de vue physique, d'indiquer une flèche dans la direction opposée et d'affirmer A est *avant* P , B *après* P ?

En première instance, l'alternative est tranchée par la négative. Nous pouvons dire : s'il est possible d'envoyer (à un télégraphe) un signal (passant à proximité de P) de B vers A , et non de A vers B , alors le caractère unilatéral (asymétrique) du temps est assuré, il n'existe pas de libre choix pour la direction de la flèche. L'essentiel dans ceci est que l'envoi d'un signal est, dans le sens thermodynamique, un processus irréversible, un processus qui est lié à la croissance de l'entropie (tandis que, *d'après nos connaissances actuelles,*

tous les processus élémentaires sont réversibles).

Donc, si A et B sont deux points-univers suffisamment voisins qui peuvent être reliés par une ligne comparable au temps, alors l'assertion « B précède A » a un sens physique. Mais fait-elle toujours sens, si les points-univers reliés par la ligne de temps sont arbitrairement loin l'un de l'autre ? Certainement pas s'il existe des séries de points pouvant être reliés entre eux par des lignes de temps de telle manière que tout point précède temporellement le précédent, *et si la série est en elle-même fermée*. Dans ce cas, la distinction « plus tôt-plus tard » est abandonnée pour des points-univers qui sont très éloignés dans un sens cosmologique, et ces paradoxes, concernant la *direction* et la connexion causale, surgissent comme M. Gödel en a parlé.

De telles solutions cosmologiques des équations de la gravitation (avec une constante Λ ne disparaissant pas) ont été découvertes par M. Gödel. Il sera intéressant d'étudier si elles ne doivent pas être exclues pour des raisons physiques. (...) »

techniquement possible. C'est pour-
quoi on ne peut pas exclure *a priori*,
sur la base de l'argument donné, que
les structures spatio-temporelles de
l'univers réel soient du type décrit.

Comme pour les conclusions
pouvant être tirées à propos de la
question considérée au début de ce
texte, le point décisif est le suivant :
pour toute définition possible d'un
temps universel, on pourrait voyager
dans des régions de l'univers qui
correspondent au passé d'après cette
définition¹². Cela prouve encore que
supposer un laps de temps objectif
perdrait toute justification dans ces
univers. En effet, quelle que soit la
façon dont on suppose que le temps
s'écoule, il existera toujours des obser-
vateurs possibles pour lesquels le laps
de temps considéré ne correspond à
aucune durée objective (en particulier,
on peut envisager des observateurs
dont l'existence entière serait
objectivement simultanée). Mais, si
l'expérience d'un laps de temps peut exister sans un laps de
temps objectif, aucune raison ne peut justifier qu'un laps
de temps objectif doive être supposé comme tel.

On pourrait demander cependant : quelle est l'utilité
de tout cela si de telles conditions prévalent dans certains
univers possibles ? Cela a-t-il un sens pour la question qui



■ Kurt Gödel et Albert Einstein

nous intéresse, à savoir l'existence
dans notre univers d'un laps de temps
objectif ? Je pense que c'est le cas, car :

1. Notre univers, il est vrai, ne
peut sûrement pas être représenté
par le type particulier de solutions
en rotation évoquées ci-dessus (car
ces solutions sont statiques, et ne
donnent aucun décalage vers le rouge
pour les objets distants) ; néanmoins
il existe aussi des univers en rotation
en expansion. Dans de tels univers,
un temps absolu n'existerait pas non
plus¹³, et il n'est pas impossible que
notre univers soit de ce type.

2. La simple compatibilité avec les
lois de la nature¹⁴ des univers dans
lesquels on ne distingue pas de temps
absolu et, donc, aucun laps de temps
objectif éclaire un peu la signification
du temps dans les univers au sein
desquels un temps absolu *peut* être
défini. En effet, si quelqu'un affirme
que ce temps absolu s'écoule, il
accepte comme conséquence qu'il

dépend de la façon dont la matière et le mouvement sont
disposés dans l'univers, qu'il existe ou non un laps de
temps objectif (ce terme étant pris dans son sens usuel). Ce
n'est pas une contradiction directe ; néanmoins un point
de vue philosophique conduisant à de telles conséquences
peut difficilement être regardé comme satisfaisant. ●

NOTES

8. Voir *Man and the Universe*, Sir Halley Stewart Lecture (1935).

9. Une autre circonstance invalide l'argument de Jeans : la procédure
décrite ci-dessus ne donne qu'une définition approximative d'un
temps absolu. Sans doute est-il possible de raffiner cette procédure
pour obtenir une définition précise, mais peut-être seulement en
introduisant des éléments plus ou moins arbitraires (tels que, par
exemple, la taille des régions ou la fonction poids utilisée dans le
calcul du mouvement moyen de la matière). On peut avoir les plus
grands doutes sur l'existence d'une définition précise qui ait le
grand mérite de nous fournir des raisons suffisantes de penser que
le temps ainsi obtenu est le bon.

10. La propriété physique la plus manifeste distinguant ces solu-
tions de celles connues jusqu'à aujourd'hui est que le « compas
d'inertie » y tourne partout par rapport à la matière, ce qui
signifierait dans notre monde qu'il tourne relativement à la totalité
des systèmes galactiques. Ces univers méritent donc d'être appelés
« univers en rotation ». Dans les considérations qui suivent, j'ai en
tête un type particulier d'univers en rotation qui a des propriétés
supplémentaires comme celle d'être statique, homogène du point
de vue spatial et doté d'une constante cosmologique < 0 . Pour la
représentation mathématique de ces solutions, voir mon article à
venir dans *Rev. Mod. Phys.*

11. En basant notre calcul sur une densité moyenne de matière
égale à celle observée dans notre univers, et en supposant qu'on
puisse transformer la matière complètement en énergie, le poids du
« fuel » embarqué par la fusée pour accomplir un voyage en t années
(mesurées par le voyageur) serait de l'ordre de $10^{22}/t^2$ fois le poids de

cette fusée (si l'arrêt s'effectue aussi en reculant). Cette estimation
s'applique à $t \ll 10^9$. Indépendamment de la valeur de t , la vitesse de la
fusée doit être d'au moins $1/\sqrt{2}$ fois la vitesse de la lumière.

12. Pour atteindre cet objectif, des vitesses incomparablement plus
petites seraient suffisantes. Sous les hypothèses faites à la note 11,
le poids du fuel devrait être au plus du même ordre que le poids de
la fusée.

13. Au moins si on requiert que les expériences successives d'un
observateur ne doivent jamais être simultanées selon le temps
absolu, ou (ce qui est équivalent) que ce temps universel doive
s'accorder en direction avec les temps de tous les observateurs
possibles. Sans cette exigence, un temps absolu existe toujours
dans un univers en expansion (et homogène). Chaque fois que je
parle d'un temps « absolu », cela doit être compris avec la restriction
expliquée à la note 9, qui s'applique aussi aux autres définitions
possibles d'un temps absolu.

14. La solution considérée ci-dessus prouve seulement la compa-
tibilité avec la forme générale des équations du champ dans
lesquelles la valeur de la constante cosmologique n'est pas fixée.
Cependant, cette valeur, qui est maintenant connue avec certitude,
fait partie évidemment des lois de la nature. Mais d'autres solutions
en rotation pourraient donner un résultat indépendant de la valeur
de la constante cosmologique (ou plutôt de sa disparition ou de
sa non-disparition et de son signe, puisque sa valeur numérique
n'a pas de conséquence sur ce problème). De toute façon, ces
questions devraient d'abord susciter des réponses défavorables,
avant qu'on ne puisse penser à tirer une conclusion comme celle de
Jeans mentionnée plus haut. *Note ajoutée le 2 septembre 1949* : J'ai trouvé depuis que,
pour toute valeur de la constante cosmolo-
gique, il existe des solutions, dans lesquelles
il n'y a pas de temps universel satisfaisant la
requête de la note 13.